

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO – PPGA
DOUTORADO EM ADMINISTRAÇÃO

Luciano Ferreira

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO BASEADO EM AGENTES PARA
ANÁLISE DE CADEIAS DE SUPRIMENTO**

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO – PPGA
DOUTORADO EM ADMINISTRAÇÃO

Luciano Ferreira

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO BASEADO EM AGENTES PARA
ANÁLISE DE CADEIAS DE SUPRIMENTO**

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

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein

Porto Alegre

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F383l Ferreira, Luciano

Um modelo de simulação baseado em agentes para análise de cadeias de suprimentos / Luciano Ferreira. – 2009.

180 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Administração, Programa de Pós-Graduação em Administração, 2009.

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein

1. Cadeia de suprimentos. 2. Administração da produção 3. Modelagem. 4. Biodiesel. 5. Gerenciamento de estoques. I. Título.

CDU 658.7

Ficha elaborada pela Biblioteca da Escola de Administração UFRGS



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

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Domingos Padula
PPGA/EA/UFRGS

Prof. Dr. Eduardo Ribas Santos
PPGA/EA/UFRGS

Prof. Dr. Miguel Afonso Sellitto
UNISINOS

Prof. Dr. Roberto Max Protil
PUC/PR

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein

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

Curso: Doutorado

Porto Alegre, 01 de abril de 2009.

Á memória dos meus pais Brasil e Angelina.

AGRADECIMENTOS

Estes agradecimentos expressam um significado que estão além de palavras, representam atitudes e virtudes de pessoas que ajudaram nessa importante etapa da minha vida pessoal e profissional. Os resultados obtidos com este trabalho contaram com a ajuda de muitas pessoas, a cada uma delas, de forma muito especial e afetuosa, gostaria de agradecer.

À minha Família, grande em número e valores pessoais, pelo suporte, pela compreensão à ausência, pelo incentivo e pela tranquilidade transmitida nos momentos de dificuldade. Em especial, a minha esposa, Adriane, pelas confidências, pelas palavras de incentivo, pela alegria, pelo companheirismo e pelo amor.

Ao Orientador, professor Denis Borenstein, pela confiança depositada para a realização desta pesquisa. Muito obrigado também pela amizade, pelas sugestões que ajudaram a enriquecer o trabalho, pela contribuição nos artigos, pelos conselhos e pelas oportunidades oferecidas de crescimento pessoal e profissional.

Aos professores do PPGA/GESID Eduardo, Ângela, Maçada, Henrique, Norberto e Becker pelos conhecimentos transmitidos e pelas sugestões e críticas à nossa proposta de trabalho.

Aos colegas de doutorado da turma de 2005. A amizade de vocês tornou nossos trabalhos menos espinhosos e nossa convivência mais agradável. Em

especial, a Cristina e ao Marco, colegas da área de sistemas de informação, pela grande amizade conquistada e parceria em diversos trabalhos.

A Universidade de Cruz Alta, instituição onde trabalho desde 1998, pelo apoio financeiro e pela dispensa das atividades durante os primeiros anos de curso. Um agradecimento especial aos colegas de trabalho dos cursos de Ciência da Computação e de Administração.

Aos especialistas da área de Biodiesel que disponibilizaram seu tempo para nos ajudar nessa empreitada, a Márcia, ao Douglas e a Tais pelas informações disponibilizadas e a ajuda no entendimento do problema a ser modelado neste trabalho.

Agradeço ainda a Deus, por ter me dado forças e iluminado o caminho nesta longa jornada.

O tempo é o melhor autor, sempre encontra um final perfeito.

Charles Chaplin

RESUMO

Uma cadeia de suprimentos é uma rede composta por fornecedores, plantas de manufatura, depósitos, centros de distribuição e varejistas através da qual matérias-primas são adquiridas, transformadas e entregue aos consumidores. A gestão de cadeias de suprimentos (do inglês, Supply Chain Management – SCM) envolve a tomada de decisão nos níveis estratégico, tático e operacional, cujo objetivo é otimizar o desempenho da cadeia . O desenvolvimento de modelos para a avaliação de cadeias de suprimento é uma boa alternativa para estudar a gestão da demanda por produtos, bem como para analisar a efetividade de políticas de gerenciamento. Sistemas multiagentes são apropriados para estudar cadeias de suprimento, pois as diferentes unidades de negócio envolvidas podem ser modeladas como agentes autônomos, assim como suas regras de gerenciamento. Além disso, a modelagem do fluxo de produtos e do fluxo de informações, tais como volume de pedidos e prazos de entrega de um elo da cadeia para outro é facilitada. A análise da literatura especializada da área demonstra que a maior parte dos estudos procura resolver problemas específicos e sem considerar agentes normativos interferindo no comportamento individual de cada ator da cadeia. Este trabalho procura contribuir com o estado da arte da área de gestão de cadeias de suprimento da seguinte forma: (1) propondo um modelo de simulação, composto por agentes genéricos que podem ser facilmente estendidos e utilizados em outros contextos de aplicação, e (2) propondo a utilização dos conceitos de agentes normativos no contexto de cadeias de suprimento. A união dessas áreas (SCM e sistemas multiagentes normativos) aumenta as possibilidades de modelagem de cadeias de suprimento, permitindo a inclusão de entidades externas que normalmente exercem influência na gestão, tais como órgãos do governo, agências reguladoras e instituições eletrônicas. A modelagem da cadeia do biodiesel é apresentada como estudo de caso; os principais resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: simulação, sistemas multiagentes, gestão de cadeias de suprimento.

ABSTRACT

The supply chain is a network of suppliers, factories, warehouses, distribution centers, and retailers through which raw materials are acquired, transformed, and delivered to customers. Supply-chain management (SCM) is the strategic, tactical, and operational decision making that optimizes supply-chain performance. Modeling supply chain is a good way of studying order fulfillment processes and investigating the effectiveness of management policies. Multiagent models are increasingly being used for this purpose. A multiagent model fits well with the task of simulating supply chain because the businesses involved can be modeled as agents, each with its own inventory rules. It is also easy to model the flow of products down the chain and the flow of information, such as order volumes and lead times, from one organization to another. The analysis of the relevant literature shows that most research works carried out in this area aim to resolve specific problems. Some methodologies and more generic solutions have been proposed, but without considering normative agents which may interfere in the behaviour of actors of the supply chain. This work aims to contribute with the state of the art in the SCM area as follows: (1) building a simulation model to the supply chain context, providing generic agents which may be easily extended and used in other application contexts, and (2) exploiting normative agents in the context of supply chain modeling. The integration of these areas (SCM and normative multi-agent systems) increases the possibilities of supply chain modeling, allowing the inclusion of external entities which normally influence management, such as governmental organizations, regulating agencies and electronic institutions, to give some examples. The modeling of the biodiesel supply chain is presented as a case study; the main results are presented and discussed.

Keywords: simulation, multi-agent system, supply chain modeling

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos agentes fornecedores	105
Tabela 2 – Custo de fornecimento de óleo	105
Tabela 3 – Parâmetros dos agentes fabricantes	107
Tabela 4 – Parâmetros dos agentes clientes	108
Tabela 5 – Teste T para custo de produção de biodiesel	113
Tabela 6 – Demanda por matéria-prima (experimento 1)	114
Tabela 7 – Demanda por matéria-prima (experimento 2)	119
Tabela 8 – Demanda por matéria-prima (experimento 3)	123
Tabela 9 – Tributos sobre a produção de Biodiesel	156
Tabela 10 – Resumo dos Leilões da ANP para compra de Biodiesel	163
Tabela 11 – Produção de matéria-prima – Safra 2000 a 2008/09	166
Tabela 12 – Abate bovino – outubro de 2006 a setembro de 2008	167
Tabela 13 – Estimativa de descarte de óleo de cozinha	168
Tabela 14 – Área média dos estabelecimentos agropecuários	170

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de rede de cadeia de suprimentos	25
Quadro 1 – Forma tradicional de gerenciamento da cadeia e SCM	30
Figura 2 – Tipos de medida de desempenho	33
Figura 3 – Modelos para Cadeia de Suprimentos	35
Quadro 2 – Usos da simulação	37
Figura 4 – Um agente e seu ambiente	39
Figura 5 – Simulação social baseada em agentes	43
Figura 6 – Processo metodológico de modelagem	63
Figura 7 – Arquitetura de um agente normativo	71
Figura 8 – Tipos de agentes em um NMAS	72
Quadro 3 – Exemplo de instâncias normas	73
Figura 9 – Modelo de cadeia de suprimento de Jay Forrester	74
Figura 10 – Hierarquia de agentes do modelo de simulação	76
Figura 11 – Diagrama de atividades do agente NormativeAgent	77
Figura 12 – Diagrama de atividades do agente LegislatorAgent	78
Figura 13 – Diagrama de atividades do agente RegulatorAgent	79
Figura 14 – Inventory – atributos e operações	79
Figura 15 – Diagrama de atividades do agente Inventory	82
Figura 16 – SCMAgent – atributos e operações	83
Figura 17 – Customer – atributos e operações	84
Figura 18 – Diagrama de atividades do agente customer	85
Figura 19 – Manufacturer – atributos e operações	86
Figura 20 – Diagrama de atividades do agente Manufacturer	87
Figura 21 – Supplier – atributos e operações	90
Figura 22 – Diagrama de atividades do agente Supplier	91
Figura 23 – DistributionCenter– atributos e operações	92
Figura 24 – Atributos da Classe Message	93
Figura 25 – Fluxograma do processo de produção do biodiesel	97

Figura 26 – Funcionamento básico da cadeia do Biodiesel	98
Figura 27– Modelo baseado em agentes para a cadeia do Biodiesel	102
Figura 28 – Ciclo básico do modelo de agentes proposto	104
Figura 29 – Exemplo de configuração de cadeia sem uso de normas	109
Quadro 4 – Normas para experimentos	110
Quadro 5 – Agentes alvos e beneficiários e alvos das normas	111
Figura 30 – Configuração da cadeia para primeiro experimento	112
Gráfico 1 – Evolução do custo de produção do biodiesel	113
Gráfico 2 – Produtividade de biodiesel nas usinas	114
Gráfico 3 – Demanda por matéria-prima	115
Gráfico 4 – Produtividade de biodiesel nas usinas	116
Gráfico 5 – Custo de produção de biodiesel com impostos	117
Figura 31 – Configuração da cadeia para segundo experimento	118
Gráfico 6 – Evolução do custo de produção do biodiesel	118
Gráfico 7 – Demanda por matéria-prima	119
Figura 32 – Configuração da cadeia para terceiro experimento	120
Gráfico 8 – Demanda por matéria-prima	121
Gráfico 9 – Evolução da produção de biodiesel	124
Figura 33 – Arquitetura de agente para cadeia de suprimento	146
Figura 34 – Componentes de uma cadeia de suprimento	147
Figura 35 – Exemplo de uso do método step	150
Figura 36 – Classe MyFirstRepastModel	151
Figura 37 – Visualização dos resultados com Repast	152
Figura 38 – Controle da simulação	153
Figura 39 – Percentuais de mistura do Biodiesel ao Diesel	154
Figura 40 – Evolução da indústria de Biodiesel no Brasil	158
Gráfico 10 – Evolução da produção de Biodiesel no RS	159
Gráfico 11 – Relação capacidade autorizada/produção de Biodiesel no RS	160
Gráfico 12 – Matérias-primas utilizadas para produção de Biodiesel	160
Gráfico 13 – Tipo de álcool utilizado na produção de Biodiesel	161
Quadro 6 – Produção europeia de biodiesel em 2008	164
Gráfico 14 – Evolução da produção americana de biodiesel	164
Quadro 7 - Potencialidade de oleaginosas brasileiras por região geográfica	166

Gráfico 15 – Evolução da cotação do óleo de soja e girassol	171
Gráfico 16 – Evolução da cotação do sebo bovino	172
Gráfico 17 – Evolução da cotação da soja e girassol	173
Gráfico 18 – Evolução da cotação do metanol e do etanol	174

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ABSS	Agent-Based Social Simulation
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONST	Distribuição Constante
EXPO	Distribuição Exponencial
Ha	Hectares
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
MABS	Multi Agent Based Simulation
MAPA	Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDA	Ministério de Desenvolvimento Agrário
MME	Ministério de Minas e Energia
NORM	Distribuição Normal
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
SAAS	Social Aspects of Agent Systems
SCM	Supply Chain Management
SINDICOM	Sindicato dos Distribuidores de Combustíveis
<i>t</i>	Tonelada
TRIA	Distribuição Triangular
UNIF	Distribuição Uniforme
VBP	Valor Bruto da Produção agropecuária nacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2 OBJETIVOS	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS	23
2.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO EM UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS	29
2.3 MEDIDAS DE DESEMPENHO	31
2.4 MODELAGEM DE CADEIAS DE SUPRIMENTO	34
2.5 SISTEMAS MULTIAGENTES	38
2.5.1 Definição de agente	38
2.5.2 Arquitetura de agentes	40
2.5.3 Simulação baseada em agentes	42
3 REVISÃO DE LITERATURA	45
3.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO	45
3.2 MODELOS DE SIMULAÇÃO BASEADO EM AGENTES	52
3.3 LACUNAS PARA NOVOS ESTUDOS	57
4 METODOLOGIA DE PESQUISA	61
5 MODELO DE SIMULAÇÃO PARA CADEIAS DE SUPRIMENTO	69
5.1 SISTEMAS MULTI-AGENTES NORMATIVO	69
5.2 MODELO CONCEITUAL DE CADEIA DE SUPRIMENTO	73
5.3 MODELAGEM DOS AGENTES	75
5.3.1 NormativeAgent	76
5.3.2 LegislatorAgent	77

5.3.3 RegulatorAgent	78
5.3.4 Inventory	79
5.3.5 SCMAgent	82
5.3.6 Customer	84
5.3.7 Manufacturer	85
5.3.8 Supplier	89
5.3.9 DistributionCenter	91
5.3.10 Comunicação entre os agentes	92
6 MODELAGEM DA CADEIA DO BIODIESEL	95
6.1 SUMÁRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO BIODIESEL	95
6.2 MODELO BASEADO EM AGENTES PARA A CADEIA DO BIODIESEL	101
6.3 PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	104
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	108
6.4.1 Resultados do primeiro experimento	112
6.4.2 Resultados do segundo experimento	117
6.4.3 Resultados do terceiro experimento	120
6.5 POTENCIALIDADES DO MODELO	124
CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
REFERÊNCIAS	131
ANEXO A – FRAMEWORK PARA AVALIAR CADEIAS DE SUPRIMENTO	142
ANEXO B – ARQUITETURA PARA MODELAGEM DE AGENTES	143
ANEXO C – REPAST	148
ANEXO D – COMPILAÇÃO DOS DADOS PARA EXPERIMENTOS	154
ANEXO E – DIAGRAMA ENTIDADE-RELACIONAMENTO	177
ANEXO F – PUBLICAÇÕES DO ALUNO COM O ORIENTADOR	178

1 INTRODUÇÃO

Uma cadeia de suprimentos é constituída por fornecedores, centros de produção, depósitos, centros de distribuição e varejistas, por matéria-prima, estoque de produtos em processos e produtos acabados que circulam entre os elos da cadeia. O conceito de gestão da cadeia de suprimentos está relacionado a um conjunto de abordagens utilizadas para integrar e gerenciar eficientemente todos estes elementos de forma que qualquer produto seja produzido e distribuído na quantidade certa, para a localização certa e no tempo certo, de forma a minimizar os custos globais do sistema ao mesmo tempo em que atinge o nível de serviço desejado (SIMCHI-LEVI *et. al.*, 2003).

A modelagem de cadeias de suprimentos é um assunto de interesse crescente entre acadêmicos (SABRI e BEAMON, 2000). Sob o ponto de vista dos problemas a serem resolvidos, os modelos desenvolvidos para esta área podem ser divididos em três níveis: estratégico, tático e operacional. O principal objetivo dos modelos para o nível estratégico é determinar o melhor custo efetivo para localização de facilidades, estimar fluxo de mercadorias, atribuir clientes ou mercados a centros de distribuição e planejar a demanda. O principal objetivo dos modelos do nível tático é determinar níveis de estoques seguros para cada produto em cada localização, coordenar a produção e distribuição, controlar prazos e entrega, além de avaliar níveis de serviço. Já os modelos do nível operacional são destinados para alocação de trabalhadores, roteamento e escalonamento de veículos, entre outros.

Para abranger essa grande diversidade de problemas, diferentes estratégias de modelagem têm sido utilizadas: programação linear, Sabri e Beamon (2000), por exemplo; simulação discreta, Ng *et al.* (2003), por exemplo; dinâmica de sistemas, Lai *et al.* (2003), por exemplo; otimização em conjunto com simulação, Lim *et al.*

(2006), por exemplo; e, simulação baseada em agentes, Cavalieri *et al.* (2003), por exemplo.

Dentre estas alternativas, a simulação se apresenta como uma técnica muito oportuna de ser utilizada por acontecer em um ambiente controlado, onde os experimentos podem ser repetidos várias vezes sem prejuízo aos atores da cadeia. Além disso, permite comparar diferentes alternativas, analisar cenários futuros, analisar os efeitos de mudanças de políticas econômicas e sociais, modelar relações lineares e não-lineares (relação entre custos e nível de serviço, por exemplo), modelar fenômenos estocásticos e permitir a análise de desempenho sob situações de incertezas (demanda, prazos, sazonalidades de produção, entre outras).

A simulação baseada em agentes, para ser mais específico, tem como idéia principal o fato que muitos fenômenos, normalmente de natureza complexa, podem ser mais bem entendidos como um sistema de agentes autônomos, pois eles são de concepção relativamente simples e seguem regras também relativamente simples quando precisam interagir com outros agentes do seu ambiente. Além disso, está interessada não somente no projeto e entendimento de agentes artificiais, mas também na modelagem do comportamento humano social e na tomada de decisão individual. Dessa forma, torna-se necessário representar interações sociais, comportamento de grupos, colaboração e a emergência de estruturas sociais (SAMUELSON e MACAL, 2006).

A utilização de simulação baseada em agentes para o estudo de cadeias de suprimento torna-se uma alternativa natural no momento em que se procura aproximar esses dois conceitos. Uma cadeia de suprimentos também pode ser definida como “uma rede de entidades de negócios autônomas ou semi-autônomas responsáveis coletivamente pelas atividades de aquisição, produção e distribuição associadas com uma ou mais famílias de produtos” (SWAMINATHAN *et al.*, 1998). Gilbert (2008, p. 11) corrobora com essa idéia ao afirmar que modelos baseados em agentes são bastante apropriados para modelar cadeias de suprimento, pois cada negócio ou processo que faz parte de uma cadeia pode ser modelado como um agente, cada um tendo suas próprias regras de tomada de decisão. Além da

facilidade de modelar fluxo de produtos e informações, tais como pedidos, quantidades, atrasos entre os atores da cadeia.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A revisão de literatura conduzida ao longo da elaboração deste trabalho (ver seção 3.3) mostrou algumas lacunas que podem ser melhor exploradas em trabalhos futuros, entre as quais estão as seguintes: (1) a maioria das pesquisas estão direcionadas para resolver problemas específicos, voltados para uma determinada empresa ou cadeia, com exceção dos trabalhos de Swaminathan *et al.* (1998), Sadeh *et al.* (1999), Julka *et al.* (2002), Fox *et al.* (2000), Chatfield *et al.* (2007), Govindu e Chinnann (2007); e, (2) os modelos não consideram a idéia de ter agentes reguladores participando das simulações.

Um primeiro importante avanço da literatura da área passa a ser, portanto, a proposição de um modelo de simulação que possa ser facilmente modificado, estendido e reutilizado em diferentes situações, ou seja, um modelo formado por um conjunto de classes abstratas e concretas, com potencial de especialização.

A importância do desenvolvimento de modelos de simulação dessa natureza e, em especial, para a área de simulação de cadeias de suprimento, pode ser mais bem entendida quando se recorre a Pidd (1998). O autor explica que em primeiro lugar, os modelos desenvolvidos para as ciências administrativas devem ser simples de entender, pois são construídos para ajudar pessoas e organizações a tornarem-se mais efetivas nas suas atividades. Isso significa que seus resultados precisam ser utilizados e isto requer confiança por parte dos usuários. A confiança é mais fácil de ser atingida quando o trabalho global do modelo pode ser compreendido.

Em segundo lugar, mas bastante relacionado ao primeiro, está a importância da utilização do “Princípio da Parcimônia” durante a construção de modelos, ou seja, os modelos deveriam, idealmente, ser desenvolvidos gradualmente, começando com considerações simples e adicionando complicações à medida que elas se tornarem necessárias. A intenção é aprender o que se pode explorar a partir deste simples modelo e então refiná-lo gradativamente, sempre que necessário.

Em terceiro lugar, o autor explica a vantagem da abordagem “dividir e conquistar”, também chamada de decomposição por alguns autores, afirma que modelos grandes são difíceis de validar, de interpretar, calibrar estatisticamente e, mais importante, de explicar. Além disso, afirma que pode-se fazer modelos melhores, não com grandes modelos, mas com um conjunto de modelos mais simples.

Por outro lado, partindo do pressuposto que muitas cadeias estão inseridas em ambientes regulados, outro importante avanço na literatura da área e importante problema de modelagem a resolver, é a introdução de um novo agente (ou grupo de agentes), externo, com o propósito de regular o comportamento da cadeia de suprimento e seus atores, propondo leis, normas, restrições, indicadores, definindo taxas, autorizando ou desautorizando agentes que se mostrarem ineficientes ou mal-intencionados.

Nesse caso, surge a necessidade de estudo dos Sistemas Multiagentes Normativos, os quais podem ser definidos como a intersecção entre sistemas normativos e sistemas multiagentes (BOELLA *et al.* , 2006). A integração dessas áreas (SCM e sistemas multiagentes normativos) aumenta as possibilidades de modelagem de cadeias de suprimento, permitindo a inclusão de entidades externas que normalmente exercem influência na gestão.

Portanto, a questão fundamental de pesquisa que guiou a condução desse trabalho é: *como construir um modelo de simulação para o contexto de cadeias de suprimento seguindo a idéia de agentes normativos?*

1.2 OBJETIVOS

Essa seção apresenta o objetivo geral e específico com o propósito de delimitar o escopo do trabalho e as atividades que serão realizadas. O objetivo geral é construir um modelo de simulação voltado para o contexto de gestão de cadeias de suprimento utilizando as idéias da área de sistemas multiagentes normativos. A idéia é propor um conjunto de agentes genéricos que podem ser facilmente entendidos, ampliados e re-utilizados em diferentes contextos de aplicação. Especificamente, o modelo deve oferecer possibilidades para planejamento da

demanda, gerenciamento de estoques, seleção de fornecedores, além de avaliar normatizações propostas por agentes externos.

Dessa forma, procura-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar diferentes abordagens para modelar cadeias de suprimento;
- b) Avaliar ambientes para modelagem dos agentes;
- c) Propor um modelo para compor os conceitos de gestão de cadeias de suprimento com agentes normativos;
- d) Implementar computacionalmente o modelo de simulação proposto utilizando uma linguagem de programação orientada a objetos;
- e) Realizar experimentos com o modelo proposto, buscando validá-lo e utilizando, como, estudo de caso, a cadeia do Biodiesel. Em particular, estudar diferentes alternativas de configuração de cadeia, considerando as especificidades de produção de matérias-primas do estado do Rio Grande do Sul e os coeficientes tecnológicos de produção de uma usina produtora de biodiesel que está se instalando no noroeste gaúcho;

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

A seqüência desse trabalho está organizada da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta o referencial teórico e as variáveis de decisão e medidas de desempenho sobre cadeias de suprimento. Além dos conceitos básicos sobre agentes de software e simulação baseada em agentes;
- O capítulo 3 apresenta a análise realizada sobre os trabalhos prévios de modelagem de cadeias de suprimento, destacando o estado da arte da área e mostrando possíveis caminhos para novas pesquisas;
- O capítulo 4 apresenta o método de pesquisa adotado;
- O capítulo 5 apresenta os modelos conceituais básicos para a construção do modelo de simulação proposto, tanto em relação a sistemas multiagentes

normativos quanto em relação à cadeia de suprimentos. Em seguida, apresenta em detalhes a definição dos agentes que fazem parte do modelo, bem como, a forma como trocam mensagens para realizar suas atividades;

- O capítulo 6 inicia apresentando um sumário sobre o contexto para realização dos experimentos. A cadeia de suprimentos do Biodiesel foi escolhida por ser bastante apropriada para demonstrar a necessidade de modelar cadeias utilizando agentes normativos, pois recebe influência e é alvo de normatizações de órgãos do governo e de agências reguladoras da produção de combustíveis. Além de toda importância econômica, social e ambiental do projeto de introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Após, apresenta-se a modelagem da cadeia do biodiesel com a utilização do modelo proposto, os dados de entrada para as simulações e os resultados experimentais com o modelo;
- Por fim, o capítulo 7 está reservado para as conclusões, as considerações finais e os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais conceitos que embasaram o desenvolvimento deste trabalho, em especial, conceitos relacionados à gestão de cadeias de suprimento, tipologia de modelos para cadeias de suprimento, medidas para avaliação de desempenho e sistemas multiagentes, os quais são detalhados nas seções seguintes.

2.1 GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS

No início do século XX Henry Ford desenvolveu inovações em produto e processo para possibilitar o aumento do volume de produção e reduzir o custo dos automóveis. Estas inovações resultaram em um novo paradigma produtivo. As idéias principais desse novo paradigma eram: produção em larga escala; padronização dos veículos; especialização dos trabalhadores; concentração da indústria norte-americana em poucas empresas; e, integração vertical dos fabricantes de automóveis. Passou-se a produzir grande parte das peças e componentes utilizados nos veículos para coordenar todo o processo produtivo, diminuir custos e evitar a dependência aos fabricantes de peças e componentes. Como se sabe, esse modelo apresentou uma série de deficiências, entre as quais: a limitação do progresso tecnológico; a oferta de uma pequena variedade de produtos aos consumidores; e, a insatisfação dos trabalhadores em função do trabalho repetitivo (WOMACK *et al.*, 1992).

No outro lado do mundo, as empresas japonesas encontraram dificuldades ao tentar adotar esse modelo e passaram a trabalhar numa nova proposta de produção que objetivava diversificar a oferta de produtos e aumentar sua qualidade, mantendo os preços reduzidos. Destacou-se, então, uma nova forma de suprimentos de peças e componentes para a montagem dos veículos que envolveram a desverticalização

da produção, diminuição e hierarquização dos fornecedores, localização próxima à montadora, negócios repetidos com os mesmos fornecedores e desenvolvimento conjunto de novos projetos entre clientes e fornecedores. O desenvolvimento destes princípios resultou em uma nova forma de organização da cadeia produtiva, mais integrada do que a do fordismo.

A desverticalização da produção possibilitou a divisão de responsabilidades, de custos, a cooperação, a soma das competências individuais para aprimorar processos de inovação e a troca de informações necessária à integração e à sincronização da cadeia de suprimentos (AMBROS, 2000). De acordo com Vrijhoef e Koskela (2000), esses foram os primeiros sinais visíveis de SCM (do inglês *Supply Chain Management*), como parte do Sistema Toyota de Produção.

Após a desverticalização, aparece a necessidade de formar alianças estratégicas entre empresas com interesses de mercado em comum e, assim, surge o conceito de Cadeia de Suprimentos, definida como uma rede de entidades de negócio, parcialmente ou totalmente autônomas, coletivamente responsáveis por atividades de suprimentos, manufatura, distribuição e marketing de produtos (OLIVEIRA e CARVALHO, 2004).

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma cadeia de suprimentos, onde pode-se distinguir três partes: cadeia de suprimentos *upstream*; a cadeia de suprimentos interna; e a cadeia de suprimentos *downstream*. A cadeia de suprimentos *upstream* é composta pelos elementos do lado esquerdo da Figura 1, representando os fornecedores de primeira camada (ou primeiro nível) da empresa, os quais também podem ser fabricantes e/ou montadores e seus fornecedores próprios. Essa relação pode ser ampliada para a esquerda, em diversas camadas, até a origem do material, representados na Figura 1 pelos fornecedores de matéria prima.

A cadeia de suprimentos interna, representada pelos elementos da parte central da Figura 1, inclui todos os processos usados por uma empresa para transformar as matérias primas recebidas dos fornecedores nos produtos finais, desde o momento em que os materiais entram na empresa até o momento em que os produtos saem para a distribuição fora da empresa.

A cadeia de suprimentos *downstream* é o segmento que inclui os processos envolvidos na entrega do produto ao consumidor final, composto pelos elementos do lado direito da Figura 1. Vista de maneira muito ampla, a cadeia de suprimentos na verdade termina quando o produto chega ao local onde é descartado, depois de ter sido utilizado, voltando para algum ponto da natureza.

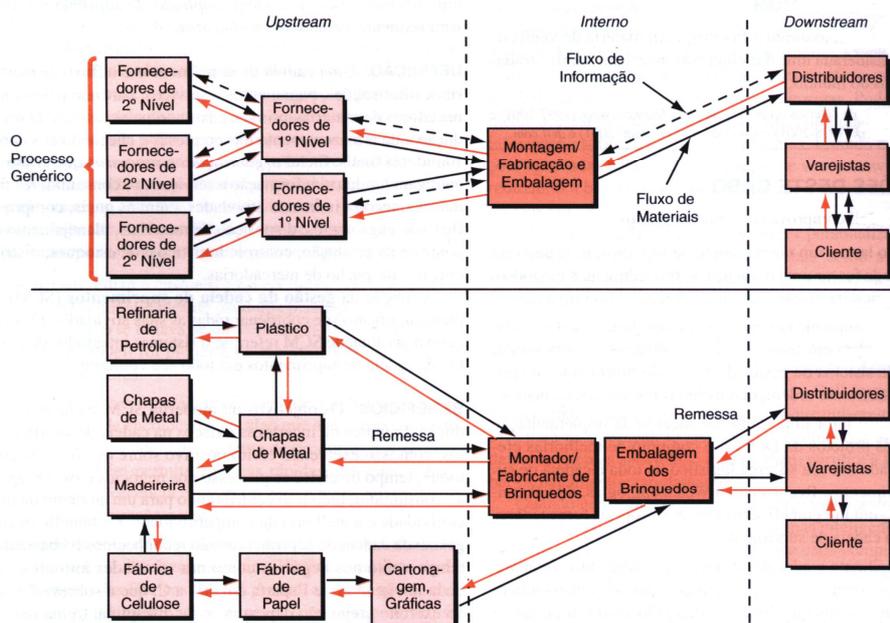


Figura 1 - Exemplo de rede de cadeia de suprimentos

Fonte: Turban *et al.* (2004, p. 216)

De um modo geral, cada organização que faz parte da cadeia de suprimentos, quer seja o fornecedor de nível, quer seja o distribuidor, quer seja a empresa que produzirá o bem final, precisa tomar algumas decisões individualmente ou coletivamente, no que diz respeito às suas ações em cinco áreas (HUGOS, 2003):

- 1) Produção: Quais produtos o mercado quer? Qual a quantidade de cada produto deverá ser produzida e em que momento? Esta atividade inclui a criação de uma programação global de produção que leve em conta as capacidades das plantas de produção, balanceamento da quantidade de trabalho a ser realizado, controle de qualidade e manutenção de equipamento;

- 2) Estoque: o que deverá ser armazenado em cada estágio de uma cadeia de suprimentos? Qual a quantidade de matérias-primas, bens semifinalizados e finalizados que devem ser mantidos? O objetivo principal do estoque é minimizar os efeitos das incertezas em uma cadeia de suprimentos, não se pode manter níveis elevados de estoque por questões de ordem financeira, dessa forma, um dos pontos cruciais a serem determinados nesse aspecto são os níveis ótimos de estoques e os pontos de reabastecimento de cada produto;
- 3) Localização: Onde as fábricas de produção e os depósitos de estoques deverão ser localizados? Onde estão os custos mais eficientes para os locais de produção e de armazenamento de estoque? Utilizar fábricas existentes ou construir novas? Uma vez que estas decisões tenham sido tomadas elas determinarão os possíveis caminhos para que o produto possa ser encaminhado até o consumidor final;
- 4) Transporte: Como transportar produtos e matérias-primas de um local para outro na cadeia de suprimentos? Transporte aéreo e a entrega através de caminhões são geralmente rápidos e confiáveis, entretanto são caros. Transportar pelo mar ou por ferrovias é mais barato, mas normalmente envolve maior tempo em trânsito e maiores incertezas. Estas incertezas precisam ser compensadas pelo armazenamento de maiores níveis de estoques. Qual é o melhor meio de transporte a ser utilizado?;
- 5) Informação: Quais dados devem ser coletados e quais informações deverão ser compartilhadas? Informação rápida e precisa detém a promessa de melhor coordenação e melhores tomadas de decisões. Com boa informação, os responsáveis podem tomar decisões efetivas sobre o que produzir e quanto, sobre onde localizar o estoque e como efetuar o transporte do mesmo.

A partir dessa introdução que buscou trazer as origens da desverticalização da produção e associá-la com o conceito de cadeia de suprimento, pode-se citar

alguns dos motivos que estão levando as empresas a optar por esse modo de produção. Simchi-Levi *et al.* (2003), por exemplo, cita as seguintes motivações:

- Concentrar atividades e recursos em determinadas atividades específicas, notadamente aquelas que representam diferenciais competitivos para a empresa. Hugos (2003) afirma que dessa forma cada empresa pode concentrar forças nas suas *core competences*, associando-se a empresas parceiras com capacidades complementares para produzir e entregar produtos ao mercado consumidor;
- Possibilidade de comprar subconjuntos montados, ao invés de itens específicos. Os setores automotivos e de informática são exemplos de grupos de produtos que apresentam valores agregados superiores ao simples somatório dos itens individuais;
- Ganhos de produtividade;
- Desenvolvimento de produtos com ciclo de vida mais curto;

Martins (2000) destaca ainda a competição globalizada, exigindo que as empresas estejam constantemente revendo seus negócios, seus critérios qualificadores para competir ou, até mesmo, avaliando a configuração de suas atividades produtivas; além do aumento das expectativas dos consumidores que estão sempre buscando diferentes produtos com maiores níveis de qualidade e procurando preços cada vez mais acessíveis. Manzini *et al.* (2005) acrescenta também a necessidade do desenvolvimento crescente de produtos inovadores e diferenciados, além de citar a importância da redução dos prazos de entrega.

Portanto, pode-se perceber que se por um lado torna-se inevitável a atuação em cadeias de suprimentos diante do novo cenário competitivo que hora se estabelece, por outro, a gestão torna-se mais complexa. Nesse sentido, deixa-se de se pensar em indicadores e objetivos individuais para se pensar em indicadores e objetivos macros, conforme explica Simchi-Levi *et al.* (2003):

- As possibilidades de redução de custos pela melhoria das operações passam, crescentemente, a se situar além das fronteiras de cada empresa individual;
- A coordenação e sincronização dos fluxos de materiais deixam de ter sentido apenas dentro de cada empresa e passa a se referir à cadeia como um todo;
- Os ganhos de produtividade também ultrapassam os limites da empresa, envolvendo desde a extração de matérias-primas até a entrega dos produtos finais aos consumidores;
- Desenvolvimento e consolidação de uma visão global para o entendimento, gestão e operação dos sistemas de operações, que supera a idéia de otimização ou melhoria local (em cada máquina, em cada posto de trabalho ou cada empresa isolada).

Além disso, de acordo com Towil (1996) a gestão de uma cadeia de suprimento torna-se complexa em função da incerteza associada com a demanda percebida pelos produtos, com a qualidade das informações e com o atraso associado com a transmissão de materiais e informações. A amplificação da demanda é também citada com um dos principais problemas a gerenciar nesse contexto.

Dessa forma, segundo Wood Jr. e Zuffo (1998) torna-se necessário alinhar todas as atividades de produção de forma sincronizada, visando reduzir os custos, minimizar ciclos e maximizar o valor percebido pelo cliente final por meio do rompimento das barreiras entre departamentos e áreas. Os autores acrescentam que não basta um dado fabricante ter buscando a excelência operacional se os distribuidores continuarem operando em condições precárias. Diante do consumidor final, o produto e/ou serviço, será penalizado pela ineficiência sistêmica da cadeia.

Desse modo, a SCM passou a ter conteúdo estratégico para os fornecedores de produtos finais. Esta mudança no relacionamento entre os elementos da cadeia

para que houvesse aumento da competitividade da cadeia produtiva, de uma forma global, exigiu inovação no modo de coordenação da empresa com seus fornecedores. O Quadro 1 ilustra as principais diferenças entre o sistema tradicional de administração da cadeia de suprimentos em relação à SCM.

2.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO EM UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS

As decisões no contexto de cadeia de suprimentos estão classificadas segundo considerações temporais e funcionais. De acordo com o tempo e com o horizonte, as decisões podem ser divididas em três categorias: estratégicas (longo prazo), táticas (médio prazo) e operacionais (curto prazo e tempo real). Funcionalmente, há quatro grandes áreas de decisão em uma cadeia de suprimentos: planejamento, produção, distribuição e logística (BISWAS e NARAHARI, 2004).

As decisões de nível estratégico envolvem decisões de localização, alocação, planejamento da demanda, planejamento dos canais de distribuição, seleção de fornecedores e estruturação da rede. As decisões de nível tático envolvem controle dos níveis de estoque, coordenação da distribuição e produção, seleção de equipamentos de decisões de *layout*. As decisões de nível operacional envolvem roteamento e escalonamento de veículos, alocação de trabalhadores, entre outros.

Elemento	Gerenciamento Tradicional	SCM
Gestão de Estoque	Esforços independentes	Redução conjunto do estoque no canal
Abordagem quanto ao custo total	Redução de custo da própria empresa	Eficiência de custos em todo canal
Horizonte de tempo	Curto prazo	Longo prazo
Quantidade de informação trocada e monitorada	Limitada às necessidades da transação	Como requerido para planejamento e monitoramento do processo
Quantidade de coordenação dos vários níveis no canal	Contato único para transação entre pares do canal	Múltiplos contatos entre nível da firma e nível do canal
Planejamento conjunto	Foco na transação	Contínuo

Compatibilidade das filosofias corporativas	Não relevante	Compatibilidade ao menos nos relacionamento-chave
Extensão da base de fornecedores	Larga para aumentar a competição e distribuir o risco	Pequena para aumentar coordenação
Canal de comunicação com a liderança	Não necessário	Necessária para coordenação do foco
Quantidade do compartilhamento do risco e recompensa	Realizado separadamente	Riscos e recompensas compartilhados em longo prazo
Velocidade das operações, informações e nível de estoque	Lógica de Armazém (armazenamento, estoque de segurança)	Lógico de Centro de Distribuição, JIT, respostas rápidas

Quadro 1 – Forma tradicional de gerenciamento da cadeia e SCM

Fonte: Vrijhoef e Koskela (2000, p. 170)

Dessa forma, pode-se identificar as seguintes variáveis de decisão para uma cadeia de suprimentos (BEAMON, 1998; MIN e ZHOU, 2002):

1. Localização: esse tipo de variável envolve determinar onde plantas, depósitos ou centros de distribuição, pontos de consolidação e fornecedores serão localizados;
2. Alocação: esse tipo de variável determina quais armazéns, plantas e pontos de consolidação atenderão quais clientes, segmentos de mercado e fornecedores;
3. Estrutura da rede: esse tipo de variável envolve centralização ou descentralização da distribuição e determina quais combinações de fornecedores, plantas, depósitos e pontos de consolidação devem ser utilizados;
4. Número de facilidades e equipamentos: esse tipo de variável determina quantas plantas, depósitos e pontos de consolidação são necessários para atender a demanda dos clientes e segmentos de mercado. Além de determinar os recursos necessários para operação de cada ponto avaliado;
5. Número de estágios da cadeia;

6. Seqüência de atendimento: determinar rotas de entrega, recolhimento e escalonamento de veículos para o atendimento de clientes ou fornecedores;
7. Volume: determina o volume ótimo de compra, produção e transporte de cada nodo da cadeia de suprimentos;
8. Níveis de estoque em cada estágio da cadeia de suprimento;
9. Número de trabalhadores;

2.3 MEDIDAS DE DESEMPENHO

O estabelecimento de medidas apropriadas de desempenho é um componente muito importante do projeto e análise de cadeias de suprimento. Medidas de desempenho, também chamada de objetivos, são utilizadas, portanto, para determinar a eficiência e/ou efetividade de um sistema, podendo ser utilizada para fins de comparação de diferentes estratégias competitivas e para determinar qual valor das variáveis de decisão que produzem melhores resultados de desempenho. Beamon (1998), a partir de uma análise de diversos trabalhos apresentados em revistas e congressos da área de Pesquisa Operacional, sumarizou as medidas de desempenho comumente utilizadas nos estudos sobre cadeia de suprimentos, agrupando tais medidas em qualitativas e quantitativas, conforme descrito a seguir.

Medidas de desempenho qualitativas são algumas vezes subjetivas e mais difíceis de serem medidas diretamente, tais como satisfação do consumidor, flexibilidade, ou seja, o grau com que a cadeia de suprimentos responde a flutuações no padrão de demanda, integração de informação e fluxo de materiais, gerenciamento de riscos e desempenho dos fornecedores no que diz respeito às condições e prazos de entrega.

Já as medidas de desempenho quantitativas são aquelas que podem ser expressas numericamente. Podem ser de duas categorias diferentes: (1) medidas

baseadas em custos; e (2) medidas baseadas na responsabilidade junto aos clientes (do inglês, *customer responsiveness*).

As medidas baseadas em custos envolvem: minimização de custos (envolve tanto a minimização de custos para a cadeia de suprimentos completa, como para unidades de negócios ou estágios); maximização de vendas; maximização de lucros; minimização dos níveis de estoque; e maximização do retorno de investimento.

As medidas baseadas na responsabilidade junto aos clientes envolvem: maximizar a taxa de entrega de pedidos atendidos dentro do prazo; minimizar o tempo de entrega de pedidos fora do prazo; minimizar o tempo de resposta a clientes; minimizar o tempo de produção; e minimizar funções duplicadas dentro da cadeia.

A mesma autora, porém em outro momento, ver Beamon (1999), apresenta um *framework*, conforme Figura 2, para seleção das medidas de desempenho de uma cadeia de suprimentos, justifica seu trabalho afirmando que a escolha dessas medidas são difíceis de serem feitas pela complexidade do sistema em questão, e afirma ainda, que uma medida de desempenho deve abranger todos os aspectos pertinentes a uma cadeia de suprimentos. Explica que medidas individuais são inadequadas por serem não inclusivas, ou seja, ignoram a interação entre características importantes das cadeias de suprimentos, além de ignorar aspectos relacionados aos objetivos estratégicos das organizações.

Dessa forma, Beamon (1999) sugere que um sistema de medida de desempenho de uma cadeia de suprimentos deve envolver três tipos de medidas: medidas de recursos (R), medidas de saída (O) e medidas de flexibilidade (F). Sugere também que se utilize ao menos uma medida individual de cada um dos três tipos e que as medidas escolhidas estejam de acordo com os objetivos estratégicos da organização. Assim, pode-se estudar o resultado da interação entre tais medidas, bem como, analisar, no mínimo, uma medida de desempenho de cada área. Cada tipo de medida será apresentada a seguir.

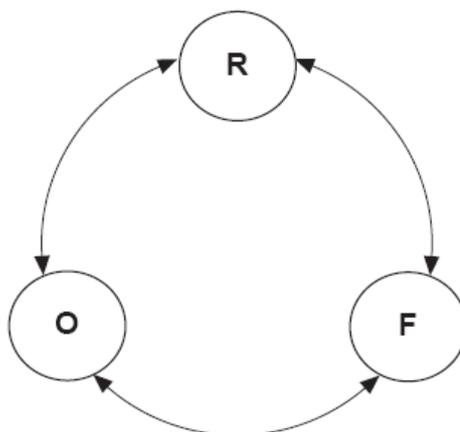


Figura 2 – Tipos de medida de desempenho

Fonte: Beamon (1999, p. 281)

Medidas relacionadas a Recursos compreendem níveis de estoque, necessidades de pessoal, utilização de equipamentos, uso de energia e custos. Em geral, procura-se minimizar os recursos na análise de cadeias de suprimento. A autora alerta para tomar cuidado com as implicações na Flexibilidade (F) e nos resultados de Saída (O) da cadeia.

Medidas relacionadas à Saída compreendem responsabilidade junto ao cliente, qualidade e quantidade do produto final produzido. Muitas dessas medidas são expressas numericamente, tais como, número de itens produzidos, tempo médio requerido para produzir um dado produto e número de entregas dentro do prazo. Entretanto, outras são mais difíceis de serem expressas numericamente, tais como a satisfação dos clientes e a qualidade dos produtos. Recursos (R) afetam a saída (O) de uma cadeia de suprimentos, do mesmo modo, a saída (O), qualidade e quantidade, é importante para determinar a Flexibilidade (F) de um sistema.

A medida Flexibilidade é utilizada para medir a habilidade da cadeia de suprimentos em se adequar a flutuações da demanda. É vital no sucesso de cadeia de suprimentos, pois permite a sobrevivência num ambiente de incertezas. Algumas vantagens obtidas com uma cadeia de suprimentos flexível são: aumento na satisfação dos consumidores; habilidade para acomodar variações na demanda, como em sazonalidades; habilidade para responder e acomodar períodos de baixa produtividade, ocorridos devido a problemas com máquinas e funcionários, por exemplo; habilidade para responder e acomodar períodos de baixa produtividade

dos fornecedores; habilidade para responder a demanda de novos produtos, mercados e a novos concorrentes. A Flexibilidade, segundo Beamon (1999), pode ser de quatro tipos:

- 1) Flexibilidade de volume: é a habilidade para alterar o nível (número e qualidade) dos produtos produzidos;
- 2) Flexibilidade de entrega: é a habilidade para se adequar às mudanças de datas de entrega;
- 3) Flexibilidade de *mix* de produtos: habilidade para alterar a variedade dos produtos produzidos;
- 4) Flexibilidade de produtos: habilidade para introduzir e produzir novos produtos;

Outro trabalho pertinente para o contexto de avaliação de desempenho de cadeias de suprimento foi apresentado por Gunasekaran e McGauey (2004). Os autores afirmam que o desenvolvimento de estudos voltados a medidas de desempenho e métricas para SCM têm recebido pouca atenção por parte dos pesquisadores. As medidas de desempenho apresentadas no estudo foram determinadas a partir de uma *survey* realizada em empresas britânicas considerando quatro atividades de uma cadeia de suprimentos e os níveis estratégico, tático e operacional, conforme apresentado no Anexo A.

2.4 MODELAGEM DE CADEIAS DE SUPRIMENTO

A modelagem de cadeias de suprimento vem sendo amplamente difundida na literatura da área de Pesquisa Operacional, uma das boas explicações para o interesse crescente por essa área é dado por Hung *et al.* (2006, p. 1065):

Uma vez que o custo de alterar estratégias de negócio ou políticas operacionais pode ser elevado, gestores podem minimizar o risco de cometer erros graves avaliando quantitativamente seus negócios e

visualizando o resultado de diferentes estratégias e políticas através de modelos de simulação.

Considerando a amplitude do conceito de cadeia de suprimentos, há inúmeras formas de categorizar os modelos de cadeia de suprimentos. Beamon (1998) e mais tarde Min e Zhou (2002) apresentam taxonomias bastante apropriada para classificar os modelos voltados para cadeias de suprimento. Os autores classificam os modelos em três categorias: modelos determinísticos; modelos estocásticos; e modelos híbridos. Min e Zhou (2002) utilizam uma quarta categoria chamada *IT-driven* em função do grande crescimento das tecnologias da informação voltadas para cadeias de suprimentos, tais como ERP, MRP, sistemas de informação geográfica, planejamento de distribuição de recursos, gerenciamento de transportes, entre outros. A Figura 3 apresenta a hierarquia entre os modelos.

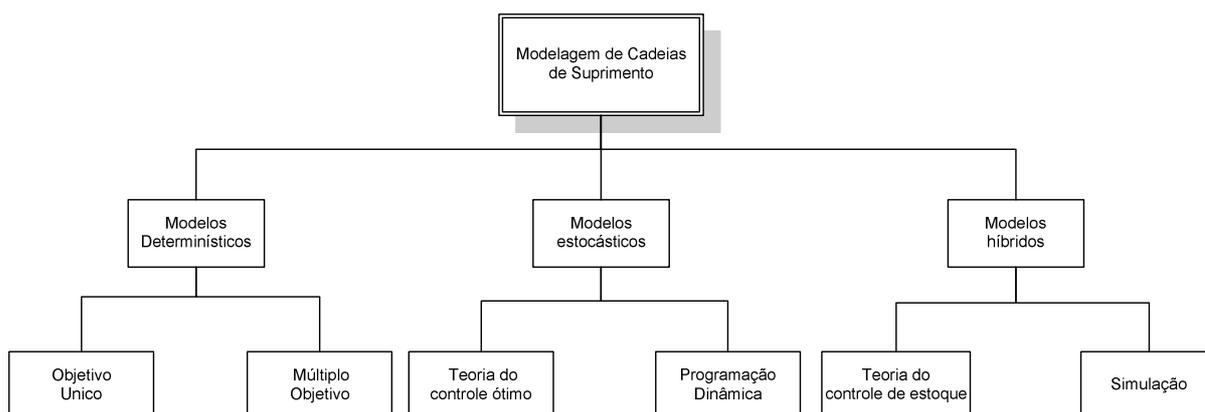


Figura 3 – Modelos para Cadeia de Suprimentos

Fonte: Min e Zhou (2002, p. 240)

Os modelos determinísticos assumem que todos os parâmetros para o modelo são conhecidos e fixos, ou seja, são aqueles em que para cada variável e parâmetro, pode-se associar um número definido fixo ou uma série de números fixos, para qualquer conjunto de condições. A sua solução fornece valores exatos da resposta. Os autores dividiram esses modelos em dois tipos, de objetivo único e múltiplo, procurando evidenciar a necessidade crescente de harmonizar conflitos de objetivos entre diferentes elementos constituintes de uma cadeia.

Os modelos determinísticos têm como objetivo obter soluções ótimas a partir de um espaço de soluções limitadas por restrições. A idéia principal é a de que

alguma medida de desempenho pode ser otimizada (o que significa maximizar ou minimizar). Nesses modelos, há uma função objetivo que deve ser otimizada sujeito a uma série de restrições. Estas restrições definem a solução espacial para a otimização, isto é, qualquer solução aceitável deve satisfazer às restrições que agem como fronteiras, definindo a área onde se concentram possíveis soluções.

De acordo com Pidd (1996), as idéias que sustentam os modelos de programação linear surgiram na economia e seu precursor foi George Dantzig, o primeiro Autor a sugerir o que hoje é conhecido como método simplex. Esse conceito de otimização baseia-se na escolha racional clássica, para a qual é possível a partir de um conjunto de alternativas escolher a melhor decisão por meio de um critério de utilidade. Entretanto, a busca pela solução ótima não é o único objetivo da utilização da programação linear, em algumas situações, será mais importante determinar o quanto este ótimo está sensível às mudanças nas hipóteses que sustentam o modelo.

Modelos dessa natureza são indicados quando a função objetivo possa ser expressa de forma linear e, assim como todos os demais modelos, pode ser utilizada para fins exploratórios, buscando investigar possíveis alternativas de ação. Como pode ser notado, a grande dificuldade de aplicação desses modelos está na otimização de custos não lineares e no tratamento de parâmetros estocásticos.

Os modelos estocásticos são aqueles que descrevem a dinâmica de um sistema em termos probabilísticos. Nos modelos estocásticos é introduzido o princípio da incerteza. As variáveis ou parâmetros usados para descrever as relações de entrada-saída não são conhecidos de modo preciso, desse modo, torna-se necessário recorrer a instrumentos estatísticos. O processo estocástico de Markov é um caso particular de processo estocástico, onde somente o valor atual de uma variável é relevante para se prever seu valor futuro. Os dados históricos desta variável e a maneira de como esta “emergiu” do passado são irrelevantes. A classificação apresentada por Min e Zhou (2002) exclui os modelos de análise de decisão e modelos de filas, pois, segundo os autores, a literatura indica que modelos para cadeia de suprimento raramente fazem uso dessa técnica.

Os modelos híbridos envolvem elementos tanto dos modelos determinísticos quanto dos estocásticos. A simulação é um exemplo desse tipo de modelo, entendida como um modelo que reflete as características centrais de um sistema, processo ou ambiente, real ou proposto. De acordo com Vicente (2005) a simulação pode ser utilizada para fins confirmatórios, para se buscar um modelo e para se realizar projeções. O tipo de uso é determinado pela existência (ou não) de dados empíricos e pela existência (ou não) de um modelo, conforme Quadro 2.

Existem dados empíricos ?	Sim	Não
Existe um modelo ?		
Sim	Confirmatório	Projeção
Não	Busca de um modelo	Sem uso possível

Quadro 2 – Usos da simulação

Fonte: Vicente (2005, p. 3)

O uso confirmatório se dá quando se dispõe de um modelo operacional e de dados empíricos, a simulação é utilizada para confirmar o modelo. Nessa categoria pode-se identificar o que se chama de contexto da prova e de contexto da descoberta. A busca de um modelo ocorre quando há disponibilidade de dados empíricos, mas ainda não se tem um modelo, portanto, o mesmo deverá ser criado e aprimorado através de sucessivos testes, umas das utilizações mais freqüentes da simulação. Na projeção, já se tem um modelo validado por dados anteriores e o objetivo é fazer uma previsão sobre acontecimentos futuros, baseando-se nos dados do presente. Esse é um dos principais motivos para que se desenvolvam simulações dentro de organizações, ou seja, possibilitar a realização de previsões sobre cenários futuros.

Independente do objetivo que se queira com a simulação suas principais vantagens são: (1) permitir antever problemas e gerar perguntas que não eram formuladas antes; (2) ocorrer em um ambiente controlado e fechado; e, (3) permitir a avaliação de uma grande quantidade de variáveis ao mesmo tempo.

Os modelos determinísticos e modelos de simulação são complementares, de acordo com Simchi-Levi *et al.* (2003), podendo, portanto, serem utilizados em

diferentes etapas do projeto da cadeia de suprimentos. De uma maneira geral, modelos determinísticos podem ser utilizados para selecionar configurações que otimizem determinada utilidade de interesse, as quais devem ser simuladas, a fim de que seu desempenho possa ser exaustivamente testado, antes de serem efetivamente implementadas. Desse modo, o desenvolvimento de modelos híbridos é uma importante alternativa para tratar com a complexidade tanto de modelagem quanto das decisões em cadeia de suprimentos.

2.5 SISTEMAS MULTIAGENTES

A Inteligência Artificial Distribuída (IAD) tornou-se nos últimos anos um domínio de pesquisa bastante promissor. Enquanto a Inteligência Artificial clássica usa como modelo de inteligência o comportamento individual humano, o modelo de inteligência em IAD é baseado no comportamento social. Uma abordagem deste tipo torna-se desejável para resolver problemas grandes e complexos, que requeiram conhecimento de vários domínios de conhecimentos distintos e que algumas vezes envolvam coleta de dados fisicamente distribuídos (ALVARES e SICHMAN, 1997).

2.5.1 Definição de agente

Ao procurar uma definição sobre o termo “agente” na literatura especializada da área, depara-se com diversos conceitos. Para o contexto desse trabalho julgou-se que as definições a seguir se mostram bastante apropriadas:

Um agente é um sistema computacional que está situado em algum ambiente e que é capaz de executar ações de maneira autônoma neste ambiente com o propósito de atingir seus objetivos (WOOLDRIDGE , 2002, p. 15).

Agentes são aplicações que podem operar com robustez, em ambientes que se modificam rapidamente e que necessitam de respostas precisas e rápidas a eventos que podem ser inesperados. Eles conseguem reagir rapidamente e possuem características que os permitem atuar em situações não programadas, além de possuir capacidade para interagir com outros, sejam humanos ou agentes. O comportamento flexível e racional é

alcançado através de processos-chave, resolução de problemas, planejamento, tomada de decisão e aprendizado (WEISS, 2000, p. 12).

A Figura 4 apresenta uma visão abstrata de um agente e seu ambiente. Cada agente possui um sensor de entrada que é utilizado para captar as características do ambiente onde está inserido, produzindo ações de saída que modificam seu ambiente. Em muitas situações o agente não terá controle completo sobre o ambiente, normalmente terá controle parcial, podendo influenciá-lo. Sob o ponto de vista do agente, isso significa que a mesma ação executada duas vezes pode produzir efeitos diferentes, desse modo, pode-se assumir que o ambiente é muitas vezes não-determinístico. Cada agente terá um conjunto de ações disponíveis para executar, porém cada ação tem um conjunto de pré-condições associadas, as quais definem as situações onde cada uma delas pode ser utilizada. A questão chave a ser decidida por um agente passa a ser, portanto, quais de suas ações devem ser executadas para melhor satisfazer seus objetivos.

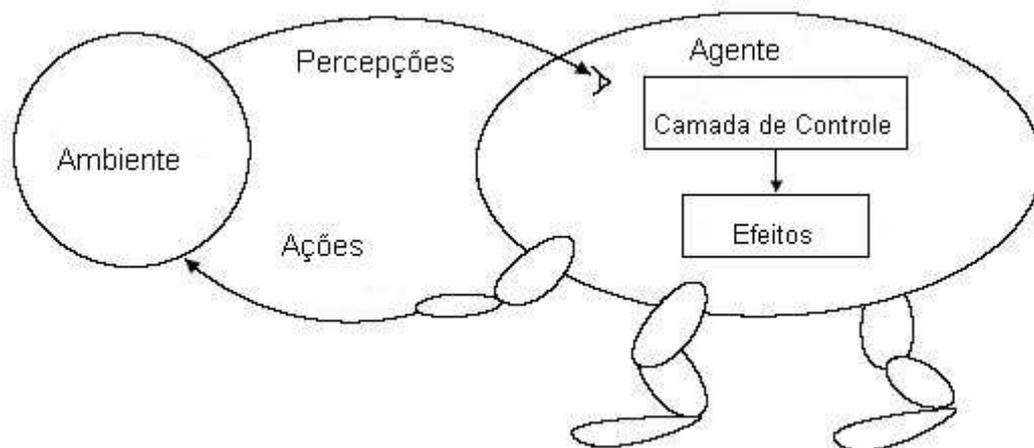


Figura 4 – Um agente e seu ambiente

Fonte: Russel e Norvig (1995, p. 32)

Sob o ponto de vista de modelagem, um agente deve apresentar as seguintes características (MACAL e NORTH, 2005):

1. Deve ser identificável e com uma série de características e regras que governam seu comportamento e sua capacidade de tomar decisões;

2. Um agente está inserido em um ambiente e com o qual interage com outros agentes. Um agente deve ter um protocolo de interação com outros agentes, assim como deve saber identificar a “personalidade” dos demais agentes;
3. Um agente é orientado a um objetivo, têm objetivos a atingir (não necessariamente de maximização) de acordo com seu comportamento;
4. Um agente é autônomo, ou seja, pode agir independentemente em seu ambiente e interagir com outros agentes, em algumas situações há um conjunto de ações limitadas;
5. Um agente é flexível, possui capacidade de aprender e adaptar seu comportamento com o passar do tempo baseado em suas experiências, esse tipo de situação requer algum tipo de memória. Um agente pode possuir regras para alterar suas regras de comportamento.

De acordo com Gilbert (2008, p. 2), formalmente, modelagem baseada em agentes é um método computacional que possibilita aos pesquisadores desenvolver, analisar e realizar experiências com modelos compostos por agentes que interagem com outros agentes em um ambiente.

2.5.2 Arquitetura de agentes

A definição apropriada da arquitetura é um dos principais aspectos a serem levados em consideração quando da construção de modelos computacionais que seguem a abordagem baseada em agentes. Maes (1991, p. 115) apresenta uma definição bastante clara sobre este conceito:

Uma metodologia particular para construir agentes. Ela especifica como o agente pode ser decomposto na construção de um conjunto de módulos e como esses módulos devem interagir. O conjunto total de módulos e suas interações respondem como os dados de entrada e seu atual estado interno determinam as ações e o estado interno futuro dos agentes.

Da mesma forma que o conceito de agentes, há inúmeras taxonomias para classificar as arquiteturas para construção de sistemas multi-agentes. Müller (1998), Wooldridge (2002), por exemplo, propõem três divisões principais comuns:

1. Agentes reativos: A abordagem reativa baseia-se na idéia de que agentes com ações elementares podem realizar trabalhos complexos. Um exemplo clássico é a colônia de formigas, cujo trabalho individual não é inteligente, mas o resultado é bastante complexo. Não há representação explícita do conhecimento e nem do ambiente; não há memória das ações; a organização é etológica, ou seja, similar a dos animais; e existe grande número de membros. A tomada de decisão é implementada através do mapeamento direto de uma situação para uma ação. Assim, sistemas dessa natureza fornecem respostas rápidas, não há perda de tempo com processamento, pois são puramente reflexivos. Agentes reativos normalmente tomam decisões em “tempo real” com base num conjunto muito limitado de informações e regras simples de situação/ação que permite selecionar um dado comportamento;
2. Agentes cognitivos ou deliberativos: são baseados em modelos organizacionais humanos, como grupos, hierarquias e mercados. Há uma representação explícita do ambiente e dos outros agentes da sociedade; pode manter-se um histórico das interações e ações passadas; a comunicação é direta, através de mensagens; seu mecanismo de controle é deliberativo, ou seja, os agentes raciocinam e decidem seus objetivos, planos e ações; seu modelo de organização é sociológico e uma sociedade contém poucos agentes. De acordo com a forma de raciocínio, esta arquitetura pode ser encontrada com diferentes nomes: arquitetura BDI, arquitetura baseada em lógica e arquitetura baseada em metas;
3. Agentes híbridos: essa arquitetura também conhecida por arquitetura em camadas combina componentes das duas anteriores, ou seja, estrutura um agente em dois subsistemas: (1) deliberativo, contendo o modelo simbólico do mundo que desenvolve planos e toma decisões da maneira proposta pela Inteligência Artificial Simbólica; e, (2) reativo, capaz de reagir a eventos que

ocorrem no ambiente sem se ocupar com raciocínio complexo. A camada reativa normalmente tem alguma prioridade sobre a deliberativa, permitindo respostas rápidas a eventos importantes detectados no ambiente.

Nesse trabalho utilizou-se a arquitetura proposta por Swaminathan *et al.* (1998) como referência para modelar o comportamento dos agentes. De acordo com a classificação descrita anteriormente, pode-se classificá-la como uma arquitetura híbrida. Essa arquitetura é específica para modelagem de agentes voltados para cadeias de suprimento e vem sendo utilizada em outros trabalhos tais como em Cavalieri *et al.* (2003), Oliveira e Carvalho (2004) e Janssen (2005).

O Anexo B apresenta em detalhes o funcionamento dessa arquitetura.

2.5.3 Simulação baseada em agentes

A idéia básica de modelos de simulação, em termos gerais, é especificar as regras de comportamento de entidades individuais e suas regras de interação para simular certa quantidade de indivíduos que representam uma determinada realidade. Dessa forma consegue-se explorar e estudar as conseqüências de regras estabelecidas no nível individual sob a população como um todo. Quando as entidades simuladas são modeladas como agentes, as simulações do seu comportamento e das interações decorrentes dele são chamadas de simulação baseada em agentes (ABS, do inglês *Agent-Based Simulation*)(SRBLJINOVIC e SKUNCA, 2003).

Davidsson (2002) define mais especificamente a diferentes nomenclaturas que podem ocorrer a partir da interseção de três áreas: simulação computacional, computação baseada em agentes e ciências sociais, conforme Figura 5. As ciências sociais estão interessadas em estudar a interação entre entidades sociais e inclui áreas como psicologia, gestão, política e algumas áreas da biologia. A simulação computacional estuda técnicas para construir ferramentas de simulação, tais como orientação a eventos discretos, orientação a objetos e simulação dinâmica. Por fim, a área de computação baseada em agentes envolve a área da ciência da computação que está interessada em modelagem baseada em agentes, projeto e

programação, além do desenvolvimento de ferramentas voltadas para auxiliar em todas essas etapas de trabalho.

A “Simulação Social Multi-Agente” (ABSS, do inglês *Agent-Based Social Simulation*), representa a intersecção das três áreas citadas anteriormente, porém, segundo Davidsson (2002) a intersecção de apenas duas dessas áreas pode apresentar outras áreas do conhecimento interessantes. Por exemplo, a intersecção entre as áreas de ciências sociais e computação baseada em agentes representa o campo do conhecimento conhecido como “Aspectos Sociais dos Sistemas Agentes” (SAAS, do inglês *Social Aspects of Agent Systems*), inclui o estudo de normas, instituições, organizações, cooperação, competição, entre outros. As atividades pertencentes a intersecção entre a simulação computacional e computação baseada em agentes são freqüentemente chamadas “Simulação Multi-Agente” (MABS, do inglês *Multi Agent Based Simulation*) procurando estudar o uso da tecnologia por agentes para simular algum fenômeno no computador. Finalmente, a intersecção entre as ciências sociais e a simulação computacional é geralmente chamada de “Simulação Social” (SocSim, do inglês *Social Simulation*) e corresponde a simulação de fenômenos sociais em computadores utilizando alguma técnica de simulação.

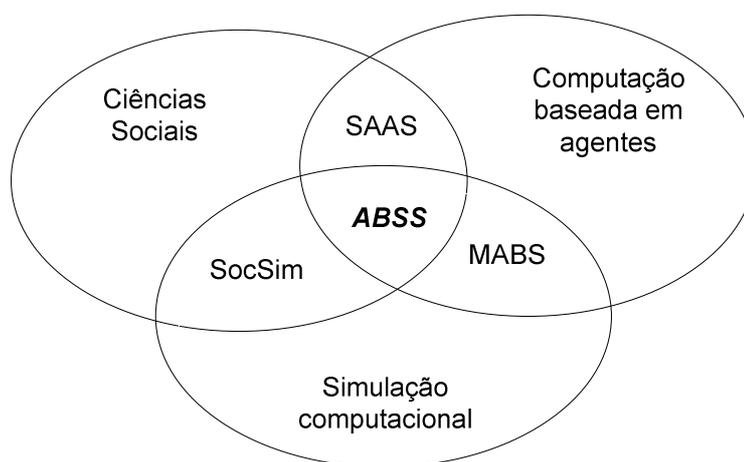


Figura 5 – Simulação social baseada em agentes

Fonte: Davidsson (2002)

Outra importante consideração feita por Davidsson (2002) diz respeito ao fato da ABSS ser uma técnica de micro-simulação, ou seja, um método que consiste em construir modelos microscópicos (ao nível dos componentes) com a capacidade de reproduzir as leis macroscópicas do sistema, através da simulação de cada

componente individualmente, quando interagem entre si. Essa abordagem diferencia-se da macro-simulação, abordagem que estuda o comportamento agregado, para reproduzir o comportamento observável dos sistemas.

A micro-simulação permite relacionar o comportamento heterogêneo de cada agente com o comportamento macro de todo sistema, explorando os padrões de comportamento que emergem ao longo do tempo. Portanto, modelos dessa natureza são bastante indicados para estudos exploratórios, essa característica tem especial importância quando se estuda fenômenos das ciências sociais, onde as possibilidades de experimentos com situações do mundo real são imensas. Além de apresentar características bastante apropriadas para estudar comportamentos emergentes em cadeias de suprimento a partir de regulamentações e normas, principal objetivo de modelagem a ser atingido durante o desenvolvimento desse trabalho.

3 REVISÃO DE LITERATURA

O objetivo deste capítulo é apresentar o estado da arte em modelagem de cadeias de suprimento através de modelos estocásticos e híbridos. A seção final apresenta como algumas deficiências apresentadas pela literatura podem ser corrigidas, introduzindo contribuições originais ao atual estado da arte.

3.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO

Persson e Olhager (2002) estudaram alternativas de projeto de cadeias de suprimento no que diz respeito a níveis de qualidade, tempo de produção e custos. O interesse dos autores foi avaliar o impacto dos níveis de qualidade e tempo de produção nos custos. A opção por simulação, segundo os autores, foi em função da sua adequação para o entendimento do inter-relacionamento entre variáveis, bem como, para propósitos de aprendizado dentro da própria organização. Foram construídos três modelos de simulação na linguagem *Taylor II*. Um modelo de simulação representou a cadeia de suprimentos antiga, outro modelo foi utilizado para representar a cadeia atual e o último foi utilizado para representar a nova cadeia. Para cada modelo, três experimentos com três níveis diferentes de qualidade (baixo, médio e alto) foram realizados. Os níveis de qualidade foram determinados de acordo com o número de produtos produzidos sem defeitos. Os resultados apresentados pelos autores dizem respeito a custos, níveis de estoque, qualidade, tempo de produção, variação do tempo de produção e, por fim, discute-se o inter-relacionamento entre custos, qualidade e tempo de produção. Resultados obtidos pelos autores indicam que há relacionamento entre custo total, qualidade e tempo de produção, indicando que o custo total aumenta linearmente com o tempo de produção e de forma não linear com níveis de qualidade. Conseqüentemente, boa qualidade e baixo tempo de produção, melhoram o desempenho da cadeia como um todo.

Ng *et al.* (2003) apresentam o desenvolvimento e a arquitetura (inclusive com a descrição e as funcionalidades de classes implementadas em C++), de um *workbench* voltado para a modelagem de uma cadeia de suprimentos com vários estágios. O objetivo da pesquisa foi estudar o valor do compartilhamento de informações para uma cadeia de suprimentos em particular, três cenários de troca de informações são considerados: o histórico de demanda do estágio; a demanda dos clientes; e o escalonamento de pedidos *downstream*. Os autores avaliam o impacto das diferentes políticas de troca de informações sobre os níveis de estoque, percentual de falta de estoque, custos para armazenamento de estoque nos estágios e na cadeia. Os resultados apresentados mostram que a terceira estratégia, o escalonamento de pedidos *downstream*, é a que apresenta os menores níveis de estoque na cadeia, mas ao longo do tempo é aquela que apresenta os maiores custos por falta de estoque. A segunda estratégia, a demanda dos clientes, é indicada para situações onde a variabilidade da demanda é grande, pois, conforme o resultado dos experimentos resultou em custos moderados de armazenamento e em custos baixos devido à falta de estoque.

Lai *et al.* (2003) descrevem o sistema *just-in-time* (JIT), investigam o inter-relacionamento do JIT em ambientes de comércio eletrônico utilizando *System Dynamics* para modelagem do sistema. O modelo auxiliou na integração do fluxo de informações desde clientes até fornecedores formando uma única cadeia de suprimentos, permitiu aos gestores entender o inter-relacionamento entre JIT e comércio eletrônico. Como resultado geral para a empresa, houve melhora nos níveis de estoque, qualidade e produtividade.

Ge *et al.* (2004) apresentam um estudo sobre a análise do efeito chicote em cadeias de suprimento utilizando *System Dynamics*. O modelo representa parte da cadeia de suprimentos de um supermercado, as causas do comportamento dinâmico do sistema e as origens da amplificação da demanda são estudadas desde a cadeia *downstream* até a cadeia *upstream*. O impacto do atraso de informação, predição de demandas e compartilhamento de informação em uma cadeia de vários estágios foram estudados. Os resultados obtidos com a simulação revelam que o compartilhamento de informação é mais importante do que os métodos utilizados para predições e que a velocidade de transmissão da informação, além disso,

mostram que melhoras no compartilhamento da informação entre diferentes partes da cadeia e mudanças estruturais no fluxo da informação são os mecanismos mais efetivos para melhorar o desempenho da cadeia, em relação a níveis de estoque e tempo de produção. Por outro lado, demonstram que a redução no atraso das informações também pode contribuir para a melhora do desempenho, porém, é um mecanismo menos efetivo que a introdução de um melhor método de predição ou que a alteração no fluxo de informações.

Higuchi e Troutt (2004) desenvolveram um modelo de simulação dinâmico e multi-estágio para estudar o caso de um produto com ciclo de vida curto. O modelo é composto por três componentes, mercado, varejo e fábricas, na sua implementação considera as influências simultâneas do efeito chicote, alta e baixa demanda, além de decisões multi-estágio. Entre as variáveis do modelo cabe destacar as seguintes, de acordo com seu estágio da cadeia: mercado: α (coeficiente da curva logística que controla a velocidade de difusão), limite superior de clientes potenciais, total de vendas, percentual de recompra do produto; varejo: nível de estoque, *backlog* de compras, demanda fantasma; e, fábrica: nível de estoque, quantidade do produto em produção, capacidade produtiva. Os autores destacam que deve haver um controle sobre a velocidade de difusão dos produtos, demonstram a importância da recompra de produtos, ilustram o relacionamento entre a demanda total e a capacidade produtiva face ao atraso da identificação da demanda fantasma, além de mostrar as consequências do efeito chicote sobre os níveis de estoque nas fábricas e no varejo.

Biswas e Narahari (2004) desenvolveram um sistema de apoio a decisão chamado DESSCOM (*decision support for supply chain through object modeling*) que auxilia a tomada de decisão dos níveis estratégico, tático e operacional de projetos de cadeias de suprimento. O sistema proposto é composto por dois componentes principais: (1) DESSCOM-MODEL, que possui uma biblioteca de objetos genéricos projetados para modelar cadeias de suprimento, assim como a interação entre os elementos pertencentes à cadeia; (2) DESSCOM-WORKBENCH, permite a formulação e solução computacional dos modelos projetados utilizando programação linear, programação linear mista e simulação, para fazer isso, utiliza o modelo de objetos de uma dada cadeia de suprimentos para fornecer as entradas necessárias às técnicas utilizadas para solução do modelo.

Zhang e Dilts (2004) estudaram o impacto da estruturação da cadeia de suprimentos nos custos e nos prazos de entrega utilizando simulação em *System Dynamics*. São consideradas duas formas básicas de estruturação: mecanicista e orgânica, a primeira utiliza uma estruturação hierárquica de tomada de decisões, é centralizada e as decisões são mais lentas, enquanto que a segunda é descentralizada, horizontal e as decisões são mais rápidas. O modelo de simulação compreende quatro empresas que estão em rede, cada uma das quatro empresas pode ter sua própria estrutura (mecanicista ou orgânica). Um fornecedor de materiais e consumidores são incluídos no modelo para completar a rede. É necessário destacar que há duas cadeias na rede. Entre os resultados apresentados pelos autores, pode-se citar que houve diferenças significativas entre a demanda estável e variável no desempenho da cadeia, porém, não determinaram quais tipos de estrutura gerou o melhor desempenho; os resultados para a estrutura dos estágios e da cadeia de suprimentos sugerem que plantas orgânicas localizadas próximas à demanda dos clientes resultarão em melhor desempenho; como os autores estudaram uma rede com duas cadeias, determinaram que para uma demanda dinâmica, um modelo cooperativo, onde as cadeias cooperaram para satisfazer os clientes, obteve um melhor desempenho que um modelo competitivo.

Manzini *et al.* (2005) apresentam cinco *cases* com o propósito de demonstrar a generalidade e a efetividade da utilização da simulação na cadeia de suprimentos. O primeiro estudo foi desenvolvido para uma empresa do setor automotivo com o propósito de avaliar o impacto das mudanças no tempo de entrega e nos custos do produto final. O segundo estudo foi desenvolvido para uma cadeia do setor alimentício, buscou analisar cenários relacionados à mudança no *throughput*, no número de recursos disponíveis e nas políticas adotadas na cadeia. O terceiro estudo, destinado a uma empresa do setor de metalurgia do ferro, buscou aperfeiçoar a eficiência da cadeia no que diz respeito à produção, embalagem, armazenamento e distribuição de feixes de metais. O quarto estudo, voltado para uma empresa de roupas, foi desenvolvido com o intuito de otimizar o *throughput* do sistema, minimizando custos operacionais e de investimentos. Por fim, o último modelo apresentado no artigo trata da cadeia de suprimentos do leite. Nesse estudo os autores procuram avaliar dois aspectos estratégicos, o primeiro é o gerenciamento da demanda, enquanto que o segundo se refere a unir ou separar a

distribuição de produtos frescos da distribuição de produtos em embalagens longa vida.

Daniel e Rajendran (2005) propuseram um algoritmo genético (GA, do inglês *Genetic Algorithm*) para otimizar os níveis de estoque de uma cadeia de suprimentos de produto único e serial. O principal objetivo do modelo desenvolvido é minimizar os custos de armazenamento e de escassez de produtos em todos os estágios da cadeia. Os autores comparam o desempenho do algoritmo genético desenvolvido com soluções randômicas e com soluções obtidas por enumeração completa. Entre os resultados obtidos pode-se destacar: as soluções obtidas com o GA são melhores que aquelas obtidas com soluções randômicas; as soluções do GA não apresentam diferenças significativas em relação às por enumeração completa; há diferenças significativas entre a solução ótima e as soluções geradas randomicamente; a maior proporção de custos totais da cadeia está associada com o varejo. Este último resultado pode ser explicado em função dos autores atribuírem os maiores custos (armazenamento e falta de estoque) a esse estágio.

van der Zee e van der Vorst (2005) apresentam a definição de um framework orientado a objetos que utiliza a notação de Booch¹ para modelagem de cadeias de suprimento. O modelo apresentado é baseado em três conceitos fundamentais: agentes (do inglês, *agent*), tarefas (do inglês, *jobs*) e fluxo (do inglês, *flows*). Agentes² são utilizados para modelar os elementos de infra-estrutura da cadeia de suprimentos, tais como produtores, consumidores, departamentos de produção, sistemas de distribuição, como objetos autônomos que são projetados para tomar algum tipo de decisão ou realizar alguma tarefa. Todas as atividades da cadeia são modeladas como “tarefas”, incluindo atividades relacionadas à tomada de decisão. Fluxo constitui todos os elementos que se movimentam ao longo da cadeia, podem representar produtos, recursos, veículos, informações. Para demonstrar a utilização do framework proposto, os autores constroem um modelo de simulação utilizando o

¹ Metodologia de análise e projeto orientado a objeto proposta em Booch (1994).

² Agentes, no contexto desse trabalho, não está relacionado a agentes inteligentes ou agentes de software conforme trabalhos apresentados na seção 3.3

software eM-PlantTM (Technomatix Technologies), segundo os autores, a escolha por essa plataforma decorre do fato da mesma ser um dos poucos pacotes comerciais genuinamente orientado a objetos.

Kim *et. al* (2005) propõem dois modelos de controle de estoque adaptativos para uma cadeia de suprimentos composta por um elo fornecedor e múltiplos elos varejistas. Na primeira estratégia apresentada é um modelo centralizado e na segunda um modelo descentralizado. O modelo centralizado funciona sob a idéia do modelo de gerenciamento de estoque controlado pelo vendedor (do inglês, *vendor-managed inventory model*), nessa idéia o fornecedor é responsável por manter níveis de estoque adequados para o varejista, portanto, a cada período de tempo, o fornecedor coleta dados a respeito da posição de estoque e do histórico de vendas do varejista para tomar as decisões acerca do envio de produtos. No sistema descentralizado, fica a critério tanto do varejista quanto do fornecedor controlar seus níveis de estoque. A técnica de aprendizagem por reforço utilizada pelos autores se chama método de ação-valor (do inglês, *action-value method*), uma heurística para resolver problemas de otimização em um ambiente de incerteza. Segundo os autores, o domínio adequado para aplicação dessa técnica é um problema de otimização estocástico, onde o valor de cada ação é desconhecido mas pode ser aprendido através de repetidas ações num ambiente simulado ou real. A idéia é que a cada período de decisão, uma das possíveis ações seja tomada com base em uma função de probabilidade e seus valores estimados. Utilizando essa técnica, os parâmetros de controle para o elo varejista e fornecedor são projetados para adaptar-se aos padrões de mudança da demanda. Giannoccaro e Pontrandolfo (2002) também utilizam a estratégia de aprendizagem por reforço para determinar melhores políticas de controle de estoque para uma cadeia de suprimentos de três estágios.

Lim *et al.* (2006) desenvolveram um modelo híbrido para tratar o planejamento da produção-distribuição de uma cadeia de suprimentos. Um modelo é utilizado para determinar a capacidade das facilidades buscando minimizar custos relacionados com estoques, produção, distribuição e custos fixos. Enquanto que um modelo de simulação é utilizado com os seguintes objetivos: avaliar diferentes políticas de reposição (três políticas são avaliadas no trabalho); examinar o efeito

dos diferentes planos; identificar o plano de produção-distribuição de menor custo. Segundo os autores, o trabalho pode ser considerado com uma diretriz para a resolução do problema do planejamento da produção-distribuição. Os resultados apresentados com uma análise de variância (ANOVA) mostraram que nenhuma das políticas tem clara dominância sobre as outras, mas a política de reposição periódica apresentou os melhores resultados.

Hung et. al (2006) apresentam um modelo de “nodo” genérico, que se utiliza do paradigma de orientação a objetos, para descrever as funcionalidades de uma cadeia de suprimentos. A cadeia é modelada como um conjunto de nodos interconectados, cada qual representando uma entidade física (planta, depósito ou varejista). O nodo pode ser especializado para descrever diferentes instâncias com diferentes características físicas e com diferentes processos de negócio. Cada nodo é composto por três componentes principais: gerenciamento de chegada de materiais – para controlar estoques de matérias-primas, consideram-se políticas de reposição de estoque diferentes para cada matéria-prima; conversão de materiais – determina quando um pedido vai ser atendido, ordena os pedidos por prioridade, determinam restrições de produção, programa o processo de conversão de matérias-primas em produtos industrializados; gerenciamento de saída de material – refere-se ao gerenciamento da demanda por produtos industrializados.

Longo e Mirabelli (2008) apresentam as potencialidades do ambiente de simulação desenvolvido através da modelagem de uma cadeia de suprimentos fictícia de três estágios, formada por nove lojas, quatro centros de distribuição e três plantas para produção de vinte diferentes itens. Os autores analisam os efeitos de diferentes políticas de controle de estoque, *lead times*, intensidade e variabilidade da demanda dos consumidores sob três diferentes medidas de desempenho da cadeia (níveis de estoque, custos com estoques e nível de serviço). O ponto alto da ferramenta é a facilidade para alterar cenários através da interface do simulador, além disso, há integração com planilhas eletrônicas. Porém, a análise dos resultados deve ser feita com um software de estatística apropriado.

3.2 MODELOS DE SIMULAÇÃO BASEADO EM AGENTES

Um dos primeiros artigos publicados nessa área foi o trabalho de Swaminathan *et al.* (1998), onde os autores definem um agente de software genérico que é então especializado para executar diferentes atividades em uma cadeia de suprimentos, o estudo divide os agentes em dois tipos principais: agentes estruturais (varejista, distribuidor, produtor, fornecedor e transportador) e agentes de controle (demanda, estoque, fornecimento e informação). A arquitetura do agente genérico proposto e seu funcionamento básico são explicados em detalhes no Anexo A. Embora os autores mencionem uma aplicação em grande escala para a IBM, o trabalho não apresenta detalhes e resultados obtidos com o estudo de caso. Oliveira e Carvalho (2004) fizeram uso das idéias apresentadas por Swaminathan *et al.* (1998) e construíram um ambiente de simulação com os principais agentes apresentados no trabalho. Com o ambiente desenvolvido, os autores estudaram quatro diferentes cenários de gestão: troca de informação tradicional, compartilhamento da informação sobre demanda, decisão de produção e distribuição centralizada na fábrica e troca de informação tradicional com restrição de capacidade de produção. Estudo similar é apresentado por Julka *et al.* (2002), onde um *framework* unificado para modelagem, monitoramento e gerenciamento de cadeias de suprimento é apresentado. Três tipos de agentes são propostos: (1) *Emulation*: para modelar os atores da cadeia; (2) *Query*: para controlar requisições de clientes; e, (3) *Project*: cuja função é coordenar os demais agentes para resolver um problema. Uma aplicação para o setor petroquímico é apresentado.

Fox *et al.* (2000) apresentam a construção de uma arquitetura baseada em agentes para gestão de cadeias de suprimento no nível tático e operacional. Os autores apresentam o desenvolvimento de um “*agent build shel - ABS*” que oferece componentes reusáveis e genéricos, além de oferecer o suporte para desenvolvimento de modelos de agentes cooperativos. Seguindo essa mesma linha de criar agentes genéricos, Sadeh *et al.* (1999) apresentam uma revisão da arquitetura MASCOT (*Multi-Agent Supply Chain Coordination Tool*).

Nissan (2001) apresenta um modelo baseado em agentes para a cadeia de General Motors onde se avalia a capacidade dos agentes em realizar negócios em

nome de usuários, compradores e vendedores. A intenção dos autores é avaliar a aplicabilidade da abordagem por agentes para realizar processos reais, representando entidades reais que realizam negócios com a empresa. O comportamento federado dos agentes e a estrutura de projeto dos agentes são apresentados e discutidos. Os agentes foram desenvolvidos utilizando o *Agent Development Environment* – ADE. Os autores escrevem que, no futuro, pretendem estudar a divisão de responsabilidades entre humanos e agentes de software, destacam a necessidade de rever os processos de negócio da empresa para que isso ocorra.

Davidsson e Wernstedt (2002) utilizam sistemas multi-agentes para coordenar a produção e distribuição num sistema *just-in-time*. O problema a ser resolvido pelos agentes é duplo: (1) produzir a quantidade certa de recursos no tempo certo e, além de distribuir aos clientes corretamente e (2) formar grupos de clientes com o objetivo de redistribuir recursos de maneira rápida e a um baixo custo, procurando tratar erros de previsão de consumo. Agentes de redistribuição são modelados, além de agentes consumidores e produtores.

Kimbrough *et al.* (2002) compõem a idéia de agentes de software com algoritmos genéticos para resolver o clássico *MIT Beer Game*, a idéia é verificar se a estratégia utilizada consegue obter melhores resultados que jogadores humanos, além de verificar se os agentes conseguem eliminar o efeito chicote na cadeia. Os resultados demonstram que a solução proposta obtém resultados melhores que jogadores humanos (MBAs e estudantes de graduação) e que exclui o efeito chicote.

Schieritz e Grössler (2002) apresentam uma estratégia de modelagem que combina *system dynamics* com a abordagem de simulação baseada em agentes. O artigo discute os pontos fortes e fracos de cada método, além de apresentar uma alternativa de integração entre as duas estratégias de modelagem. A estrutura de cada agente é modelada através de quatro módulos: (1) *Ordering*: modelo em *system dynamics* para gerenciar pedidos de acordo com Sterman (2000); (2) *Evaluation*: modelo em *system dynamics* para selecionar fornecedores; (3) *Interface*: armazena e processa os dados dos dois modelos anteriores, inclui o disparo de pedidos a fornecedores e a clientes, além de realizar a comunicação entre os

softwares Vensim® e eM-Plant® utilizados para modelar cada estratégia; e, (4) *Scheduling*: controla a seqüência de comandos, tempo de simulação.

Cavalieri *et al.* (2003) apresentam um modelo com dois tipos diferentes de agentes: agentes estruturais e agentes funcionais. O primeiro tipo de agente representa os atores da cadeia (consumidores finais, atacadistas e fornecedores). Os agentes consumidores finais geram a demanda da cadeia, cada agente desse tipo possui necessidades diferentes no que diz respeito a tipo de produto, quantidade e tempo máximo de entrega. Os agentes atacadistas têm como objetivo entregar os pedidos dos consumidores finais na quantidade e no prazo certo. Os agentes fornecedores têm como objetivo atender as necessidades dos agentes atacadistas, conforme suas necessidades em termos de produtos e prazos. Os agentes funcionais são representados pelo agente Monitor, o qual realiza a função de interação entre os agentes da cadeia, em particular, esse agente age como uma interface entre os agentes que precisam realizar algum tipo de negociação, além de realizar a troca de informações, esse agente conhece as regras e os mecanismos de negociação utilizados pelos agentes. O trabalho utiliza sistemas multiagentes para avaliar mecanismos de coordenação lateral e vertical entre os componentes de uma cadeia. Janssen (2005) desenvolveram um modelo de simulação baseado em agentes que utiliza uma combinação dos agentes estruturais e funcionais propostos por Cavalieri *et al.* (2003) e Sadeh *et al.* (1999). A simulação mostrou como reduzir o *lead time* e a falta de estoque nos períodos de pico de movimento do caso estudado.

Chiu e Lin (2004) apresentam a utilização conjunta de agentes de software e redes neurais para o contexto de estudo de uma cadeia de suprimentos colaborativa que trabalha sob a idéia de montar para vender (do inglês, *assemble-to-order*). No trabalho, agentes são modelados como nodos da rede neural, agentes com funcionalidades similares são agrupados na mesma camada, o modelo é composto por uma estrutura de quatro camadas, cada qual, representando um ator da cadeia (fornecedor, produtor, distribuidor, consumidor). Os pesos das conexões entre os nodos representam as restrições e capacidade de cada agente. A camada de saída representa os consumidores, enquanto que a camada de entrada representa os fornecedores, o treinamento da rede é realizada buscando o equilíbrio entre a camada de entrada e saída.

Allwood e Lee (2005) propõem um modelo de agente para estudar o comportamento de cadeias de suprimento competitivas, segundo os autores, a maior parte dos estudos dessa área está voltada para cadeias cooperativas. Entre as habilidades dos agentes do modelo pode-se citar: a seleção de fornecedores, a distribuição de pedidos para clientes preferenciais, o gerenciamento de produção e estoque e, ainda, a capacidade para determinar preço apropriado para seu produto de acordo com um comportamento competitivo. Na análise dos resultados os autores mostram que políticas que levam a uma maior lucratividade individual também levam aos piores resultados para o desempenho da cadeia como um todo, além de demonstrar que quando os agentes trabalham cooperando um com o outro o desempenho da cadeia como um todo é melhor.

Valluri e Croson (2005) utilizaram a estratégia de aprendizagem por reforço (do inglês, *reinforcement learning*) para estudar a dinâmica e a convergência ao equilíbrio da interação entre comprador e vendedor. Nesse modelo, há apenas um comprador e um grupo de N fornecedores que são capazes de produzir produtos de alta qualidade e outro grupo de fornecedores que não são capazes de fazê-lo nos mesmos padrões. O problema a ser resolvido é (a) como o comprador pode selecionar fornecedores baseado na sua qualidade e (b) como, tendo um conjunto de fornecedores selecionados, pode fazer para incentivá-los a produzir sempre na maior qualidade possível. Em linhas gerais, a idéia é recompensar os fornecedores que atingirem os maiores níveis de qualidade comprando deles as maiores quantidades no próximo ciclo de simulação, além de recompensá-los com um preço que supera seus custos de produção. Os fornecedores que não atingirem um nível de qualidade adequado são punidos duplamente, não poderão fornecer produtos (ou se candidatar a fornecimento) por w rodadas de simulação, além de serem recompensados com valores mais baixos, apenas para cobrir seus custos de produção. Desse modo, o espaço para tomada de decisões consiste de níveis de qualidade que o fornecedor pode produzir, no trabalho, os fornecedores capazes podem produzir com nível de qualidade entre 0 e 1 – {0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 1}, enquanto que os fornecedores incapazes podem atingir níveis de até 0.4 – {0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4}. A partir dessas definições, os autores demonstram a convergência dos fornecedores para altos níveis de qualidade.

Mele *et al.* (2007) também propõem uma estratégia de otimização que utiliza algoritmos genéticos em conjunto com modelos de simulação baseada em agentes, o objetivo do trabalho é determinar os parâmetros da política de controle de estoque do centro de distribuição (R, s, S). O algoritmo genético é utilizado para gerar diferentes combinações de valores a serem simulados, avaliar o desempenho de cada alternativa e decidir pelo final da simulação. Os agentes propostos para modelar a cadeia de suprimentos são: *customer agent*, *site agent* (podem representar um produtor, centro de distribuição, atacadista ou varejista) e *supplier agent*.

Chatfield *et al.* (2007) apresentam uma arquitetura para modelagem de cadeias de suprimento. A modelagem da cadeia é realizada através de cinco tipos de componentes: nodos, arcos, componentes, ações e políticas. Os aspectos físicos da cadeia são descritos como nodos, arcos e componentes, enquanto que os aspectos lógicos e funcionais são descritos como ações e políticas. Os nodos representam as localizações na cadeia, tais como fornecedores, plantas, centros de distribuição, clientes, entre outros. Os arcos representam as conexões entre os nodos, podem apresentar propriedades relacionadas a capacidade, custos e velocidade de deslocamento, por exemplo. Os componentes incluem materiais, pedidos, mensagens, entre outros itens que são consumidos e processados pelos nodos da cadeia. Objetos definem as ações básicas que cada nodo deve realizar, tais como realizar um pedido, processar um pedido, despachar e transportar pedidos. Políticas definem as condições sobre as quais uma determinada ação pode ocorrer, além de definir o relacionamento entre os participantes da cadeia. Os autores utilizam o “Beer Game” para ilustrar a utilização da metodologia proposta.

Govindu e Chinnan (2007) propõem uma metodologia genérica chamada MASCF – *Multi-Agent Supply Chain Framework*, voltada para as etapas de análise e projeto de modelos de simulação baseado em agentes para cadeias de suprimento. A metodologia proposta envolve quatro fases: coleta de requisitos, análise de sistemas, projeto arquitetural do sistema e implementação do modelo. A metodologia proposta faz uso da metodologia Gaia para auxiliar nas etapas de análise e projeto do modelo e da ferramenta JADE (*Java Agent Development Framework*) para a

etapa de construção dos modelos de simulação. A cadeia de suprimentos do Tamagotchi é utilizada para validar a metodologia proposta.

Zarandi *et al.* (2008) desenvolveram um modelo de simulação compondo a idéia de agentes de software com algoritmos genéticos para reduzir o efeito chicote em uma cadeia de suprimentos de quatro estágios. No modelo proposto há quatro agentes chamados *middle agents* e um agente chamado *software agent*. A cada iteração o *middle agent* coleta informações sobre níveis de estoque, indicadores de falta de estoque, *lead time* e demanda. Essas informações são enviadas ao *software agent* que tem sua lógica de funcionamento baseado em um algoritmo genético. O algoritmo genético gera um número de ações relativas a gerenciamento de estoque e seleciona aquela que minimiza o custo total do sistema. Após repetir esse processo várias vezes, a melhor alternativa para controle de estoque é determinada para cada elo da cadeia. Os resultados demonstram que a melhor política para o elo varejista é $X + (1; 4; 8)$, para o elo atacadista é $X + (0; 4; 7)$, para o elo distribuidor é $X + (0; 2; 5)$ e $X + (0; 2; 4)$ para o elo produtor. Na notação anterior, o primeiro parâmetro X , representa a demanda, enquanto que o segundo representa uma distribuição triangular.

3.3 LACUNAS PARA NOVOS ESTUDOS

A idéia de modelar cadeias de suprimento como agentes está sendo bastante explorada na literatura e há diversas idéias de trabalho interessantes, conforme demonstra as duas seções anteriores, porém, a partir da análise de cada um dos trabalhos apresentados perceberam-se algumas necessidades de modelagem, as quais são descritas ao longo dessa seção.

Uma das primeiras necessidades levantadas a partir da revisão de literatura diz respeito à definição da estrutura da cadeia, de uma maneira geral, é feita antecipadamente, ou seja, uma vez que se definem os atores da cadeia, se estabelece os relacionamentos ainda na fase de projeto. Embora em alguns trabalhos se consiga selecionar melhores fornecedores ou priorizar clientes para atendimento durante o andamento da simulação, a seleção fica restrita àqueles

definidos previamente. O parágrafo a seguir, extraído de Allwood e Lee (2005, p. 4888), ilustra a problemática:

Os agentes propostos nesse artigo assumem que a configuração da rede é conhecida, onde cada agente deve ter um identificador único, além de conhecer os identificadores do seu conjunto de clientes e fornecedores previamente designados.

Uma alternativa interessante é modelar os agentes de tal forma que eles possam perceber seu ambiente, assim, uma vez inseridos nele, cada um pode construir sua própria rede de relacionamentos ao longo da simulação. Essa alternativa de modelagem, não somente pode tornar o modelo de simulação mais flexível, mas também fará com que o mesmo tenha uma melhor aderência a própria teoria da área de sistemas multi-agentes, conforme Macal e North (2005, p. 3):

Um agente é “situado”, ou seja, vive em um ambiente através do qual interage com outros agentes. Agentes tem protocolos para interação com outros agentes, tal como protocolo de comunicação, e tem capacidade para responder ao ambiente. Agentes tem habilidade para reconhecer e distinguir a personalidade dos outros agentes. [...] Um agente é autônomo e pró-ativo. Um agente pode agir independentemente em seu ambiente e negociar com outros agentes, pelo menos sob um conjunto limitado de situações.

Um segundo ponto a ser considerado também diz respeito a dificuldade de definir comportamentos ainda na fase de projeto, mas não apenas em relação a rede de relacionamentos do agente, mas também no que diz respeito a parâmetros de comportamento a serem utilizados em cada caso. Para determinar essas questões *a priori* é necessário saber quais características do ambiente do agente emergirão no futuro e quais agentes estarão disponíveis com qual tipo de comportamento, tais problemas, resultantes da complexidade de um sistema dessa natureza podem ser reduzidos com a habilidade de aprendizagem e adaptação dos agentes, fator pouco explorado na literatura estudada, algumas iniciativas relacionadas a gerenciamento de estoque são apresentadas em Kim *et al.* (2005), Kimbrough *et al.* (2002), Mele *et al.* (2007) e Zarandi *et al.* (2008), enquanto Valluri e Croson (2005) apresentam uma abordagem de aprendizado para seleção de fornecedores. Na idéia de aprendizado e adaptação, considera-se que é tarefa do agente determinar ao longo da simulação

parâmetros relacionados a níveis de estoque, período entre pedidos, metas de produção, melhores fornecedores e, a partir daí, adaptar-se a diferentes situações do ambiente onde está inserido.

Um terceiro aspecto observado diz respeito à modelagem dos atores da cadeia de suprimento. Ao analisar os trabalhos apresentados nas seções 3.2 e 3.3 percebe-se que os modelos não consideram a idéia de ter agentes reguladores participando das simulações, agentes dessa natureza podem propor normas e influenciar o padrão de comportamento dos outros agentes. Nos trabalhos estudados procura-se estudar diferenças de comportamento a partir da alteração ou proposição de novos padrões oriundos dos atores que fazem parte da cadeia, frisa-se, atores que compõem os elos da cadeia. A proposição de um novo agente com o propósito de regular o comportamento da cadeia e dos seus atores, propondo indicadores, definindo impostos, autorizando ou desautorizando a atuação de um determinado agente que se mostrar ineficiente ou mal-intencionado, por exemplo, passa a ser um importante problema de modelagem a ser resolvido.

Por fim, ainda resta destacar que embora a técnica de sistemas multi-agentes venha ganhando bastante destaque na literatura de gestão de cadeias de suprimento, analisando-se os trabalhos apresentados nas seções anteriores, pode-se constatar que, com exceção de Swaminathan *et al.*, Sadeh *et al.* (1999), Julka *et al.* (2002), Fox *et al.* (2000), Chatfield *et al.* (2007), Govindu e Chinnann (2007), a maior parte dos trabalhos está concentrada em solucionar um problema em particular, muitos trabalhos são específicos para uma empresa ou cadeia de suprimentos, poucos são os trabalhos que se preocupam em propor soluções mais genéricas, que podem servir como base para a resolução de novos problemas ou ainda para a ampliação dos próprios. Trabalhos mais recentes pesquisados confirmam essa tendência e demonstram a necessidade de um maior número de trabalhos nessa área, ver, por exemplo, Govindu e Chinnam (2007, p. 589):

A literatura da área parece não considerar, explicitamente, as etapas de análise e projeto de sistemas, está mais voltada a programação de necessidades previamente definidas. A revisão de literatura também não demonstra o desenvolvimento de modelos para cadeia de suprimentos como um processo genérico. Pesquisadores precisam iniciar o

desenvolvimento de metodologias genéricas e de *toolkits* para sistemas multi-agentes. [...] Não há indícios do surgimento de metodologia genérica que é aplicável para modelagem de cadeias de suprimentos utilizando agentes. Claramente falando, aumentar e simplificar o processo de desenvolvimento são fatores essenciais para a adoção do paradigma de agentes pela indústria, seja para a área de gestão de cadeias de suprimentos, seja para outra.

No desenvolvimento desse trabalho procura-se contribuir com o estado da arte da área de modelagem de cadeias de suprimento definindo um conjunto de classes de caráter mais genérico para modelagem de cadeias produtivas, cujo objetivo é fornecer um conjunto de agentes previamente modelados, com comportamentos previamente especificados, que podem ser facilmente modificados para resolver outros problemas ou mesmo para estudar uma cadeia sob outra abordagem. Os agentes modelados devem ter capacidade de adaptação, devem estar em constante observação do seu ambiente e reagir pró-ativamente a mudanças.

Alem disso, propõe-se, nesse trabalho, a utilização de um novo grupo de agentes para o contexto de cadeias de suprimento, os quais poderão influenciar a cadeia propondo normas de comportamento e regras que podem ser seguidas pelos agentes ou não, dependendo da sua estratégia de deliberação.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

A simulação é uma alternativa bastante interessante para utilização nas ciências sociais, conforme já mencionado, pois se realiza em um ambiente controlado, em geral é mais barata em relação à experimentação, além de possibilitar a replicação dos experimentos diversas vezes:

Embora não substitua a experimentação, pode-se criar modelos sofisticados e realizar experimentos com ele, através da utilização desse modelo pode-se medir como as mudanças em uma série de variáveis independentes impactam em uma série de variáveis dependentes (GOLFARELLI *et al.* 2006, p. 51).

O objetivo primeiro da simulação não é o de reproduzir o funcionamento real de um sistema, mas de programar certos processos teóricos e observar que gênero de comportamento eles geram. Dessa forma, seu objetivo principal é o de explorar as conseqüências de proposições teóricas concernentes aos comportamentos organizacionais (BRUYNE *et al.*, 1991).

Portanto, o presente trabalho pode ser classificado como um estudo de natureza exploratória, pois procura desenvolver, esclarecer e elucidar conceitos, idéias e hipóteses sobre cadeias de suprimento operando sob regulação de entidades externas. O objetivo principal é desenvolver um modelo que possibilite explorar diferentes alternativas de gerenciamento, de configuração da cadeia e de avaliação do impacto de adoção de normas pelos agentes do modelo.

Com relação à abordagem do método, essa pesquisa possui um caráter multi-método, por envolver duas abordagens distintas: qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa será utilizada nos processos de modelagem dos agentes, na identificação dos comportamentos que são comuns aos diversos atores que fazem

parte de uma cadeia de suprimentos, ou seja, para generalização dos modelos, para análise de entrevistas com especialistas da área e para elucidação dos macro-conhecimentos gerados a partir das experimentações com o modelo, enfim, em praticamente todas as etapas da pesquisa. A pesquisa quantitativa será utilizada na medida em que o modelo fornece resultados numéricos que são analisados para validar o modelo de simulação e para descrever as interpretações do resultado das simulações.

A utilização da abordagem de pesquisa multi-método é defendida por Mingers (2001, p. 245):

Uma pesquisa não é um evento discreto, mas um processo que tem fases, ou melhor, que tem diferentes tipos de atividades, que serão realizadas, predominantemente, em tempos diferentes. Alguns métodos são mais úteis para algumas funções que outros, dessa forma, a combinação de estratégias podem fornecer melhores resultados para a pesquisa.

Para alcançar os objetivos de pesquisa propostos nesse trabalho, conforme apresentado na seção 1.2, utilizou-se como estratégia de pesquisa os passos de modelagem apresentados em Drogoul *et al.* (2002), representados graficamente na Figura 6.

Esse modelo de pesquisa procura explicar aspectos relativos às interações e comportamentos que emergem do nível micro (agentes) para o nível macro (sistema). Micro-conhecimento, como o próprio nome indica, refere-se ao nível de análise individual, ou seja, envolve o conhecimento “local” sobre os “indivíduos”, sem os quais o sistema alvo de estudo não existe.

Quando se utiliza o formalismo de modelagem por agentes, o nível do micro-conhecimento é traduzido para o *Modelo de Domínio*. O principal objetivo do modelo de domínio é deixar o pesquisador familiarizado com o problema, fazer com que ele aprenda o máximo possível sobre o modelo a ser construído, conhecendo todos os detalhes do domínio que está sob análise, além de garantir que o modelo tenha um propósito, que se consiga estabelecer critérios para identificar o que faz parte do

modelo e o que não faz parte, ou seja, também auxilia na definição das fronteiras e do escopo do modelo.

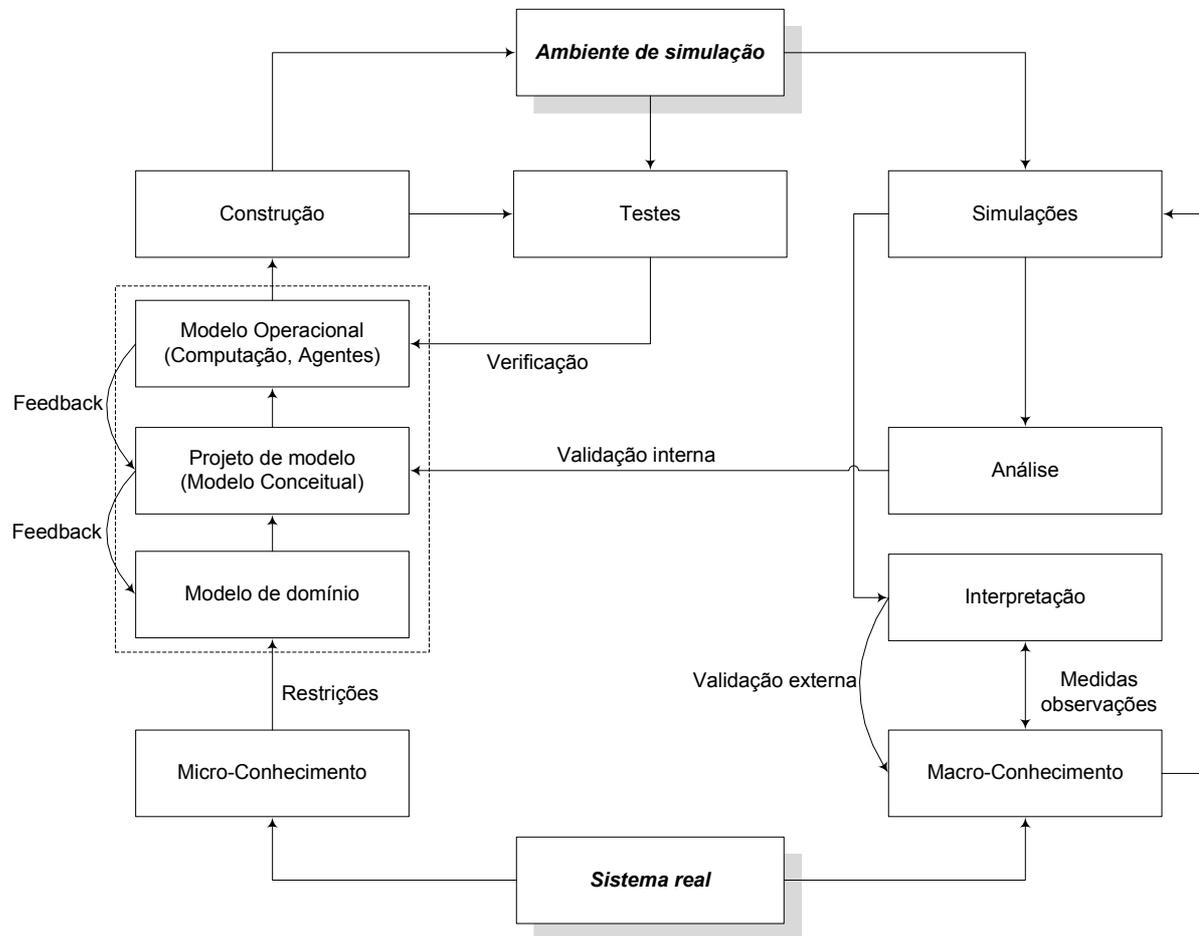


Figura 6 – Processo metodológico de modelagem

Fonte: Drogoul *et al.* (2002, p. 9)

O *Modelo de Domínio* não possibilita a transcrição direta para uma solução operacional, antes disso, é necessário realizar a etapa de *Projeto do Modelo*, atividade principal de modelagem do problema. Nessa fase procura-se entender melhor o domínio do problema, remover ambigüidades e especificar formalmente um projeto para o modelo, normalmente utilizando formalismos como lógica de primeira ou segunda ordem, diagramas UML, programação linear, pseudocódigo, entre outras alternativas de modelagem. Os autores do método destacam que esta etapa é a etapa mais importante e mais difícil do método, pois depende de informações de terceiros, melhor entendimento do problema, definição das restrições e limitações impostas a funcionalidade do modelo. A correta condução dessa etapa garante o que Borenstein (1998) chama de validação de face.

A definição do *Modelo Operacional* é a etapa que precede a *Construção* do modelo. Nesta etapa se define mecanismos de coordenação dos agentes, troca de mensagens, arquitetura dos agentes, linguagem de programação, entre outros. Em síntese, nessa etapa, se procura entender e definir todas as ferramentas a serem utilizadas para a solução computacional do modelo.

Os passos de retorno (*feedback*) presentes nas três primeiras etapas do método demonstram que o processo de modelagem é iterativo, ou seja, resultados de um passo podem provocar novos *insights* que levam a revisões nos passos anteriores.

Uma vez que se tenha definido o Modelo de Operacional, passa-se a etapa de construção, testes, simulações, análises e interpretações. Na etapa de *Testes* cada agente do modelo é testado, verificado e validado individualmente enquanto está sendo programado. O principal objetivo dessa etapa é garantir que cada agente tenha um comportamento conforme o modelo de referência definido, ou seja, a avaliação consiste na implementação correta do modelo, não levando em consideração se está sendo feita uma representação correta do mundo real. A consolidação dessa etapa garante o que Borenstein (1998) chama de verificação e validação de subsistema.

A análise dos resultados das simulações, além de destacar os achados da pesquisa, também auxilia na *Validação Interna* do modelo, ou seja, permite determinar se o resultado inesperado ocorreu por falha de programação do modelo ou por falha de modelagem, ocorrendo falha de modelagem, como o próprio fluxograma indica, o modelo deve ser revisado, podendo ser necessário reiniciar novamente todo ciclo. As interpretações auxiliam na avaliação da *Validade Externa* do modelo, ou seja, determinam o grau de generalização que se consegue com o estudo realizado.

Law e Kelton (2000, p. 299) destacam que a verificação e a validação buscam atingir objetivos diferentes num estudo de simulação:

Verificação significa determinar se o programa de computador da simulação executa conforme o planejado [...] A verificação avalia se a tradução do

modelo conceitual em relação ao modelo foi feita corretamente [...] Por outro lado, a validação está preocupada em determinar se o modelo de simulação conceitual é uma representação correta do sistema real sob análise.

Por fim, o *Macro-conhecimento*, resultado final e principal objetivo perseguido em um estudo de simulação baseado em agentes, é um conjunto de conhecimentos de natureza “global” em relação ao sistema alvo de estudo, obtido a partir de diferentes experimentações com o modelo.

A utilização dessa estratégia de pesquisa permite construir um modelo baseado em agentes que pode ser validado duplamente de acordo com as sugestões de Moss e Edmonds (2005):

Algumas metodologias permitem que modelos possam ser micro-validados realizando comparações com o comportamento de atores reais, assim como macro-validados produzindo resultados agregados consistentes com o sistema que está sendo avaliado.

Na continuidade desse capítulo é apresentado como cada uma das principais etapas do modelo de Drogoul *et al.* (2002) foram aplicadas no contexto desse trabalho:

1. Modelo de Domínio

- O principal objetivo dessa fase foi identificar os principais conceitos e funcionalidades inerentes à área de gestão de cadeias de suprimento e de sistemas multi-agentes normativos;
- Wu e Sun (2005) destacam três passos fundamentais a serem executados nessa fase: (1) definir o escopo do modelo, (2) reduzir a complexidade do modelo e, (3) escolher instâncias apropriadas para verificar e validar o modelo;
- A seção 5.1 apresenta o modelo conceitual de agentes normativos e a seção 5.2 apresenta o modelo conceitual de agente para cadeia de

suprimento. A definição desses modelos conceituais ocorreu após revisão de literatura apropriada;

- O resultado esperado dessa etapa é um modelo teórico de agente a ser modelado nas etapas posteriores e a identificação do conjunto de agentes que farão parte do modelo;

2. Projeto do Modelo

- A partir da definição do modelo conceitual, agentes são modelados a partir de uma notação apropriada, além de identificar e generalizar comportamentos comuns através de uma hierarquia de classes direcionadas para o domínio de cadeias de suprimento;
- A modelagem dos agentes foi realizada através da linguagem UML, conforme Booch *et al.* (1999),
- A seção 5.3 apresenta a modelagem dos agentes;
- O resultado esperado dessa etapa é a especificação das funcionalidades de cada um dos agentes identificados na primeira etapa do método;

3. Modelo operacional e construção

- A arquitetura escolhida para modelar o comportamento dos agentes é apresentada no Anexo B;
- A linguagem utilizada para programação computacional dos agentes foi Java, em conjunto com a biblioteca Repast – REcursive Porous Agent Simulation Toolkit. Esta definição ocorreu a partir de experimentos e testes realizados com as alternativas propostas por Railsback *et al.* (2006) e Luck *et al.* (2004). Além disso, avaliou-se aspectos como custo, disponibilidade de documentação, portabilidade, facilidade de integração com outras ferramentas, facilidade de aprendizado, disponibilidade de recursos gráficos para visualização dos resultados, adequabilidade para estudos das ciências

sociais e maturidade e aceitação da ferramenta perante a comunidade científica da área. O Anexo C apresenta maiores detalhes sobre a ferramenta Repast;

- O resultado esperado dessa etapa é um conjunto de agentes programados corretamente em linguagem Java;

4. Testes, experimentos, análises e interpretações

- Nessas últimas etapas do método procura-se explorar o modelo de simulação construído para validá-lo (interna e externamente) e para realizar análises e interpretações acerca dos resultados;
- A modelagem da cadeia produtiva do Biodiesel foi escolhida como a instância de problema para avaliar a aplicabilidade do modelo proposto. Entende-se que essa é uma cadeia apropriada para demonstrar a necessidade de modelar cadeias de suprimento sob a ótica dos sistemas multi-agentes normativos, uma vez que é uma cadeia regulada pelo governo e por agências de energia;
- O Anexo D apresenta em detalhes o contexto de estudo de caso, ou seja, a cadeia produtiva do Biodiesel. Nessa etapa de trabalho foram realizadas diversas visitas a uma empresa produtora de Biodiesel que está se instalando no Noroeste gaúcho (resguarda-se seu nome e dados mais específicos coletados a pedido da própria empresa), onde foi possível realizar entrevistas com profissionais da área, acompanhar rotinas de pedido de matérias-primas, planejamento da produção, controle de estoque, cálculo de custos de produção. Além disso, foram realizadas visitas a cooperativas que recebem grãos e produzem óleo, em particular a Cooperativa Mista General Osório de Ibirubá-RS, foram coletados dados em sítios especializados sobre o assunto, foram analisados diversos artigos, dissertações sobre o tema, além de participar de palestras técnicas sobre agronegócio e mini-cursos. Todas estas atividades propiciaram um melhor entendimento sobre o contexto e

funcionamento da cadeia produtiva do biodiesel, além de possibilitar a identificação de algumas situações problemáticas a serem simuladas;

- O capítulo 6 apresenta a modelagem da cadeia produtiva do Biodiesel a partir do modelo de agentes proposto nesse trabalho, os dados de entrada para as simulações e os resultados obtidos com os experimentos;
- O resultado esperado dessa etapa é a definição de um modelo baseado em agentes voltado para estudar aspectos de regulação no contexto da cadeia do biodiesel, além da validação do modelo proposto nas etapas 2 e 3 do método de pesquisa apresentado nessa seção.

5 MODELO DE SIMULAÇÃO PARA CADEIAS DE SUPRIMENTO

Este capítulo apresenta a modelagem de um conjunto de agentes voltado para simulação de cadeias de suprimento que faz uso dos conceitos de agentes normativos. Inicialmente, apresenta-se as premissas básicas para a construção de sistemas multi-agentes normativos, após apresenta-se o modelo conceitual de cadeia de suprimento utilizado para modelagem dos agentes e, por fim, na última seção, apresenta-se a estruturação do modelo propriamente dito.

5.1 SISTEMAS MULTI-AGENTES NORMATIVO

Um sistema multiagente, ou sociedade, é definido como um conjunto de agentes onde cada qual pode trabalhar em nome de diferentes tipos de entidades cujo objetivo deve satisfazer. Em sociedades como essa, não é raro haver conflito de interesses entre agentes, para evitar essas situações ou, pelo menos, minimizar, a introdução de normas para reger comportamentos torna-se indispensável.

Normas podem ser definidas como um tipo especial de restrição, definindo um padrão de comportamento para os agentes (BOELLA *et al.*, 2006). Uma norma também pode ser definida como um mecanismo que a sociedade utiliza para influenciar o comportamento dos agentes que fazem parte dela (LÓPEZ e LUCK, 2003). Podem ser criadas a partir de diferentes fontes, podendo variar desde um simples acordo de cooperação ou contrato de relacionamento entre os agentes, até regras estabelecidas conforme um sistema legal mais complexo. Nesse sentido, um agente pode estar sujeito a um conjunto de normas que são representadas como uma estrutura de dados relacionada a regras sociais.

López e Luck (2003) explicam que há diferentes aspectos a considerar a respeito da utilização de normas em sistemas multi-agentes. Primeiro, as normas

são sempre direcionadas a um conjunto de agentes “alvo”, podendo ter outros agentes como “beneficiários”. Elas especificam alguma ação que deve ser feita e, por conseqüência, incluem objetivos normativos que devem ser satisfeitos pelos destinatários. Segundo, as normas nem sempre são aplicáveis em caráter obrigatório, há exceções onde os agentes não são obrigados a cumpri-las, sua ativação depende do ambiente e do estado corrente do agente. E ainda, as normas sugerem a existência de recompensas e punições, o comportamento normativo de um agente não pode ser garantido somente pelo estabelecimento de normas, pois a prioridade de qualquer agente é satisfazer seus objetivos antes de estar de acordo com o cumprimento de normas. Desse modo, cada agente deve avaliar o impacto positivo ou negativo das normas sob seus objetivos e a sociedade deve possuir mecanismos para incentivar e recompensar aqueles que cumprirem as normas propostas.

Um agente normativo, portanto, pode ser definido como um agente autônomo capaz de adotar, deliberar e agir de acordo com normas, respeitando seus objetivos e preferências (LÓPEZ *et al.*, 2005). Assim, seu comportamento é parcialmente determinado por obrigações a cumprir, proibições que limitam seus objetivos, comprometimentos sociais que precisam ser criados durante seu ciclo de vida e códigos sociais que representam satisfação social para o agente. Em síntese, a ação de um agente normativo ocorre a partir da sua interação com um sistema de normas, podendo segui-las ou não.

A Figura 7 apresenta a arquitetura básica de um agente normativo. De acordo com o esquema apresentado, o processo de adoção de uma norma é baseado nas crenças, nas motivações e nos objetivos de um agente. Para um agente adotar uma norma é necessário que ele a reconheça, através de sua percepção, que ele não a tenha adotado ainda e que a norma tenha sido expedida por uma autoridade reconhecida.

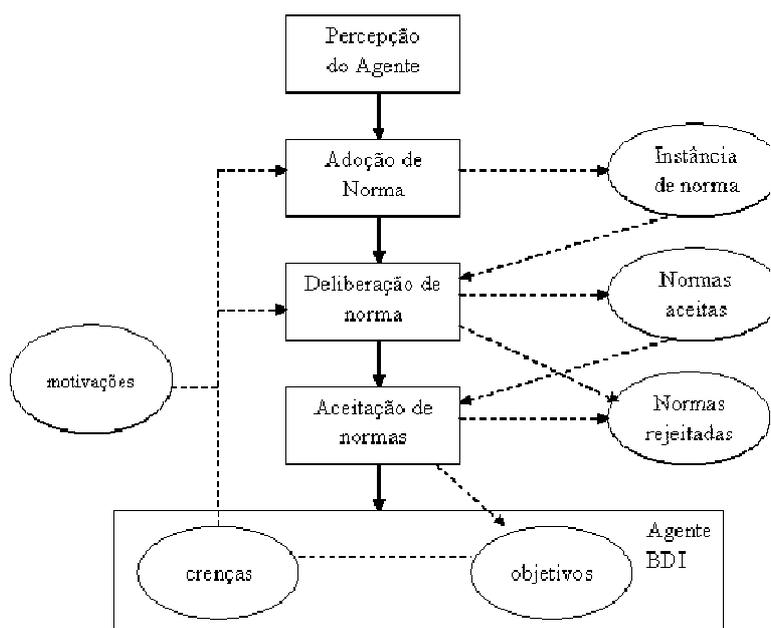


Figura 7 – Arquitetura de um agente normativo

Fonte: López *et al.* (2005)

O processo de deliberação de uma norma envolve a avaliação de dois aspectos: objetivos que o agente deixa de realizar (perdas, caso a norma seja adotada) e os benefícios associados com a adoção da norma (recompensas, caso a norma seja adotada). O processo de deliberação divide as normas em dois grupos: aceitas e rejeitadas. Uma vez que o agente deliberou sobre quais normas deve cumprir, um novo processo se inicia para atualizar seus objetivos e adaptar seu comportamento.

A estruturação do modelo de simulação apresentado na seção seguinte utiliza esse modelo como principal referencial. Os demais componentes do modelo de sistemas normativos de Lopez *et al.* (2005) são descritos a seguir, conforme representação em UML na Figura 8:

- Agentes normativos (*NormativeAgent*): esse agente especifica um modelo de comportamento que deve ser seguido pelos agentes derivados, tais agentes funcionam conforme esquema apresentado na Figura 7, tendo capacidade para adotar, deliberar, aceitar normas e contabilizar reforços e punições;

- Agentes legisladores (*LegisladorAgent*): são agentes que tem capacidade para criar, modificar e abolir normas que circulam no sistema multi-agente;
- Agentes reguladores (*RegulatorAgent*): são agentes que devem dar reforço ou aplicar punições a outros agentes de acordo com as normas estabelecidas;
- Normas (*Norm*): estrutura de dados auxiliar que armazena e define as normas que regulam o comportamento dos agentes. O Quadro 3 apresenta alguns exemplos de instâncias normas;
- Conjunto de Normas (*SetOfNorm*): estrutura de dados auxiliar utilizada pelo *LegisladorAgent* para criar e abolir normas obsoletas;

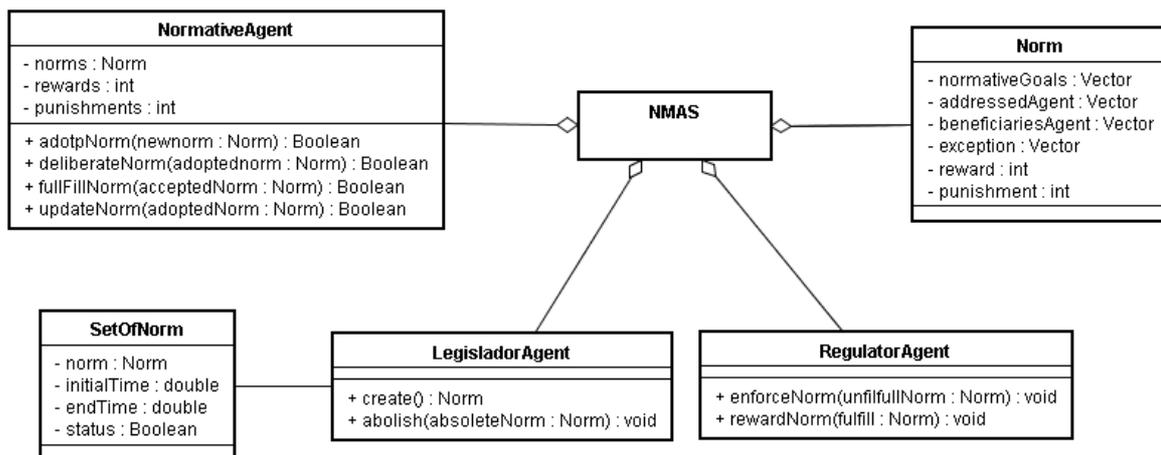


Figura 8 – Tipos de agentes em um NMAS

Fonte: Adaptado de López *et al.* (2005)

Normas, em geral, são introduzidas em uma sociedade como um mecanismo para atingir ordem social. Algumas normas têm como objetivo evitar conflitos entre agentes, outras permitir o estabelecimentos de compromissos de relacionamento e outras ainda buscam unificar comportamentos. Entretanto, nem todos os relacionamentos e nem todos os conflitos podem ser antecipadamente resolvidos e controlados por normas, por conseqüência, o sistema multi-agente pode prever dinamicamente a criação de novas normas, modificar normas existentes e abolir aquelas que tornarem-se obsoletas. Além disso, de acordo com o modelo de López *et al.* (2005), subentende-se que essas ações devem ser realizadas por um conjunto

restrito de agentes em situações particulares para evitar a imposição de normas, dando margem para aumentar o número de conflitos entre os agentes.

Nota-se que sistemas normativos são dinâmicos por natureza, isto é, novas normas podem ser criadas e normas obsoletas podem ser abolidas durante a simulação, cumprir uma norma pode significar avaliar ou estar sujeita a outras. Nesse trabalho, considera-se que as normas são criadas antecipadamente. A dinâmica do próprio sistema multi-agente criar normas durante a simulação e a resolução de conflitos que podem emergir em função dela, foge do escopo inicial desse trabalho.

Exemplos Atributos	1	2	3
NormativeGoal	Pagamento de IPVA	Combustível social	Distribuição biodiesel
AddressedAgent	Proprietários veículos	Usinas de biodiesel	Base de distribuição
BeneficiariesAgent	Governo estadual	Agricultura familiar	Usinas de Biodiesel
Exceptions	Modelo > 20 anos	-	-
Reward	Desconto de 5%	COFINS 0,07%	Permanecer na cadeia
Punishments	Perda de desconto	COFINS 0,222	Excluir da cadeia

Quadro 3 – Exemplo de instâncias normas

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 MODELO CONCEITUAL DE CADEIA DE SUPRIMENTO

Uma cadeia de suprimento pode ser definida “como sendo uma rede de entidades de negócios autônomas ou semi-autônomas responsáveis coletivamente pelas atividades de aquisição, produção e distribuição associadas com uma ou mais famílias de produtos” (SWAMINATHAN *et al.*, 1998). Ou ainda, pode ser definida como “um sistema cujas partes constituintes incluem fornecedores de materiais, plantas de produção, serviços de distribuição e clientes interligados por fluxos de envio de materiais e solicitação de informações” (TOWILL, 1996).

A Figura 9 apresenta um modelo de cadeia de suprimento de quatro estágios, conhecido na literatura especializada da área como o Jogo da Cerveja (*Beer Game*), desenvolvido pelo Grupo de Dinâmica de Sistemas do *Sloan School of Management* na década de 60. Nesse modelo, cada jogador gerencia um dos componentes da cadeia de suprimentos. A cada semana, o gerente do elo Varejista observa a demanda externa, atende da melhor forma possível esta demanda, registra os itens que não foram atendidos e faz um pedido ao elo Atacadista. Por sua vez o gerente do elo Atacadista observa a demanda do Varejista, atende a demanda da melhor maneira possível, registra os itens não atendidos e encaminha pedido ao Distribuidor. O gerente do elo Distribuidor repete este processo, solicitando um pedido para a Fábrica. Finalmente, o gerente da fábrica, após observar e atender a demanda e os pedidos em carteira inicia a produção. O processamento dos pedidos e atrasos no atendimento são incorporados ao jogo para representar os *lead times* de processamento de pedido, transporte e produção (SIMCHI-LEVI, p. 290, 2003).

Além disso, cada gerente de estágio tem apenas informações locais, somente o gerente do elo varejista conhece a demanda do cliente. A meta de cada jogador é minimizar o custo total de estocagem e de penalidades por não entregar algum item (custo de falta de estoque) no estágio que se está gerenciando. A cada semana é acumulado um custo de US\$ 0,50 para cada unidade em estoque e US\$ 1,00 para cada unidade não atendida. O tempo de envio de pedido e o tempo de entrega são pré-definidos em uma e duas semanas, respectivamente. Uma “partida” normal demanda 25 a 30 semanas, a demanda do cliente é fixa em 4 unidades por semana durante quatro semanas, passando a 8 unidades semanais até o final. Através do Jogo da Cerveja Informatizado, diferentes variações nos parâmetros do jogo podem ser avaliadas e testadas pelo jogador.

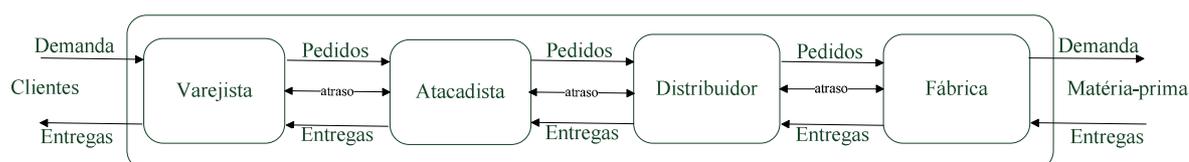


Figura 9 – Modelo de cadeia de suprimento de Jay Forrester

Fonte: Towill (1996)

Apesar da simplicidade, o modelo de Jay Forrester constitui um bom ponto de partida para definição das necessidades de um modelo voltado para simulação de cadeias de suprimento. Cadeias do mundo real podem apresentar variações no que diz respeito ao número e as funcionalidades de cada estágio, mas, em linhas gerais, cada estágio é formado pelos seguintes elementos, conforme Towill (1996):

- Demanda percebida por produtos;
- Processo de produção ou adição de valor agregado;
- Informações sobre desempenho;
- Atrasos para envio e recebimento de pedidos;
- Regras de decisão para alterar níveis de estoque, solicitar pedidos e disponibilizar informações;

5.3 MODELAGEM DOS AGENTES

A partir do modelo conceitual de agentes normativos (seção 5.1) e do modelo conceitual de cadeia de suprimento (seção 5.2) elaborou-se a estrutura básica do modelo de simulação apresentado na Figura 10. De acordo com a estrutura apresentada, inicialmente, um agente genérico (*SCMAgent*) herda as funcionalidades de um agente normativo. A partir desse agente, duas classes principais de agentes são definidas, estruturação semelhante a utilizada por Swaminathan *et al.* (1998) e Cavalieri *et al.* (2003): (1) agentes estruturais: para representar os atores da cadeia e, (2) agentes de controle: para gerenciar processos e tomar decisões.

As seções seguintes descrevem o comportamento de cada um dos agentes presentes no modelo, a arquitetura utilizada para descrever o comportamento dos agentes está descrita em detalhes no Anexo B. Futuramente, novos agentes podem ser adicionados ao modelo, inicialmente busca-se um conjunto de agentes que possam ser utilizados para validar as idéias de utilização de agentes normativos em

cadeias de suprimento, bem como o desenvolvimento de um modelo de simulação que pode ser facilmente ampliado para novas aplicações e contextos.

Em alguns casos, a representação lógica do comportamento dos agentes é realizada com a utilização de diagramas de atividades da linguagem de modelagem UML (BOOCH *et al.*, 1999), em outros, com a utilização de português estruturado.

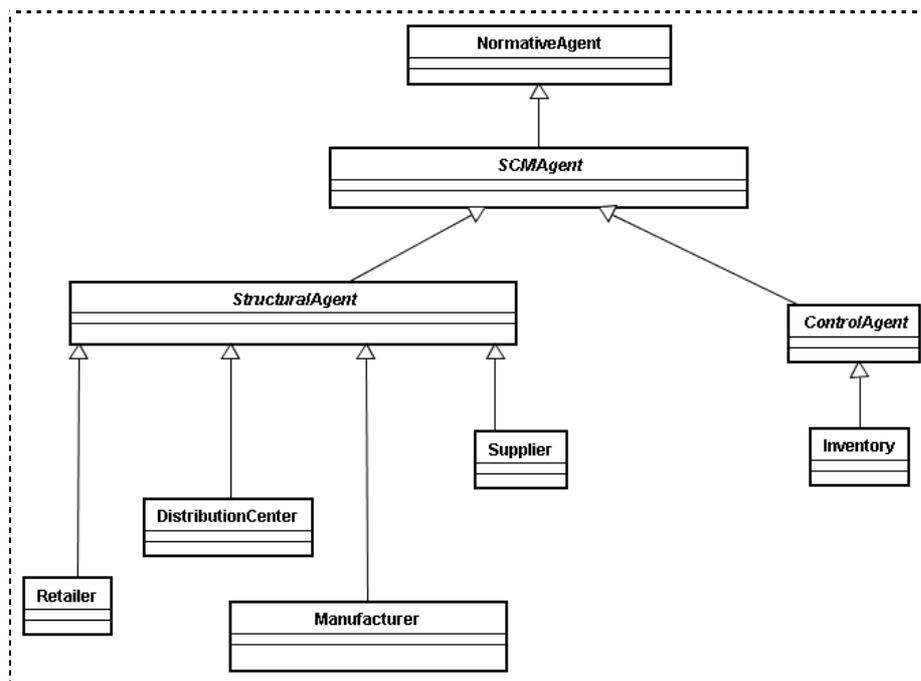


Figura 10 – Hierarquia de agentes do modelo de simulação

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.1 NormativeAgent

Este agente foi projetado a partir do modelo proposto por López *et al.* (2005) apresentado na seção 5.1, apresenta funcionalidades básicas para a comunicação com os outros agentes, para a recepção e a deliberação de normas. Há quatro funcionalidades principais a respeito desse agente que merecem ser destacadas:

1. Receber normas enviadas pelo *LegislatorAgent*;
2. Deliberar normas para adoção pelos demais agentes do modelo;
3. Atualizar normas quando o *LegislatorAgent* assim comunicar;

4. Processar incentivos e punições enviados pelo *RegulatorAgent*, ver Figura 13;

O processo de deliberação de uma norma, conforme López *et al.* (2005), é baseado no incentivo que está relacionado com a adoção da norma (*reward*) e na punição (*punishment*) associada com seu descumprimento. Assim, se o resultado da diferença for um valor positivo, o agente faz a opção pela adoção da norma, caso contrário, o agente desconsidera sua adoção. No atual modelo, está sendo considerada a modelagem de dois tipos principais de normas que impactam em variáveis de estado diferentes. A adoção do primeiro tipo de norma impacta na rede de relacionamentos do agente, ou seja, sugere a proibição de relacionamentos, enquanto que o segundo tipo impacta no nível de produção, no custo de produção ou no custo de fornecimento, dependendo do tipo de agente alvo. Desse modo, cada vez que uma norma é criada, a mesma é enviada para os agentes alvos e beneficiários para deliberação e atualização das suas variáveis de estado, caso necessário, conforme diagrama de atividades apresentado na Figura 11.

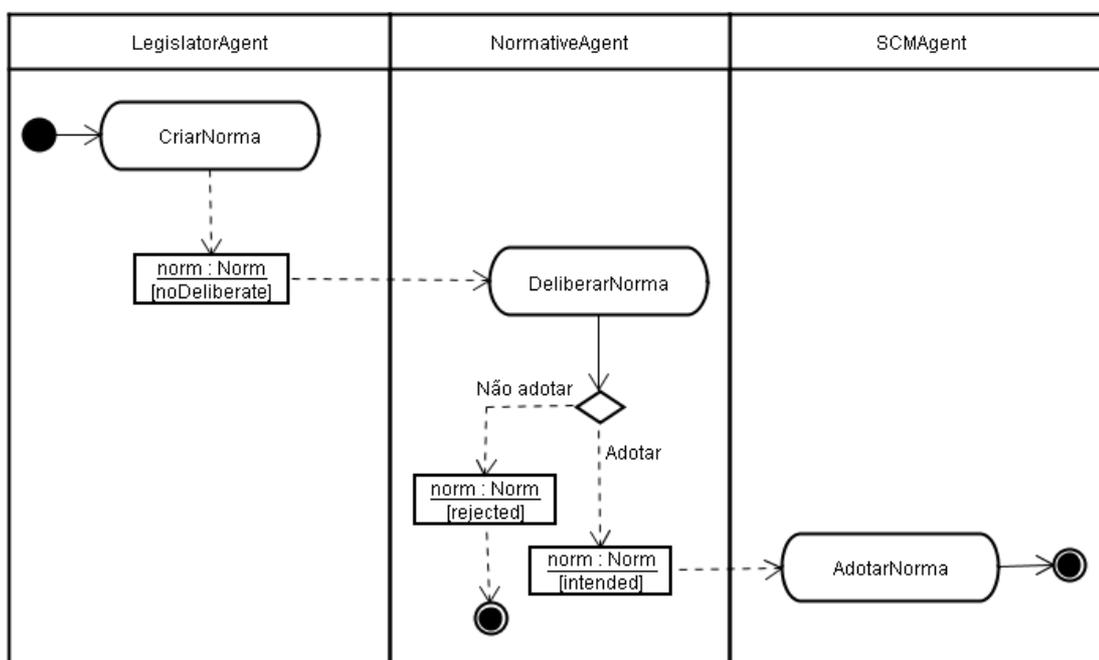


Figura 11 – Diagramas de atividades do agente NormativeAgent

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.2 LegislatorAgent

De acordo com o exposto na seção 5.1, normas são introduzidas numa sociedade com o objetivo de regular comportamentos e atingir ordem social. De acordo com o modelo proposto, essa atividade deve ficar sob a responsabilidade de um único agente para evitar divergências e possíveis conflitos no estabelecimento de normas. Nesse contexto, o *LegislatorAgent* possui as seguintes funcionalidades: (1) criar novas instâncias de normas, no tempo certo, de acordo com o estabelecido previamente em banco de dados próprio; (2) enviar novas normas aos agentes normativos para deliberação; (3) atualizar normas existentes, se for o caso; e, (4) remover normas obsoletas. O diagrama de atividade desse agente é apresentado na Figura 12.

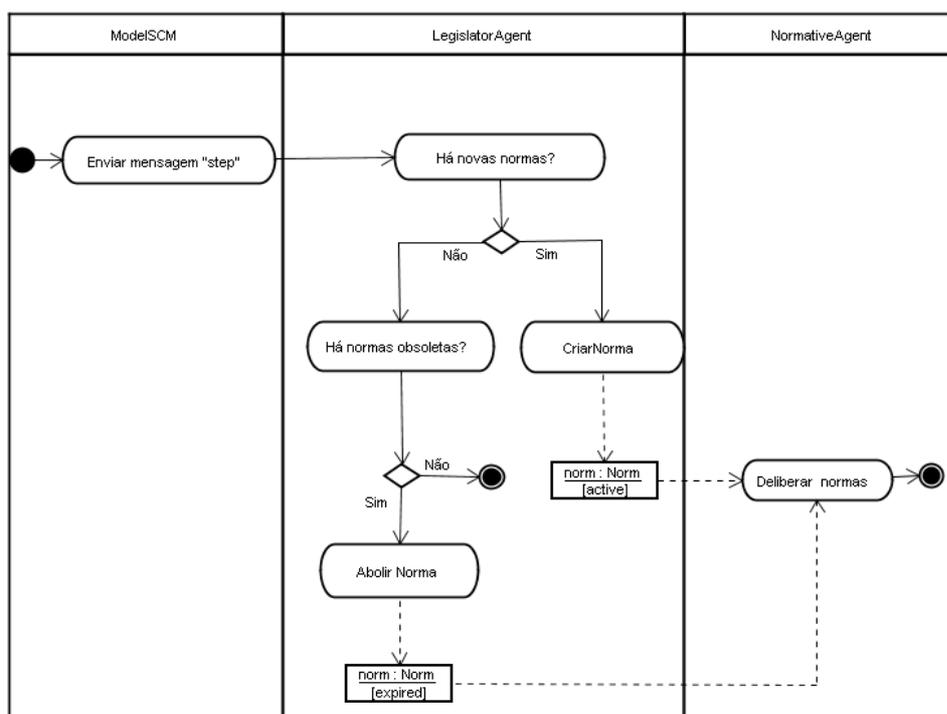


Figura 12 – Diagrama de atividades do agente LegislatorAgent

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.3 RegulatorAgent

Após o processo de deliberação, as normas são divididas em dois tipos, rejeitadas (ou não adotadas) e aceitas (ou adotadas). A função do *RegulatorAgent* é enviar incentivo aos agentes que optaram por aceitar a norma proposta pelo *LegislatorAgent* e enviar punição correspondente àquela norma que não foi adotada pelo agente. Incentivos ou punições, no atual modelo, podem corresponder

simplesmente a valores numéricos que são adicionados a variáveis de estado do agente ou podem corresponder a limitações nos relacionamentos do agente. A Figura 13 apresenta o diagrama de atividades corresponde ao comportamento deste agente.

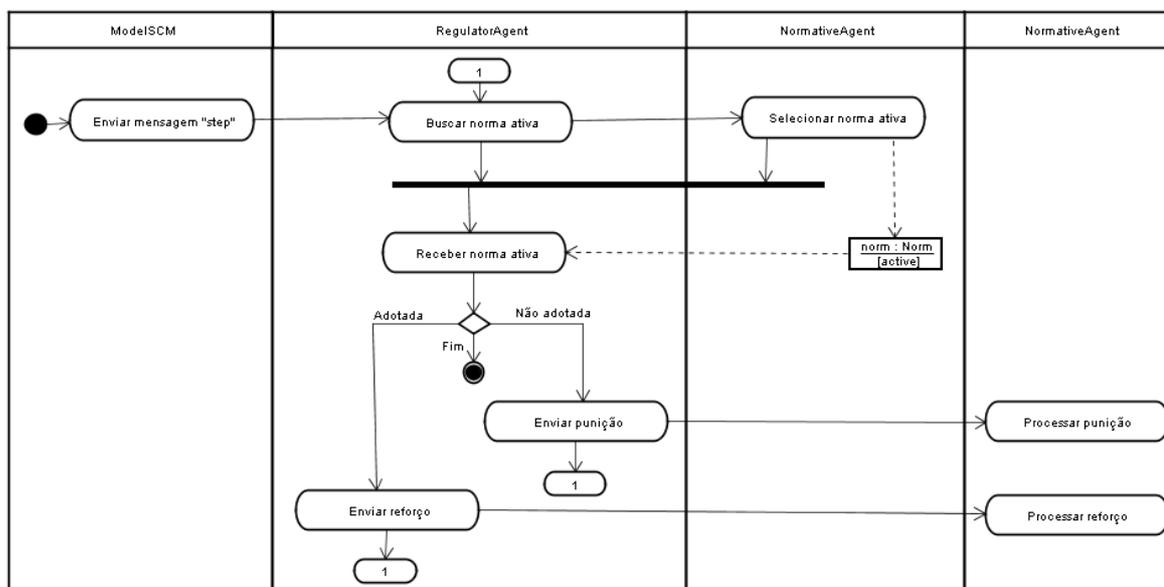


Figura 13 – Diagrama de atividades do agente RegulatorAgent

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.4 Inventory

Agentes do tipo *Inventory* são responsáveis por gerenciar estoque de matéria-prima e realizar pedidos aos fornecedores, os atributos e principais funcionalidades são apresentados na Figura 14.

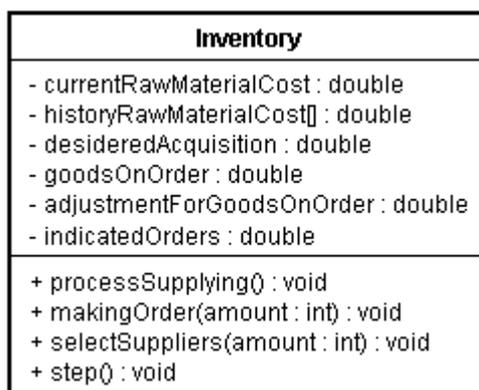
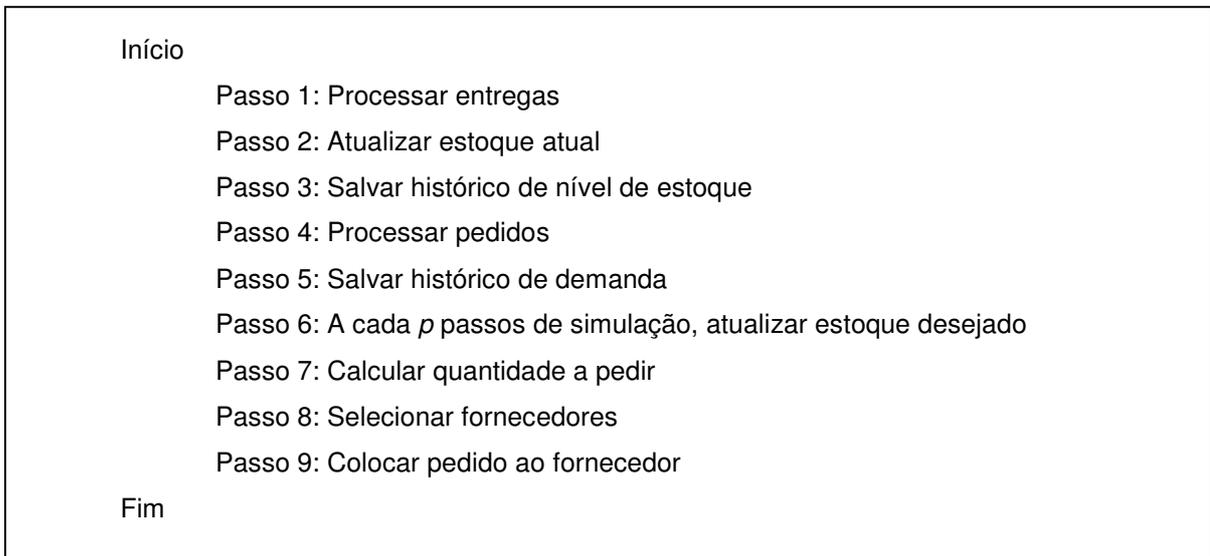


Figura 14 – Inventory – atributos e operações

Fonte: Elaborado pelo autor

O método *step*, chamado a cada passo de simulação, coordena todas as demais funcionalidades do agente, os passos básicos de seu funcionamento são apresentados a seguir:



O nível de estoque de cada matéria-prima (nível desejado) é calculado de acordo com as seguintes informações:

- *MED*: demanda média;
- *DSV*: desvio padrão da demanda média;
- *L*: tempo de reabastecimento do fornecedor;
- *z*: nível de serviço, ou seja, implica que a probabilidade de falta de estoque é $1 - \alpha$;

A partir desses dados, calcula-se o ponto de estoque máximo (*S*), conforme Equação 1 (SIMCHI-LEVI, 2003, p. 74):

$$S = LxMED + zxDSVx\sqrt{L} \quad (1)$$

A primeira parte da Equação 1 ($LxMED$) assegura que existirá estoque suficiente durante o tempo de reabastecimento do fornecedor (*lead time*), enquanto

que a segunda parte da Equação 1 ($z\alpha DSVx\sqrt{L}$) corresponde a quantidade de estoque que o agente deve manter em estoque e em trânsito para se proteger contra os desvios da demanda média, ou seja, corresponde ao estoque de segurança. A quantidade a pedir é calculada conforme Equação 2 (STERMAN, 2000).

$$q = S - (\text{pedidos em trânsito}) - (\text{estoque atual}) \quad (2)$$

A seleção dos fornecedores é realizada através de um procedimento heurístico inspirado no Problema da Mochila (GOLDBARG *et al.*, 2005). Em síntese, nesse problema tem-se n objetos a serem armazenados em uma mochila, onde cada um tem um peso e uma utilidade, o problema consiste em definir quais objetos escolher de tal modo que o peso total não seja maior que a capacidade da mochila e o somatório das utilidades seja o maior possível. A idéia principal, portanto, é maximizar a utilidade de cada objeto transportado. A formulação matemática para o Problema da Mochila é a seguinte:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{j=1}^n c_j v_j \\ \text{Sujeito a:} \quad & \\ & \sum_{j=1}^n w_j \leq K \end{aligned}$$

Onde:

c_j : custo do item j ;

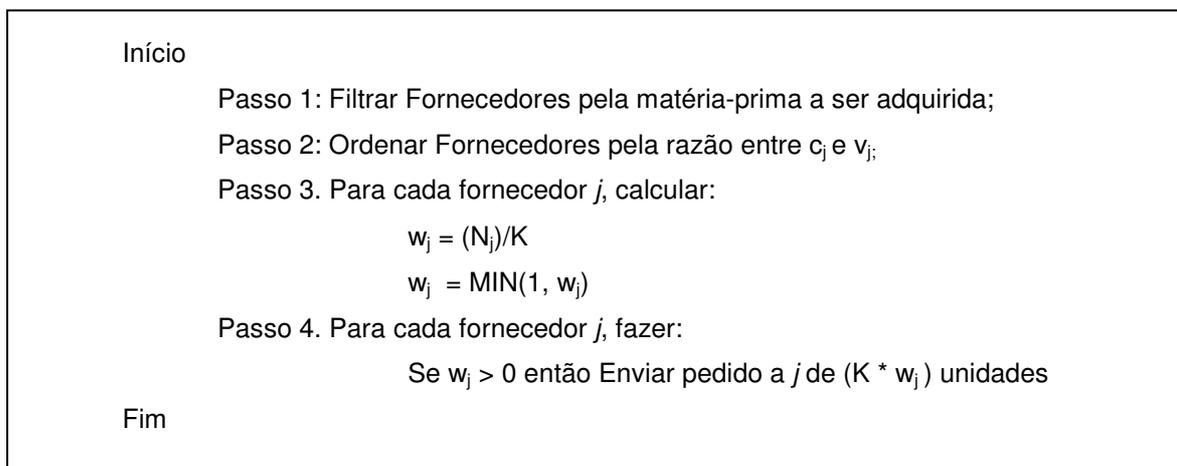
v_j : utilidade do item j ;

w_j : peso do item j ;

K : capacidade da mochila.

A heurística desenvolvida para a escolha dos fornecedores considera uma quantidade total que será adquirida dos fornecedores (K), o custo de fornecimento (c_j), a utilidade de cada fornecedor (v_j), a proporção de fornecimento em relação à

quantidade total (w_j), além da capacidade máxima de fornecimento (N_j). Os passos da heurística desenvolvida são os seguintes:



O diagrama de atividades apresentado na Figura 15 ilustra o relacionamento desse agente com um elo fornecedor qualquer, bem como a seqüência de passos executada para atendimento de uma demanda qualquer.

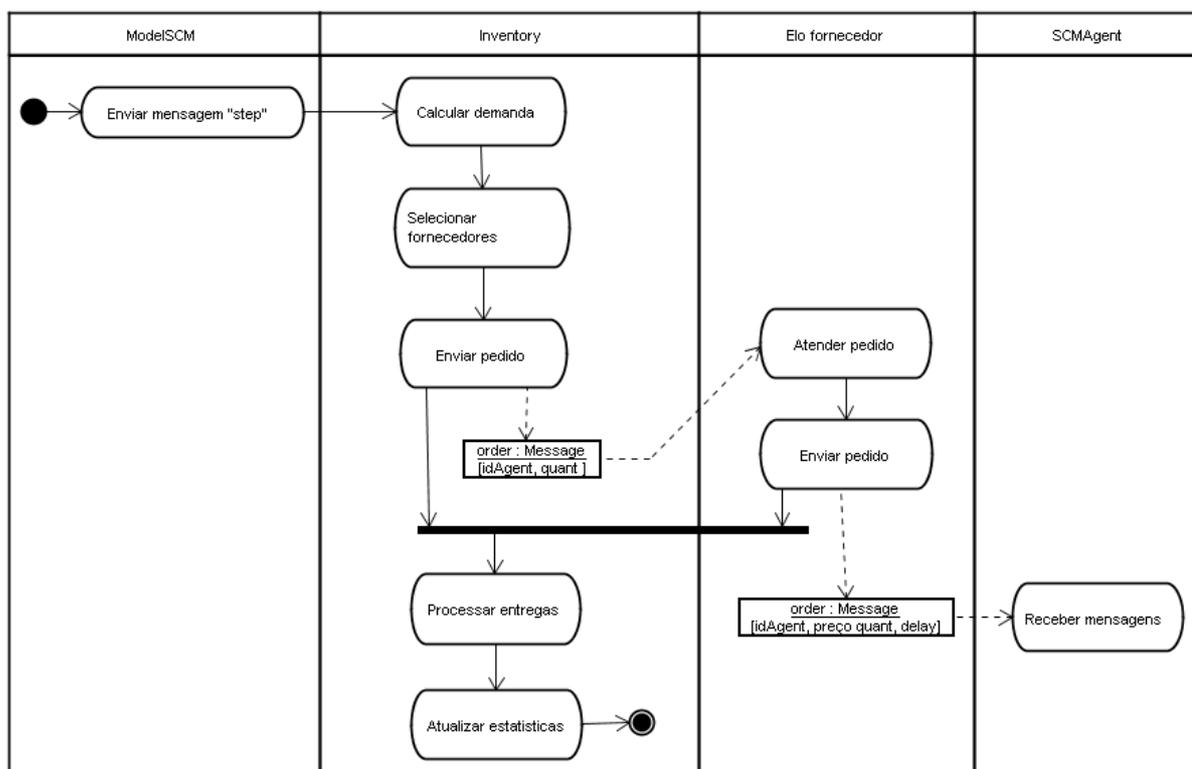


Figura 15 – Diagrama de atividades do agente Inventory

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.5 SCMAgent

O SCMAgent é um agente genérico derivado de um agente normativo, seus atributos e operações estão representadas na Figura 16.

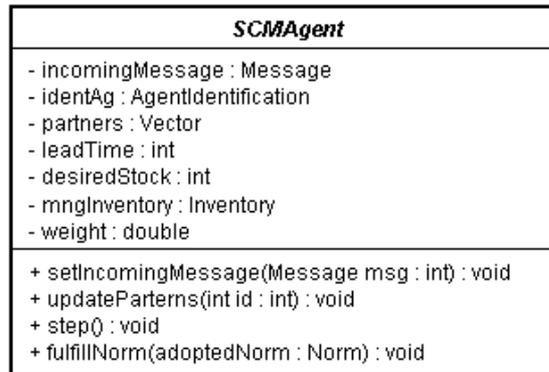


Figura 16 – SCMAgent – atributos e operações

Fonte: Elaborado pelo autor

Este agente apresenta três funcionalidades principais que são utilizadas por todos os demais agentes derivados dele:

- armazenar as mensagens de entrada para posterior processamento. As mensagens podem representar pedidos oriundos da cadeia *downstream*, entrega de pedidos realizada pelos fornecedores da cadeia *upstream* ou, ainda, normas enviadas pelos agentes normativos. Cada agente derivado deste fará o tratamento adequado as mensagens recebidas conforme sua especificidade;
- atualizar a lista de agentes parceiros com os quais o agente mantém relacionamento durante a simulação. Para realizar essa atividade o agente recebe como parâmetro o identificador do produto ou matéria-prima pelo qual o agente tem interesse e pesquisa na base de dados do ambiente qual o agente que é capaz de fornecê-lo. Após essa pesquisa, atualiza a variável correspondente (*partners*, nesse caso);
- atualizar a relação de agentes parceiros quando do recebimento de normas. Nesse caso, a relação de agentes parceiros é atualizada de acordo com a

atributo *beneficiariesAgent* da estrutura de dados auxiliar *Norm*, conforme apresentado na Figura 8.

Além dessas três funcionalidades principais, cada agente dessa natureza possui uma variável que denota sua utilidade (*weight*) e um agente do tipo *Inventory*. A variável de utilidade é utilizada pela heurística de seleção de fornecedores (seção 5.3.4). O agente *Inventory*, por sua vez, é utilizado toda vez que se fizer necessário solicitar algum pedido a um fornecedor ou para calcular os níveis de estoque necessário para um dado item, seja ele matéria-prima ou produto acabado. Com isso, todos os agentes seguem a mesma lógica de gerenciamento de estoque e seleção de fornecedores. Futuramente, outros agentes podem ser desenvolvidos para esse fim, possibilitando uma diversidade maior de estratégias de gerenciamento de estoque.

O *SCMAgent* agente agrega algumas funcionalidades comuns aos agentes voltados para cadeias de suprimento, com isso, a partir dele, pode-se criar diferentes agentes de acordo com seu papel em uma cadeia, tal como cliente, varejista, atacadista, centro de distribuição, transporte, fornecedor, produtor, entre outros. Os agentes apresentados nas seções a seguir são todos derivados de *SCMAgent* e acrescentam alguma funcionalidade específica a ele.

5.3.6 Customer

Os agentes *Customer* são utilizados no modelo de simulação para representar a demanda externa por um determinado item, representam, na verdade, a demanda da cadeia de suprimentos. Cada agente desse tipo pode ter diferentes necessidades em termos de produto e quantidade. A Figura 17 os atributos e os métodos desse agente.

A demanda do agente é modelada segundo uma distribuição de probabilidade, atualmente, o modelo suporta as seguintes: binomial, constante, exponencial, gama, hipergeométrica, normal, poisson, uniforme, triangular e mErlang.

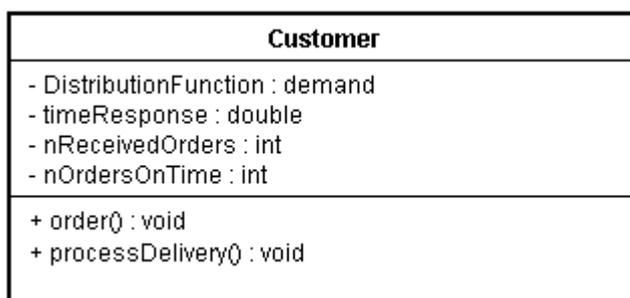


Figura 17 – Customer – atributos e operações

Fonte: Elaborado pelo autor

A cada passo de simulação, o agente realiza um pedido de acordo com sua demanda, um agente do tipo *Inventory* é utilizado para seleção dos fornecedores. Após, quando houver entregas no passo de simulação corrente, são atualizadas estatísticas a respeito de número de entregas recebidas (*nReceivedOrders*), tempo de entrega (*timeResponse*) e número de entregas realizadas no prazo (*nOrdersOnTime*). A Figura 18 apresenta o diagrama de atividades desse agente, as funcionalidades do agente *Inventory* são apresentadas de forma simplificada, maiores detalhes são descritos na seção 5.4.4.

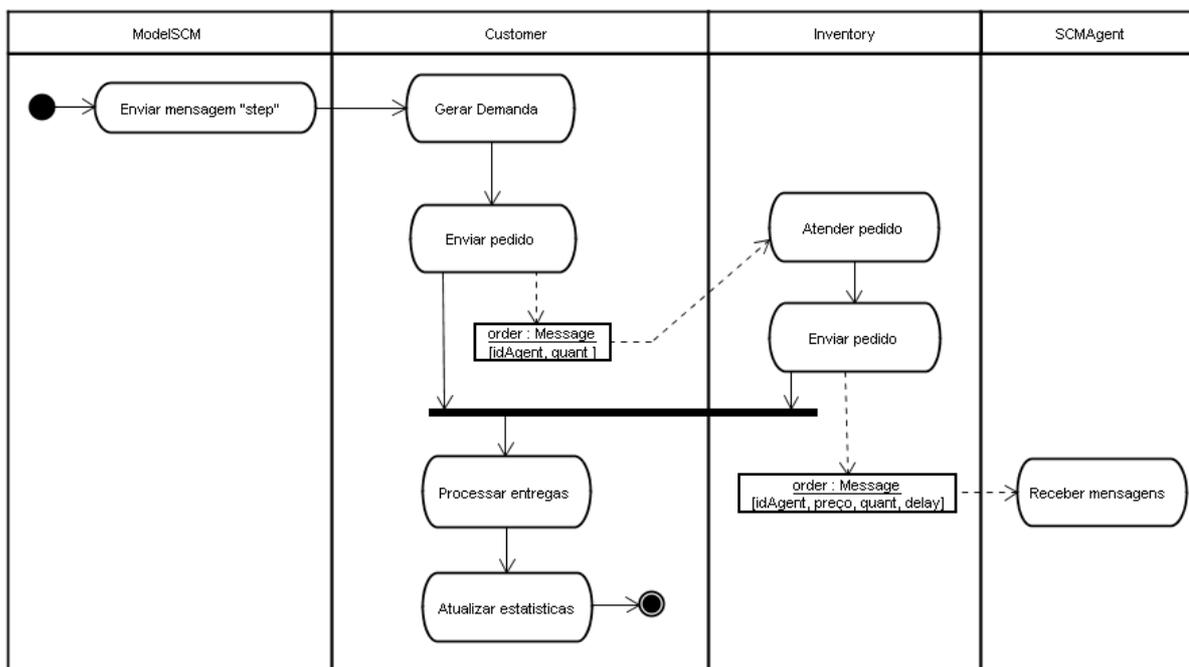


Figura 18 – Diagrama de atividades do agente Customer

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.7 Manufacturer

O agente *Manufacturer* representa a fábrica ou usina onde os produtos são montados ou produzidos. Cada produto acabado tem uma combinação de matérias-primas que devem ser supridos pelos fornecedores, portanto, cada produto está relacionado a um BOM (*Bill of Materials*). Esse agente pode atender distribuidores, varejistas ou atacadistas, dependendo de como a cadeia de suprimentos está estruturada. As etapas de produção e o material em processo não são modeladas, para efeito de simulação, o agente utiliza as matérias-primas do estoque (caso houver, senão realiza pedido) e após um determinado período de tempo, relacionado ao tempo de produção, estes componentes se tornam produtos acabados. A Figura 19 apresenta os atributos e métodos desse agente.

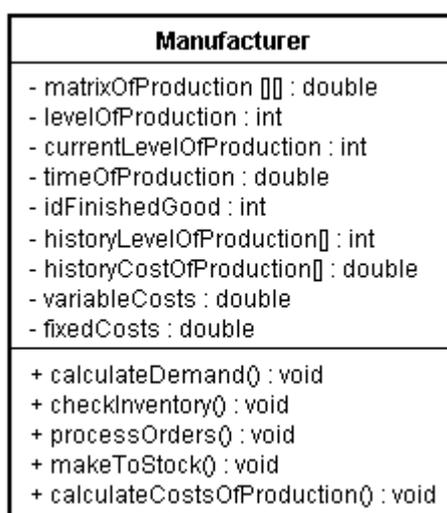


Figura 19 – Manufacturer – atributos e operações

Fonte: Elaborado pelo autor

A cada passo de simulação o agente determina o nível de produção mais adequado para atender a demanda. A produção estimada a cada passo de simulação leva em consideração o estoque de segurança desejado para o produto, a demanda atual (do passo de simulação) e o estoque atual, conforme Equação 3.

$$\textit{produção estimada} = \textit{estoque de segurança} + \textit{demanda corrente} - \textit{estoque atual} \quad (3)$$

Posteriormente, o nível de produção que será efetivamente simulado é determinado pela escolha do menor valor entre a capacidade produtiva máxima do agente e a produção estimada, conforme Equação 4.

$$\text{produção efetiva} = \text{MIN}(\text{capacidade produtiva}, \text{produção estimada}) \quad (4)$$

O nível de produção estipulado pode ser comprometido caso não se tenha matérias-primas suficientes em estoque, por esse motivo, um agente *Inventory* é utilizado para gerenciar o estoque das matérias-primas desse agente. Nem sempre o agente irá conseguir produzir de acordo com o nível de produção estimado, pois nem sempre as matérias-primas estão disponíveis na quantidade necessária. A cada passo de simulação uma mensagem é enviada ao agente *Inventory* com a quantidade de matéria-prima necessária a para produção estimada (Equação 4), de acordo com esse dado, o agente avalia a necessidade de pedido aos fornecedores.

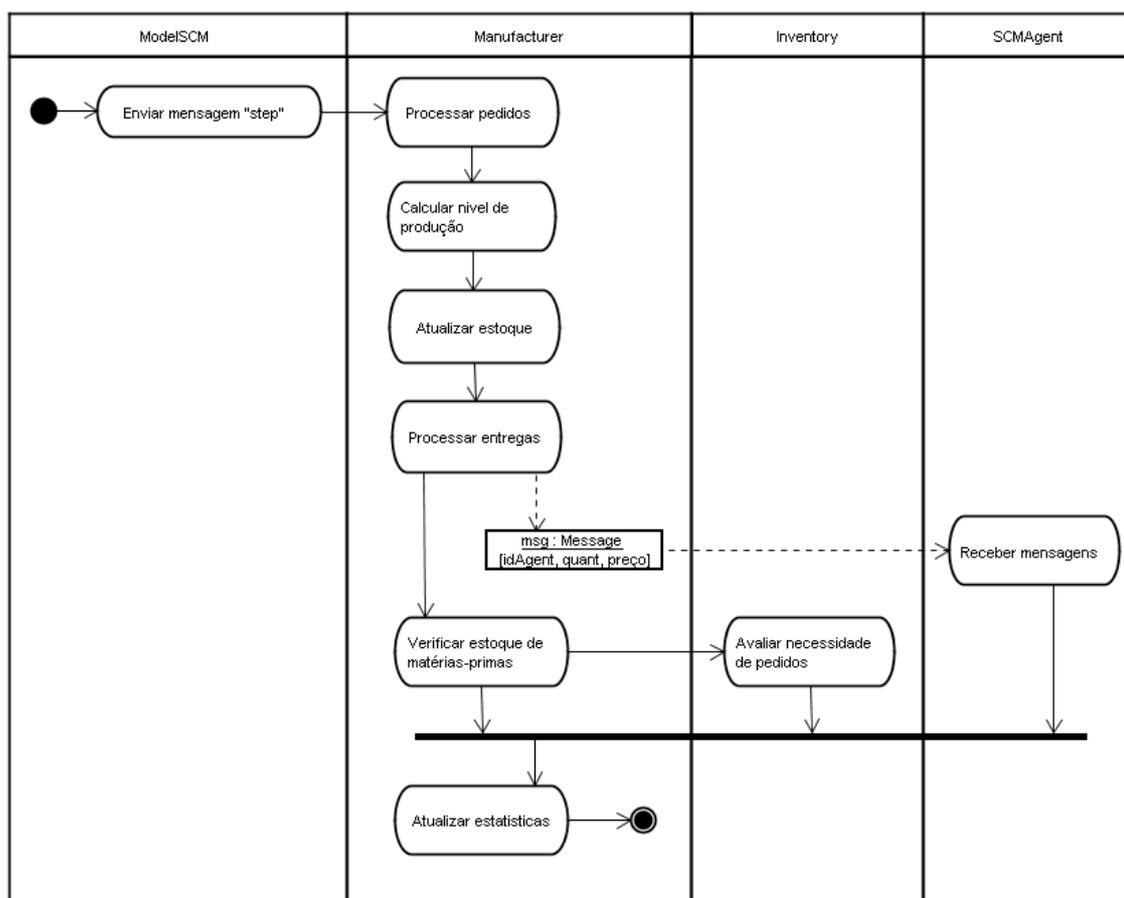


Figura 20 – Diagrama de atividades do agente Manufacturer

Fonte: Elaborado pelo autor

Antes de iniciar a produção, o agente determina quanto será possível produzir com a quantidade de matéria-prima em estoque, atribui-se um percentual a esse indicador. Este valor indica uma escala de produção entre 0 e 100% em relação a quantidade de produção efetivamente determinada (Equação 4) para o corrente

passo de simulação. Essa taxa pode ser comparada a um nível de serviço do agente, o objetivo, logicamente, passa a ser maximizar esse indicador. Após a produção, é atualizado o histórico de produção, o histórico de estoque do produto. A Figura 20 apresenta o diagrama de atividades desse agente.

O objetivo deste tipo de agente, conforme já mencionado, é fazer o melhor uso possível da sua capacidade produtiva, armazenando o menor estoque possível. A função de produção para cada agente k do modelo pode ser representada através da Equação 5:

$$y_i = a \sum_{j=1}^m B_{ij} D_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Onde:

n : número de produtos montados ou produzidos pelo agente;

m : quantidade de matérias-primas para produzir cada produto;

i : índice para produto;

j : índice para matéria-prima;

a : nível de produtividade;

B_{ij} : quantidade da matéria-prima j utilizada na produção de uma unidade do produto i ;

D_i = demanda pelo produto i ;

O custo total, por passo de simulação, é dado conforme Equação 6:

$$v = \sum_{j=1}^m c_j q_j + cf + rewards + punishments \quad (6)$$

Onde:

m : quantidade de matérias-primas para produzir cada produto;

j : índice para matéria-prima;

c_j : custo de fornecimento da matéria prima j ;

q_j : quantidade da matéria-prima j utilizada na produção;

cf : soma dos custo fixo e demais custos variáveis;

$rewards$: recompensas recebidas pela adoção de normas;

$punishments$: punições recebidas pela não adoção de normas;

A receita ou faturamento, por passo de simulação, é dado de acordo com a Equação 7:

$$u = \sum_{i=1}^n q_i S_i \quad (7)$$

Onde:

n : número de produtos montados ou produzidos pelo agente;

i : índice para produto;

q_i : preço de venda do produto i ;

S_i : quantidade vendida do produto i ;

O valor unitário de cada bem produzido ou montado é obtido pela divisão da Equação 7 pela Equação 8.

5.3.8 Supplier

Agentes do tipo *Supplier* são responsáveis pelo fornecimento de matérias-primas a fábricas de produção ou a outros agentes, tais como centro de distribuição

e clientes. Um fornecedor também pode suprir outro fornecedor e assim por diante, dependendo da configuração da cadeia e do objetivo do estudo. A Figura 21 apresenta os atributos e funcionalidades deste agente.

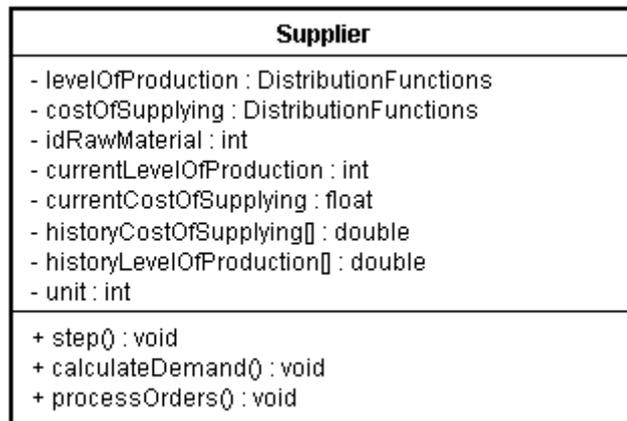


Figura 21 – Supplier– atributos e operações

Fonte: Elaborado pelo autor

Entre os principais atributos desse agente encontra-se a capacidade de produção por período de tempo (passo de simulação) e seu custo de fornecimento, ambos modelados no formato de uma distribuição de probabilidade. Embora o agente tenha uma distribuição que define sua capacidade de fornecimento, se for utilizada toda sua capacidade produtiva a cada passo de simulação, poderá gerar níveis de estoque em excesso, caso a demanda não for correspondente. Desse modo, assim como no agente *Inventory* e no agente *Manufacturer*, a cada passo de simulação, se faz uma estimativa da quantidade necessária a produzir baseado em um estoque de segurança, na demanda atual contabilizada e no estoque atual, conforme Equação 8.

$$\textit{Produção estimada} = \textit{estoque de segurança} + \textit{demanda corrente} - \textit{estoque atual} \quad (8)$$

O nível de produção efetiva, assim como nos agentes anteriores, se dá pela escolha do menor valor entre a capacidade produtiva máxima do agente e a produção estimada, conforme Equação 9.

$$\text{Produção efetiva} = \text{MIN}(\text{capacidade produtiva}, \text{produção estimada}) \quad (9)$$

O custo de fornecimento de cada unidade é calculado de acordo com a Equação 10, através da soma do custo de fornecimento gerado conforme a distribuição de probabilidade atribuída ao agente com as recompensas e punições recebidas pelo agente face a adoção ou não de normas.

$$\text{Custo de fornecimento} = \text{costOfSupplying.generator}() + \text{rewards} + \text{punishments} \quad (10)$$

A Figura 22 apresenta o diagrama de atividades corresponde ao comportamento do deste agente.

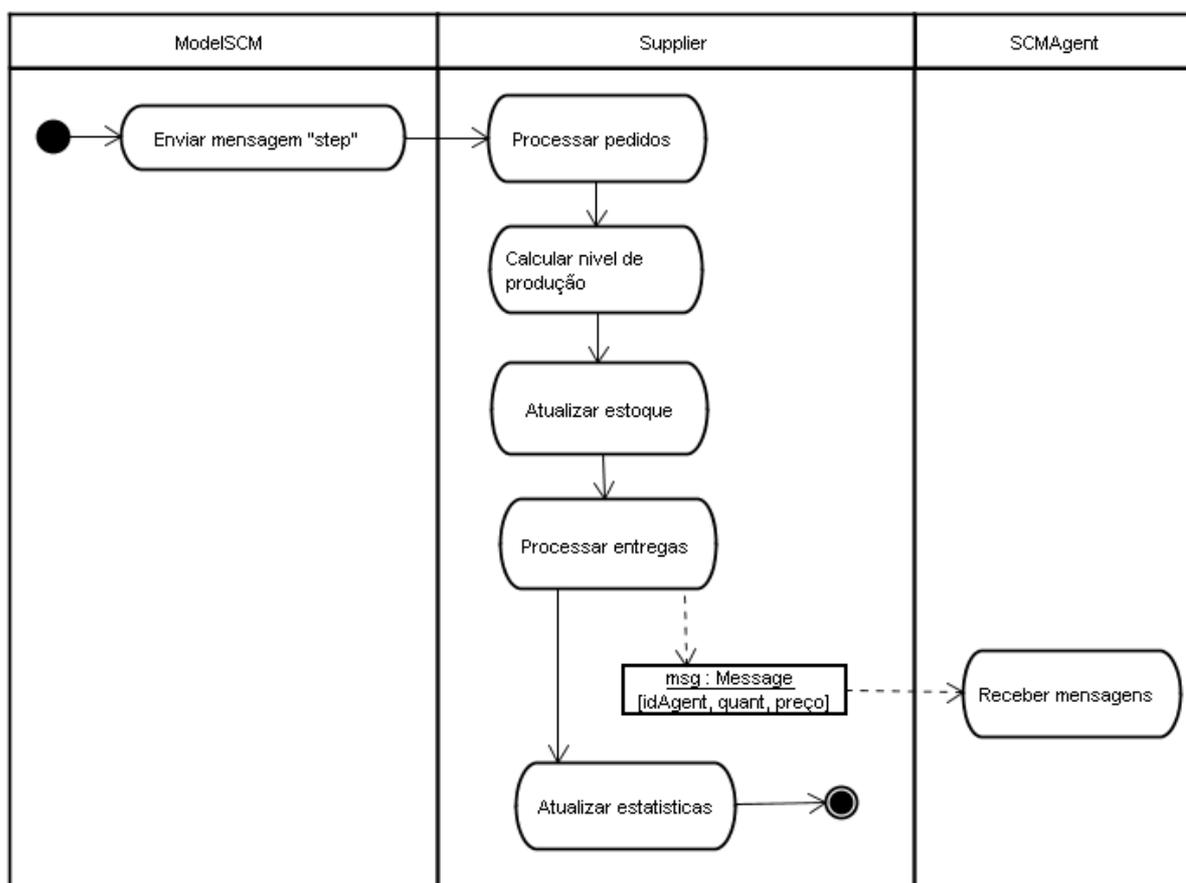


Figura 22 – Diagrama de atividades do agente Supplier

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.9 DistributionCenter

Um centro de distribuição tem como atividade principal receber produtos de uma planta de produção, centros de distribuição ou de fornecedores e enviar tais

produtos a outros elos consumidores da cadeia (varejistas ou outros centros de distribuição, por exemplo, dependendo da configuração da cadeia).

O agente *DistributionCenter* funciona de acordo com a estratégia de distribuição conhecida como estoque no depósito, onde os armazéns mantêm estoques e atendem os clientes na medida em que os itens são necessários (SIMCHI-LEVI *et al.* 2003). A Figura 23 apresenta os principais atributos e operações desse agente. Entre os atributos, além do custo de fornecimento, modelado no formato de uma distribuição de probabilidade, e a relação de produtos que o agente pode distribuir, o agente faz uso de um agente do tipo *Inventory* (derivado de *SCMAgent*) para gerenciar o nível de estoque de cada produto. O cálculo do custo de fornecimento é realizado da mesma maneira que para o agente *Supplier*, conforme Equação 10.

DistributionCenter
- costOfSupplying : DistributionFunctions - idFinishedGood[] : int
+ calculateDemand() : void + processOrders() : void

Figura 23 – DistributionCenter– atributos e operações

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, a cada passo de simulação, o agente calcula a demanda por cada produto, envia para o agente *Inventory* realizar os pedidos e, por fim, atende aos pedidos recebidos, caso houver estoque disponível.

5.3.10 Comunicação entre os agentes

Agentes de um modo geral trocam diferentes tipos de mensagens entre si, algumas delas mesmo antes da simulação iniciar para preparar o ambiente e os agentes para o início dos experimentos. As mensagens trocadas pelos agentes nesse trabalho podem ser agrupadas em três tipos:

- 1) fluxo de material: aquelas relacionadas à entrega de matérias-primas e produtos, em atendimento a um pedido. Esse tipo de mensagem causa a atualização de estoque no agente que a recebe;

- 2) fluxo de informação: aquelas relacionadas à troca de informação entre os agentes, por exemplo, pedido de matéria-prima ou produto final, informação sobre preço e prazo de entrega, confirmação de pedido, informação sobre demanda, informação sobre nível de estoque, entre outros;
- 3) fluxo de normas: aquelas relacionadas a normas emitidas pelos agentes normativos;

As mensagens que caracterizam normas seguem o formato apresentado na seção 5.1, de acordo com os atributos da classe *Norm*. As mensagens do tipo fluxo de material e do tipo fluxo de informação seguem o formato apresentado na Figura 24, conforme atributos da classe *Message*.

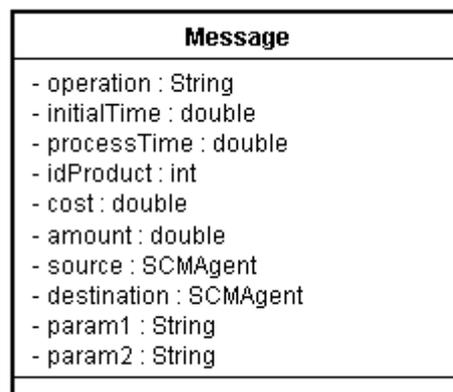


Figura 24 – Atributos da Classe Message

Fonte: Elaborado pelo autor

Onde:

- *operation*: operação, pergunta ou resposta enviada para um agente, pode exemplo: *order* (para pedido), *delivery* (para entrega), *ack* (para confirmar operação), *step* (para executar passo de simulação);
- *initialTime*: identifica tempo de simulação quando do envio da mensagem pelo agente de origem;
- *processTime*: identifica tempo de simulação em que a mensagem deve ser processada. Um agente pode ter diversas mensagens em sua lista de mensagens de entrada, porém, somente processa aqueles onde

processTime é igual ao tempo atual de simulação. Essa alternativa simplifica a simulação de atrasos durante o envio e recebimento de pedidos;

- *idProduct*: identificador de produto ou matéria-prima;
- *cost*: custo de fornecimento;
- *amount*: quantidade enviada ou pedida;
- *source*: identifica agente de origem da mensagem;
- *destination*: identifica agente de destino da mensagem;
- *param1* e *param2*: parâmetros auxiliares;

6 MODELAGEM DA CADEIA DO BIODIESEL

Este capítulo apresenta as etapas de modelagem da cadeia do biodiesel utilizando os agentes propostos no trabalho. Inicialmente é apresentado um resumo sobre os principais atores dessa cadeia, maiores detalhes sobre o contexto de estudo estão descritos no Anexo D. Após é apresentada a estruturação do modelo propriamente dito, seguido da descrição dos parâmetros utilizados para caracterizar o comportamento de cada agente. Por fim, apresenta-se os resultados obtidos com os experimentos e as contribuições do modelo proposto.

6.1 SUMÁRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO BIODIESEL

A década de 90 marcou importantes avanços nos biocombustíveis, com notável aumento na oferta de alternativos derivados de biomassa aos combustíveis de origem fóssil e não-renovável. Atualmente, a União Européia, os Estados Unidos e vários outros países já produzem biodiesel comercialmente e estão empenhando significativos esforços para o desenvolvimento de suas indústrias (CADERNO NAE, 2004).

Acompanhando o movimento mundial e apoiado em suas experiências anteriores, o Brasil dirigiu sua atenção, no final dos anos 90, para os projetos destinados ao desenvolvimento do biodiesel. Essas iniciativas ficaram circunscritas às áreas de P&D, com especial destaque para as desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Avanços mais significativos foram dados pelo Governo Brasileiro através do Decreto de 23 de dezembro de 2003 que instituiu a Comissão Executiva Interministerial encarregada da implantação das ações direcionadas à produção e ao uso de óleo vegetal – biodiesel como fonte alternativa de energia. A Comissão Executiva Interministerial teve um Grupo Gestor que executou as ações relativas à gestão operacional e administrativa voltadas para

o cumprimento das estratégias e diretrizes estabelecidas pela Comissão Executiva Interministerial (SEBRAE, 2008).

Os estudos e relatórios desses grupos de trabalho subsidiaram a formulação do Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel (PNPB), lançado pelo Governo Federal em dezembro de 2004 para incentivar a introdução do biocombustível na matriz energética nacional. Entre as principais diretrizes do PNPB pode-se citar: (1) implantar um programa sustentável, promovendo inclusão social; (2) garantir preços competitivos, qualidade e suprimento; e, (3) produzir o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas e em regiões diversas.

Desse modo, pode-se perceber que a importância do Biodiesel para o Brasil decorre dos seguintes motivos: (i) é uma alternativa para diminuição da dependência dos derivados do petróleo, ajudando a diversificar a matriz energética brasileira; (ii) é um componente obrigatório a curto e médio prazo para a comercialização do diesel mineral no país; (iii) irá criar um novo mercado para as oleaginosas; (iv) possibilitará a redução da emissão de poluentes, contribuindo para a melhoria do meio-ambiente; e (v) possibilitará a geração de novos empregos em regiões carentes do país.

Em termos práticos, o Biodiesel pode substituir total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores ciclo diesel automotivos (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis, etc) ou estacionários (geradores de eletricidade, calor, etc). Pode ser usado puro ou misturado ao diesel em diversas proporções. Sua utilização em grande escala permitirá a economia de divisas com a importação de petróleo e óleo diesel e também reduzirá a poluição ambiental. Além disso, pode gerar alternativas de empregos em áreas geográficas menos atraentes para outras atividades econômicas e, assim, promover a inclusão social (PNPB, 2008).

O Biodiesel pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou pela transesterificação (PARENTE, 2003). Esta última, mais utilizada, consiste numa reação química de óleos vegetais ou de gorduras animais com o álcool comum, etanol ou o metanol, estimulada por um catalisador. Desse processo também se extrai a glicerina, empregada para

fabricação de sabonetes e diversos outros cosméticos. O fluxograma do processo de produção do biodiesel é apresentado na Figura 25.

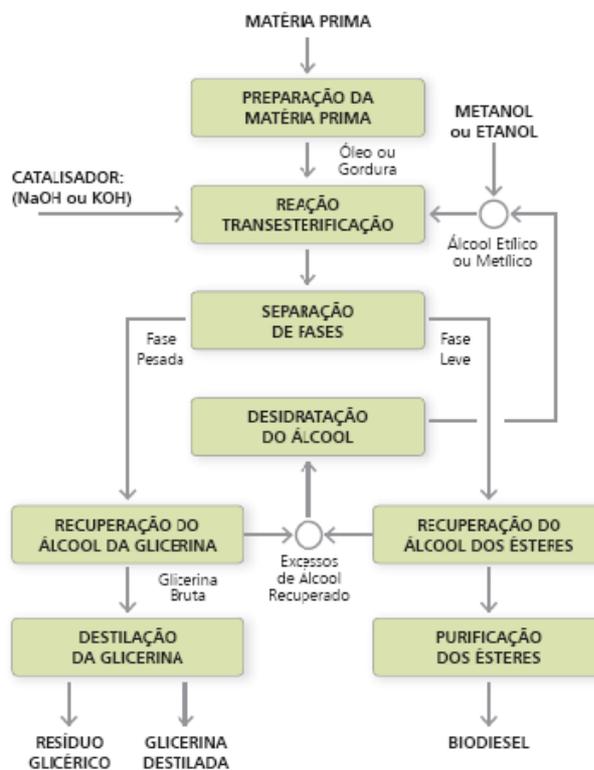
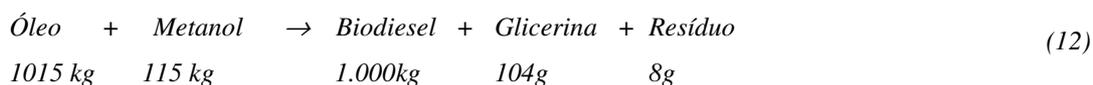
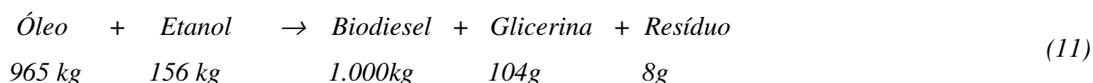


Figura 25 – Fluxograma do processo de produção do biodiesel

Fonte: Parente (2003)

O balanço de massa da reação de transesterificação depende do tipo de álcool utilizado na reação. Se o álcool utilizado for etanol, a Equação 11 define o balanço de massa, caso contrário, se for utilizado metanol, a Equação 12 define o balanço de massa.



Após a produção, a distribuição do Biodiesel aos pontos de demanda ocorre da mesma forma que a dos demais combustíveis, ou seja, é vendido para as distribuidoras de combustíveis para posterior mistura no diesel mineral para posterior distribuição aos pontos de consumo. De acordo com a legislação em vigor, a

prerrogativa de distribuição de combustíveis é de companhias distribuidoras devidamente licenciadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Dessa forma, não pode ser vendido diretamente aos postos revendedores, mas as bases de distribuição da região (ver Anexo D para maiores detalhes sobre as leis que regulam o segmento). A Figura 26 ilustra o funcionamento da cadeia produtiva do Biodiesel.

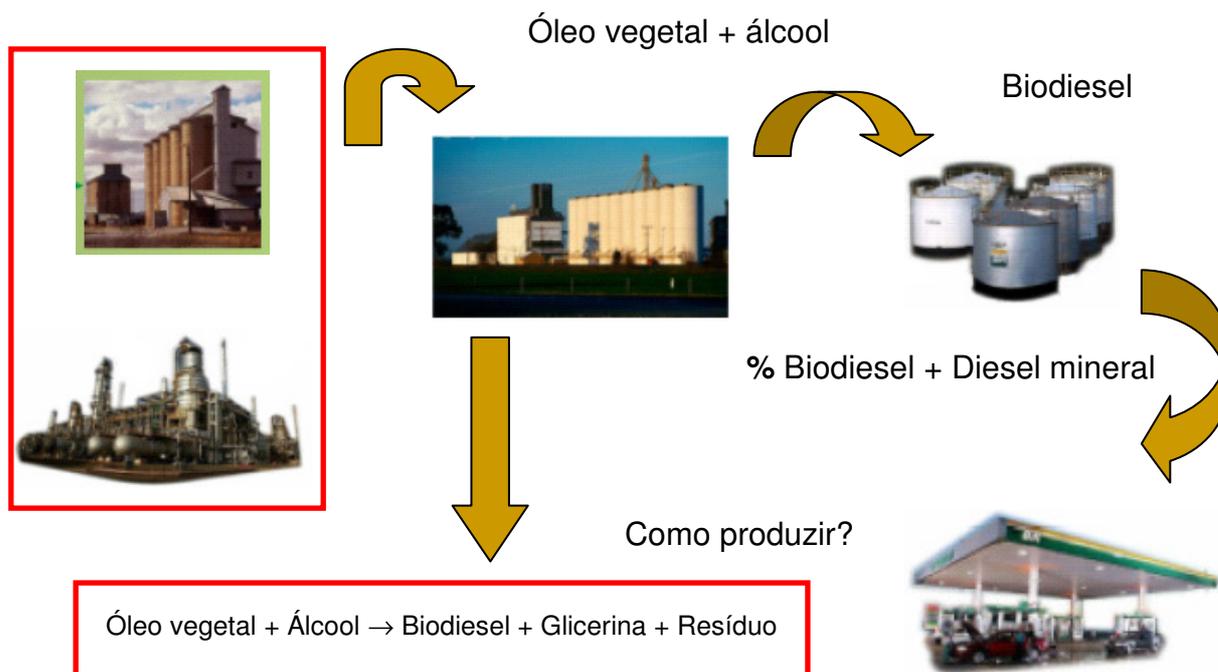


Figura 26 – Funcionamento básico da cadeia do Biodiesel

Fonte: Elaborada pelo Autor

De acordo com Cánepa (2004), pode-se representar a cadeia de suprimentos do Biodiesel através de três estágios. O primeiro estágio é o responsável pelo fornecimento de matérias-primas às usinas de Biodiesel, o segundo estágio representa as próprias usinas e, o terceiro estágio, representa as refinarias e distribuidoras de combustíveis. Ainda pode-se adicionar um quarto estágio correspondente aos pontos de demanda, postos de gasolina, nesse caso.

A promulgação da Lei 11.097/05 que inclui a utilização do Biodiesel na matriz energética brasileira motivou o surgimento de diversas pesquisas e debates sobre o tema no Brasil, tanto no meio acadêmico como no meio empresarial. Algumas das questões discutidas por pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento são:

- Qual é a melhor alternativa de matéria-prima para produzir o Biodiesel (BILICH e DA SILVA, 2006);
- Há viabilidade de produção de biodiesel no Brasil? (BENEDETTI *et. al.* 2006; PLÁ, 2005; SUARES e ABREU, 2005);
- A localização das usinas de Biodiesel (FERREIRA e BORENSTEIN, 2007; DAL ZOT, 2006; FREITAS, 2004);
- A definição dos atores da cadeia produtiva do Biodiesel (CÁNEPA, 2004; FREITAS e JUNIOR, 2004)
- Análise de custos de produção (ARAUJO, 2008; ANDRADE FILHO, 2008; LEIRAS *et. al.*, 2007; BARROS *et al.*, 2006);
- Modelagem de plantas de Biodiesel através de algoritmos genéticos (SAMED *et. al.*, 2007);
- Automatização dos cálculos de análise econômica de investimento para montagem de unidades de produção de biodiesel (BORGES *et. al.*, 2006).

Analisando os trabalhos citados anteriormente (brasileiros, é importante destacar), percebe-se algumas limitações, dentre as quais: (i) os modelos de otimização enfatizam em problemas específicos da cadeia, como localização, por exemplo; (ii) as análises contemplam normalmente uma única oleaginosa, com a alta e oscilação do preço do óleo de soja, a produção do Biodiesel fica praticamente inviável a partir dessa única matéria-prima; (iii) as análises não consideram sazonalidades de produção das matérias-primas e fluxo contínuo de produção ao longo do tempo; (iv) não foram contempladas análises de incertezas; e, (v) não se considera a influência de atores externos na cadeia. Em síntese, os modelos de análise desenvolvidos para o contexto dessa cadeia se limitam a análise econômica das usinas de produção de Biodiesel, não levando em consideração uma análise mais sistêmica da cadeia.

Ao analisar a literatura estrangeira sobre o assunto, por exemplo, Bender (1999), Bozbas (2005), Carraretto *et al.* (2004), Demirbas e Balat (2006), Dorado *et al.* (2006), também percebe-se a carência de estudos que façam uso de modelos. Essa afirmativa é corroborada por Hass *et al.* (2006), nesse trabalho, os autores realizaram um estudo para estimar o preço do Biodiesel, citando a necessidade e a importância de um sistema de apoio à decisão flexível para realizar experimentos no contexto dessa cadeia.

Nas seções seguintes procura-se demonstrar como o modelo de simulação proposto nesse trabalho pode ser utilizado para avaliar algumas das questões relacionadas a cadeia produtiva do biodiesel, em especial:

1. Mix de matérias-primas que proporcionam o menor custo de produção de Biodiesel;
2. Custo de produção de biodiesel via rota metflica e etflica, buscando avaliar diferenças entre custo de produção;
3. Impacto da tributação e da receita da glicerina sobre o custo de produção de biodiesel; e,
4. Influência de normas na organização da cadeia;

Algumas destas questões foram levantadas a partir da análise de artigos científicos e trabalhos sobre o tema (3 e 4, principalmente), conforme já citado, enquanto que as demais foram levantadas a partir de visitas realizadas a uma usina produtora de biodiesel que está se instalando no noroeste gaúcho. Nessas ocasiões, foi possível conversar com especialistas da área de biodiesel, compreender as variáveis que compõem os custos de produção de uma usina, entender a logística de distribuição, debater estratégias de produção, bem como possíveis alternativas de matérias-primas para produção, buscando amenizar os impactos das oscilações de preços das *commodities* agrícolas.

6.2 MODELO BASEADO EM AGENTES PARA A CADEIA DO BIODIESEL

Após a definição do comportamento dos agentes relacionados para o contexto de cadeias produtivas e do estabelecimento do relacionamento desses agentes com agentes normativos (seção 5.3), do estudo e compilação das informações sobre o contexto de aplicação do modelo proposto (seção 6.1 e Anexo D), e, da identificação de algumas questões que são importantes de serem avaliadas no contexto considerado (seção 6.1) chega-se a todas as variáveis e subsídios necessários para a etapa de modelagem da cadeia do biodiesel utilizando os agentes propostos.

A Figura 27 apresenta os agentes que fazem parte do modelo e uma possível configuração dos relacionamentos, lembrando que, dada a dinâmica do modelo de agentes utilizada nesse trabalho, os relacionamentos são construídos ao longo da simulação de acordo com as normas e objetivos de cada agente.

O modelo proposto contempla, inicialmente, os fornecedores de matérias-primas, em grãos, que abastecem o processo de esmagamento para extração de óleo. A inclusão da etapa de esmagamento no modelo permite estimar o reflexo da produção de biodiesel na produção de grãos, não apenas na produção de óleo. Outra questão importante a destacar é que as culturas de canola e girassol, quando da criação de normas, estarão relacionados a estabelecimentos familiares, enquanto que a soja estará relacionada a estabelecimentos patronais. Essa divisão ocorre naturalmente em função da área plantada de cada cultura e também pela análise das iniciativas de incentivo da produção familiar realizadas pelas empresas de biodiesel do RS.

Esta divisão também torna-se necessária em função da legislação em vigor para obtenção do Selo Social e, por conseqüência, para participar dos leilões da ANP. De acordo com a atual legislação (ver Anexo D), no estado do Rio Grande do Sul é necessário adquirir 30% da matéria-prima da agricultura familiar, assim, de acordo com o modelo, essa demanda deverá ser atendida pelos agentes produtores de girassol e canola. O restante da matéria-prima pode ser obtido a partir dos produtores de soja, fornecedor de óleo reciclado e fornecedor de sebo bovino,

dependendo do plano de produção de cada agente. Quando todas estas matérias-primas estiverem disponíveis no modelo, a escolha por um ou outra é realizada conforme heurística apresentada na seção 5.3.4.

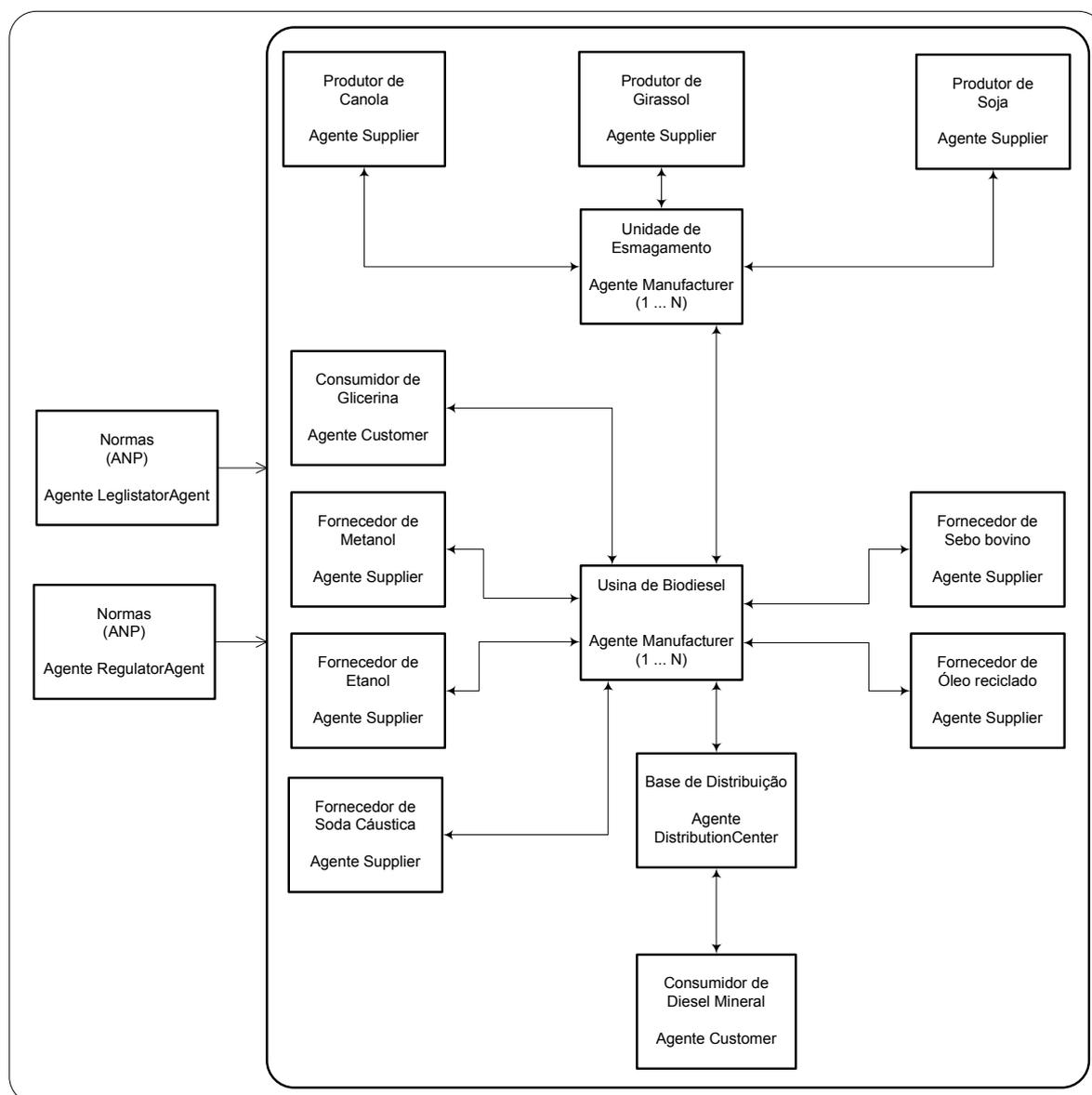


Figura 27– Modelo baseado em agentes para a cadeia do Biodiesel

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação aos fornecedores, ainda cabe destacar que a produção de grãos e todos os demais fornecedores que fazem parte do modelo foram agregados em um único agente para cada tipo de matéria-prima, permitindo uma análise global dos resultados. As usinas de biodiesel podem existir em maior número, porém, para facilitar a interpretação dos resultados, utilizaram-se, durante os experimentos, duas

usinas, uma com coeficientes de produção relacionados à rota ética e outra relacionado à rota metélica.

Cada uma delas está relacionada a elos que representam o mercado consumidor e a elos que representam o mercado fornecedor. Os consumidores são de dois tipos: (1) base de distribuição, modelada como um agente do tipo *DistributionCenter*, e, (2) consumidores de glicerina, modelada como um agente do tipo *Customer*. Os fornecedores estão relacionados diferentes fontes de suprimento de óleo e álcool, todos modelados como um agente do tipo *Supplier*.

A demanda externa da cadeia é representada por um agente do tipo *Customer*, o qual modela o consumo de diesel mineral, repassando sua demanda ao agente base de distribuição, que por sua vez, calcula a demanda por biodiesel (de acordo com o disposto pela ANP, representado no modelo pelo agente *LegislatorAgent*) e repassa às usinas produtoras, que estimam a demanda de cada matéria-prima necessária para produção e solicitam aos elos fornecedores correspondentes de acordo com seu plano de produção. Cada agente fornecedor, por sua vez, estima suas necessidades de produção e responde com a quantidade pedida ao elo consumidor e, assim sucessivamente, cada agente vai retornando ao seu elo consumidor o pedido solicitado. Quando o pedido retornar ao agente consumidor de diesel mineral, todo processo se reinicia novamente. A Figura 28 apresenta a representação gráfica de um ciclo de pedido de diesel mineral, mensagem responsável por gerar os demais eventos.

A cadeia do biodiesel é regulada por órgãos do governo e, mais diretamente pela ANP, conforme Anexo D, cuja representação no modelo é feita por um agente do tipo *LegislatorAgent*. O papel deste agente no modelo é criar normas que serão deliberadas pelos agentes pertencentes à cadeia. Dependendo do processo de deliberação, cada agente da cadeia passa a receber de um agente do tipo *RegulationAgent* os reforços ou punições correspondentes.

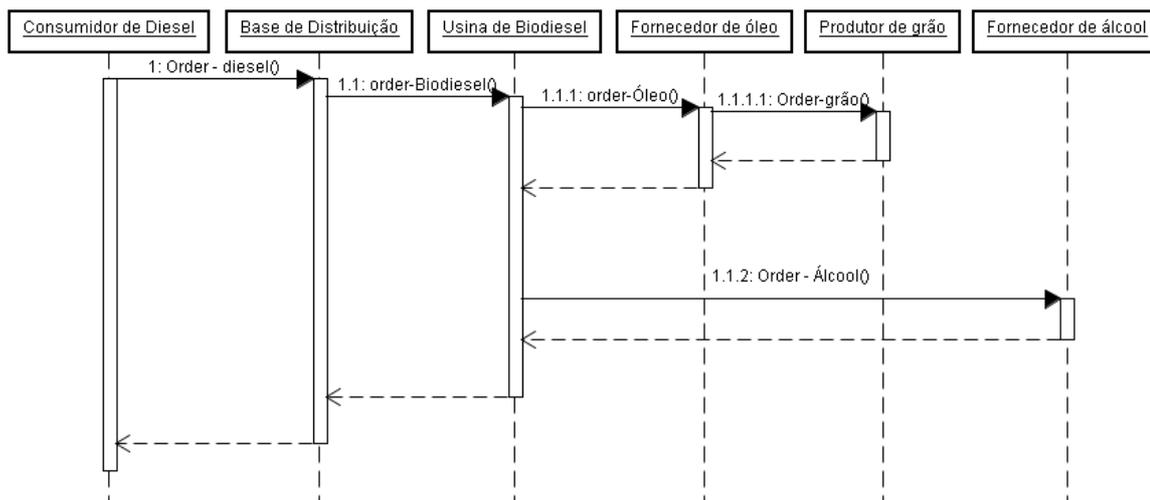


Figura 28 – Ciclo básico do modelo de agentes proposto

Fonte: Elaborado pelo autor

6.3 PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

Após a apresentação dos agentes que fazem parte do modelo, nessa seção, são apresentados os valores atribuídos àquelas variáveis que caracterizam o comportamento de cada um dos agentes apresentador no modelo da Figura 27. Os dados utilizados nessa etapa correspondem aos apresentados no Anexo D. A ferramenta *Input Analyser* do software *Arena*[®] foi utilizada para modelar os dados e fazer as análises estatísticas, quando necessário.

O comportamento dos agentes fornecedores, conforme seção 5.3.8, é caracterizado por uma distribuição de probabilidade para definir o nível de produção e outra para definir o custo de fornecimento. A Tabela 1 apresenta os valores estimados para essas variáveis, juntamente com o erro quadrado¹ e o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) correspondente. As abreviaturas presentes na Tabela 1 e em todas as demais, estão relacionadas no início desse trabalho, na seção Lista de Abreviaturas, o símbolo ∞ é utilizado para representar um recurso não escasso, quando a produtividade por passo de simulação é ilimitada.

¹ Erro quadrado é definido por Chwif e Medina (2006) como o seguinte somatório: $\sum_{i=1}^n (f_i - f(x_i))^2$.

Onde: f_i = frequência relativa no i -ésimo intervalo de classe; e, $f(x_i)$ = frequência relativa em relação ao modelo teórico considerado (exponencial, triangular, normal, entre outras).

Tabela 1 – Parâmetros dos agentes fornecedores

Agente Supplier	Parâmetros de Comportamento			Aderência	
	Nível de Produção	Custo de fornecimento ¹	Unid.	Erro Quadrado	KS
Girassol	∞	26 + EXPO(7.55)	60 kg	0.0919	> 0.15
Soja	∞	TRIA(23; 29.4; 53)	60 Kg	0.0337	0.099
Canola	∞	TRIA(23; 29.4; 53)	60 kg	0.0337	0.099
Sebo bovino	∞	TRIA(204; 427; 946)	1.000 kg	0.1004	0.12
Óleo reciclado	∞	UNIF(0.80; 1.00)	Litro	-	-
Etanol	∞	NORM(879; 131)	m ³	0.0297	> 0.15
Metanol	∞	NORM(885, 191)	m ³	0.0461	0.135

Fonte: Elaborado pelo autor

¹ Em Reais

O custo de fornecimento das matérias-primas (Tabela 1) foi modelado a preço de mercado, por exemplo, o produtor de soja fornece o grão de soja à esmagadora segundo o preço médio de mercado do grão (Anexo D). Mesmo procedimento foi adotado para as esmagadoras (Tabela 2), cujo custo de produção foi ajustado para que o preço de fornecimento correspondesse ao preço de mercado do óleo, conforme levantamento apresentado no Anexo D. Essa estratégia foi adotada para simplificar o processo de modelagem dos dados de entrada e para uniformizar as estimativas de preços de todas as matérias-primas, uma vez que o preço do sebo bovino, do óleo reciclado, do etanol e do metanol também foram estimados a preço de mercado.

Tabela 2 – Custo de fornecimento de óleo

Agente Manufacturer	Parâmetros de Comportamento		Aderência	
	Custo fornecimento ¹	Unid.	Erro Quadrado	KS
Óleo de soja	EXPO(506) + 972	Tonelada	0.031287	> 0.15
Óleo de canola	EXPO(506) + 972	Tonelada	0.031287	> 0.15
Óleo de girassol	UNIF(1588, 4592)	Tonelada	0.031405	> 0.15

Fonte: Elaborado pelo autor

* Cotação do dólar a R\$ 2,24 ¹ Em Reais

O comportamento de um agente do tipo *Manufacturer* é dado por uma variável que baliza o nível máximo de produção por período de tempo e por uma matriz de produção. O preço de fornecimento de biodiesel, diferente dos demais agentes, é estimado a partir de custos de fornecimento de matérias-primas e dos demais custos fixos e variáveis de uma usina. Essa metodologia de cálculo foi adotada para esse tipo de agente, pois pretende-se avaliar, durante os experimentos, a oportunidade de uso das diferentes opções de matérias-primas. Os custos fixos e custos de instalação foram informados por uma usina produtora de biodiesel que está se instalando no noroeste gaúcho, mas seus valores estão sendo preservados a pedido da empresa, apenas a estimativa final do custo de produção é apresentada durante as simulações.

A capacidade máxima de produção da usina de biodiesel pesquisada é 262.080 litros mensais, considerando 26 dias por meses e 24 horas por dia de produção. A cada hora a usina tem capacidade para produzir 420 litros de biodiesel. Assim, em 24 horas se consegue produzir 10.080 litros. Esse nível de produtividade (litros/hora) é obtido com a utilização de metanol, a tecnologia de produção é da empresa Biodiesel Del Plata[®]. Porém, como este é um estudo exploratório, onde procura-se avaliar diferentes alternativas de produção em relação ao uso de matérias-primas para produção, durante as simulações, serão utilizados e avaliados planos de produção que contemplem tanto a utilização de metanol como de etanol. A idéia é verificar se há diferenças significativas nos custos de produção, bem como no tempo de produção do biocombustível.

A matriz de produção apresenta os coeficientes técnicos para a produção dos produtos e dos co-produtos de qualquer processo de produção. Por exemplo, de acordo com a Tabela 3, para produzir 1 litro biodiesel é necessário 1,1 litro de óleo e 0,125 de metanol, isto equivale a dizer que para produzir 1 m³ de biodiesel é necessário 1,1 m³ de óleo e 125 litros de metanol.

Tabela 3 – Parâmetros dos agentes fabricantes

Agente Manufacturer	Parâmetros de Comportamento			
	Nível de produção	Matriz de produção		
Usina de Biodiesel – Rota metílica	262.080 litros/mês	Biodiesel	Óleo	Metanol
		1	1,1	0,125
		Biodiesel	Glicerina	
		1	0,104	
Usina de Biodiesel – Rota etílica	262.080 litros/mês	Biodiesel	Óleo	Etanol
		1	1	0,17
		Biodiesel	Glicerina	
		1	0,104	
Unidade de esmagamento canola	∞	Óleo de canola		Grão de canola
		1		2,50
		Farelo de canola		Grão de canola
		1		1,67
Unidade de esmagamento soja	∞	Óleo de soja		Grão de soja
		1		5,60
		Farelo de soja		Grão de soja
		1		1,26
Unidade de esmagamento girassol	∞	Óleo de girassol		Grão de girassol
		1		2,43
		Farelo de girassol		Grão de girassol
		1		1,88

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para modelar os agentes consumidores. Esses agentes têm na demanda seu principal atributo, a qual é especificada no formato de uma distribuição de probabilidade. O valor apresentado sobre a demanda do agente consumidor de glicerina possibilita a absorção de toda glicerina produzida na cadeia, assim essa receita pode ser reduzida dos custos de

produção do biodiesel. Durante os experimentos procura-se mostrar a contribuição da receita da glicerina no preço final do biodiesel.

A demanda do agente consumidor de diesel corresponde a duas situações. Na primeira, utilizada nos dois primeiros experimentos (seção 6.3.1 e 6.3.2), a demanda por diesel é atribuída com um valor tal que a demanda por biodiesel correspondente esteja conforme a capacidade produtiva de uma das usinas de biodiesel presente no modelo (caso 1 da Tabela 4), com isso pretende-se determinar as melhores condições de produção, a cada passo de simulação, a base de distribuição deve escolher apenas uma das usinas para fornecimento de biodiesel. Na segunda, utilizada no terceiro experimento (seção 6.3.3), a demanda por biodiesel está relacionada a demanda por diesel no estado do Rio Grande do Sul (caso 2 da Tabela 4), com isso pretende-se estimar as conseqüências das melhores alternativas de produção nos elos produtores da cadeia.

Tabela 4 – Parâmetros dos agentes clientes

Agente Customer	Parâmetros de Comportamento			Aderência	
	Caso	Demanda ¹	Un	Erro quadrado	KS
Consumidor de Diesel	1	CONST(8.700)	m ³	-	-
	2	NORM(500.000, 34.700)	m ³	0.004249	> 0.15
Consumidor de Glicerina	-	∞	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, antes de iniciar a apresentação e a discussão dos resultados numéricos sobre os experimentos realizados com o modelo, é importante frisar a importância da utilização de normas para estabelecer os relacionamentos na cadeia do biodiesel, bem como seu impacto no comportamento dos agentes. A Figura 29 apresenta um exemplo de configuração de cadeia sem a utilização de qualquer tipo de norma para restringir o estabelecimento de relacionamentos entre os agentes, nem para sugerir planos de produção. Assim, de acordo com a configuração

apresentada, o elo consumidor da cadeia está conectado diretamente a usina de biodiesel, uma vez que tem demanda por biodiesel, ao invés de utilizar a base de distribuição, também fornecedora de biodiesel. Outro ponto a destacar sobre essa configuração diz respeito ao fornecimento de óleo, não há qualquer regramento sobre os percentuais a serem adquiridos dos fornecedores, desse modo, o agente gerenciador de estoque irá buscar aquela matéria-prima que apresentar a melhor relação custo-benefício, conforme procedimento heurístico apresentado na seção 5.3.4. Além disso, não está previsto qual o percentual de mistura do biodiesel ao diesel mineral, nesse exemplo, a demanda por biodiesel será a mesma do diesel mineral.

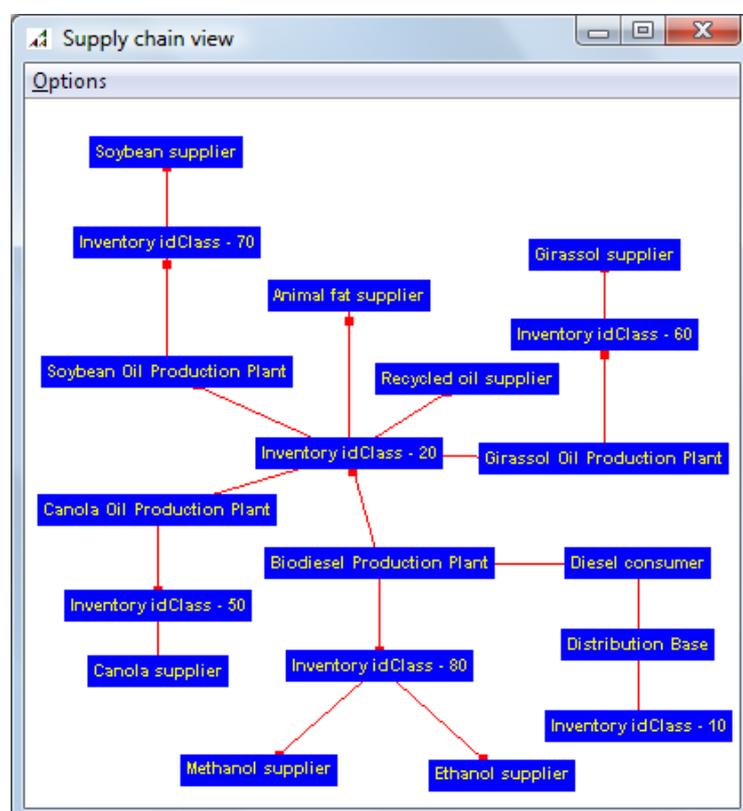


Figura 29 – Exemplo de configuração de cadeia sem uso de normas

Portanto, se o caso de estudo desse trabalho não estivesse analisando uma cadeia regulada, esta configuração pode ser considerada válida, porém, neste caso, algumas normas precisam ser definidas para que a configuração da cadeia esteja de acordo com o sistema legal estabelecido. Desse modo, as normas têm um papel bastante importante nos experimentos apresentados a seguir, ou seja: (1) definir uma configuração de cadeia válida; (2) sugerir planos de produção aos agentes

produtores de biodiesel de acordo com o selo social; e, (3) definir os percentuais de mistura de biodiesel ao diesel mineral.

O Quadro 4 apresenta as normas que regulam o funcionamento da cadeia. A primeira norma está relacionada a restrição de compra de biodiesel das bases de distribuição. No Quadro 5 é definido que o agente alvo dessa norma são os consumidores de diesel mineral e que os beneficiários são as bases de distribuição, dessa forma, se estabelece que o agente alvo deve se relacionar apenas com os beneficiários.

ID	Descrição	Reforço	Punição	Início	Fim	Parâmetro
1	Relacionamento entre elos da cadeia	MAX	0	0	-	-
2	Selo combustível social	0	MAX	0	-	30%
3	Selo combustível social	0	MAX	0	-	70%
4	Percentual de mistura de biodiesel ao diesel	MAX	0	0	350	3%
5	Percentual de mistura de biodiesel ao diesel	MAX	0	351	-	5%
6	Fornecedor de canola e girassol	0	MAX	0	-	R\$ 1,0
7	Tributação ICMS	0,17	MAX	0	-	-
8	Tributação PIS/PASEP	0	MAX	0	-	R\$ 0,07

Quadro 4 – Normas para experimentos

Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda e a terceira norma definem os parâmetros relativos à produção de uma usina que possui o selo social, ou seja, no caso do RS, 30% da matéria-prima deve ser adquirida da agricultura familiar e o restante de outras fontes. A quarta e a quinta norma estabelecem o percentual de mistura do biodiesel ao diesel mineral, o percentual de 5% “entra em vigor” a partir do 351º passo de simulação. A sexta norma estabelece que os fornecedores de canola e girassol recebam o valor de mercado pelo produto adicionado de um (1) Real por saca de 60Kg, conforme depoimento apresentado na seção 6.4.1. Por fim, a sétima e a oitava norma estabelecem as tributações a serem acrescidas no custo de fornecimento.

Resultados de três experimentos são apresentados nas seções seguintes, no primeiro procura-se avaliar se há diferenças significativas no custo de produção com a utilização de etanol ou metanol. No segundo, são apresentados os custos de produção de cenário de produção mais comum encontrado durante as pesquisas para o desenvolvimento desse trabalho (ver seção 6.3). Em ambos os experimentos são avaliados custos de produção com e sem tributação e com e sem a dedução da receita da glicerina. No último experimento, utiliza-se a demanda por diesel no estado do RS e procura-se avaliar as conseqüências da demanda de biodiesel para o cenário produtivo da agricultura familiar.

ID Norma	Agentes alvos	Agentes beneficiários
1	Consumidor de diesel	Base de distribuição
2	Plantas de Biodiesel	Fornecedor de óleo de canola Fornecedor de óleo de girassol
3	Plantas de Biodiesel	Fornecedor de óleo reciclado Fornecedor de óleo de soja Fornecedor de sebo bovino
4 e 5	Bases de distribuição	Plantas de biodiesel
6	Fornecedores de canola	-
7	Todos os fornecedores Todas as plantas de biodiesel	-
8	Plantas de biodiesel	-

Quadro 5 – Agentes alvos e beneficiários e alvos das normas

Fonte: Elaborado pelo autor

Cada conjunto de experimentos apresentados nas seções seguintes foi repetido três vezes. Os dois primeiros experimentos são compostos por 300 passos de simulação, já o terceiro, por 700 passos, assim pode-se avaliar os efeitos da alteração do percentual de mistura para 5% na cadeia. Os resultados apresentados correspondem a resultados médios das três rodadas de simulação. O computador utilizado nos experimentos possui dois processadores Intel® T2300 de 1.6 Ghz, memória de 2 Gb e disco rígido de 160Gb.

6.4.1 Resultados do primeiro experimento

O objetivo do primeiro experimento foi determinar a melhor combinação de matérias-primas para produção de biodiesel considerando a configuração de cadeia apresentada na Figura 30, decorrente das normas apresentadas nos Quadros 4 e 5. O objetivo deste experimento é demonstrar qual a alternativa de produção que fornece o menor custo de produção.

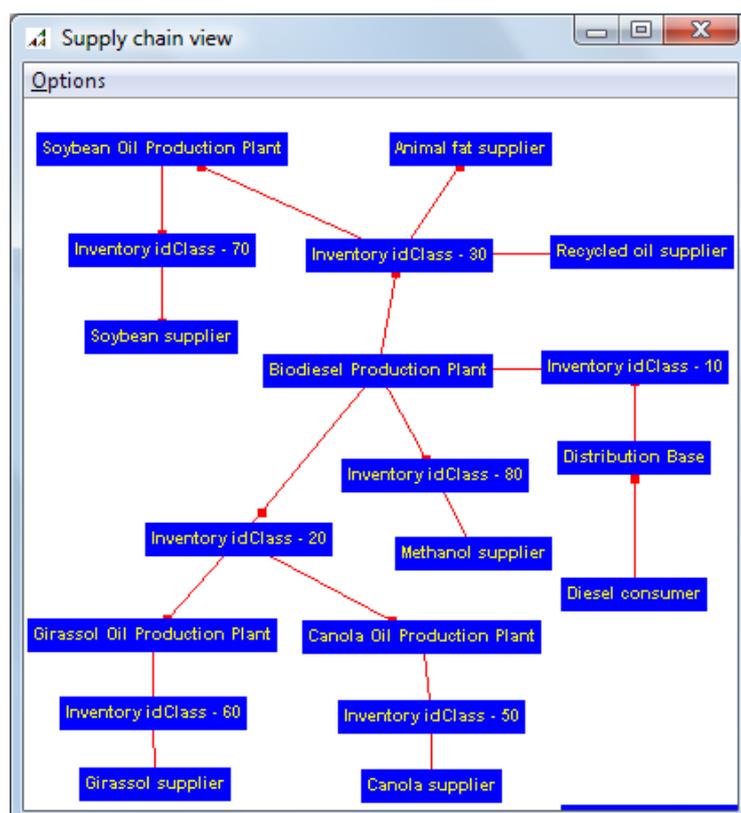


Figura 30 – Configuração da cadeia para primeiro experimento

O Gráfico 1 apresenta a evolução do custo do biodiesel para uma das rodadas de simulações realizadas. Os resultados obtidos pelas duas usinas produtoras de biodiesel são conseqüências das diferentes decisões tomadas pelos diversos agentes que compõem a cadeia ao longo da simulação. Os valores, apresentados nesse exemplo, correspondem ao valor final do biodiesel, sem impostos e sem considerar a receita da glicerina. Nessa situação, considerando a média das três rodadas de simulação, o custo médio de produção do biodiesel utilizando a rota metílica obtido foi de R\$ 1,19 o litro, enquanto que na rota etílica o custo médio do litro foi de R\$ 1,26.

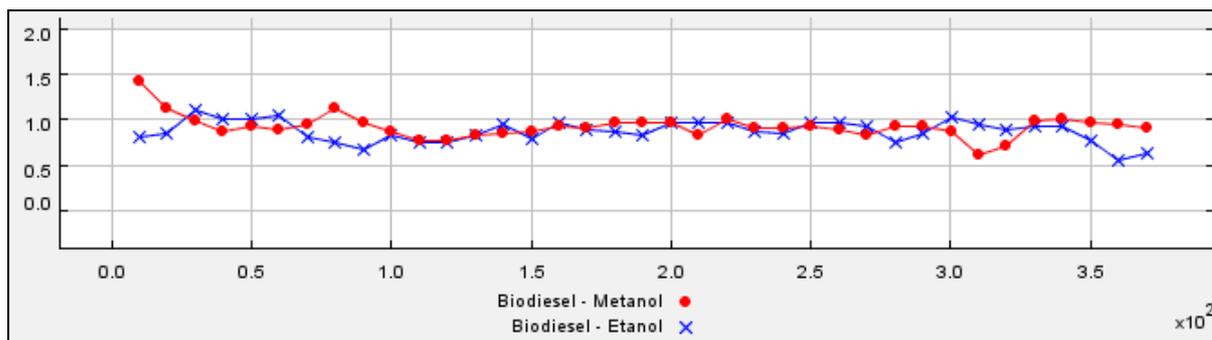


Gráfico 1 – Evolução do custo de produção do biodiesel

Portanto, pode-se verificar uma diferença muito pequena entre os custos de produção das duas usinas. Para demonstrar se há diferenças significativas entre as médias de custo de produção de biodiesel, a Tabela 5 apresenta o resultado do Teste T realizado a partir dos custos de produção para cada passo de simulação. Como o valor do *p-value*, tanto para uni-caudal como para bi-caudal, é maior que o nível de significância considerado (5%), a hipótese nula deve ser aceita, ou seja, a diferença das médias não é significativa.

Tabela 5 – Teste T para custo de produção de biodiesel

Teste T	Custo com etanol	Custo com metanol
Média	1,493074212	1,500863212
Variância	0,207478955	0,201341742
Observações	78	68
Hipótese da diferença de média	0	
gl	142	
Stat t	-0,103891255	
<i>p-value</i> uni-caudal	0,458701118	
<i>p-value</i> bi-caudal	0,917402236	

Fonte: Elaborado pelo autor

Outra consequência da similaridade de custos de produção apresentado nesse caso é a proximidade dos valores da demanda média por biodiesel nas duas usinas, 264.177 litros, em média, na usina que utiliza a rota metólica e 257.537 litros, em média, na usina que utiliza rota etólica, conforme Gráfico 2. No entanto, o nível

de produção das usinas se mostra inferior a demanda, pois a cada passo de simulação, apenas uma das duas usinas é selecionada para fornecimento.

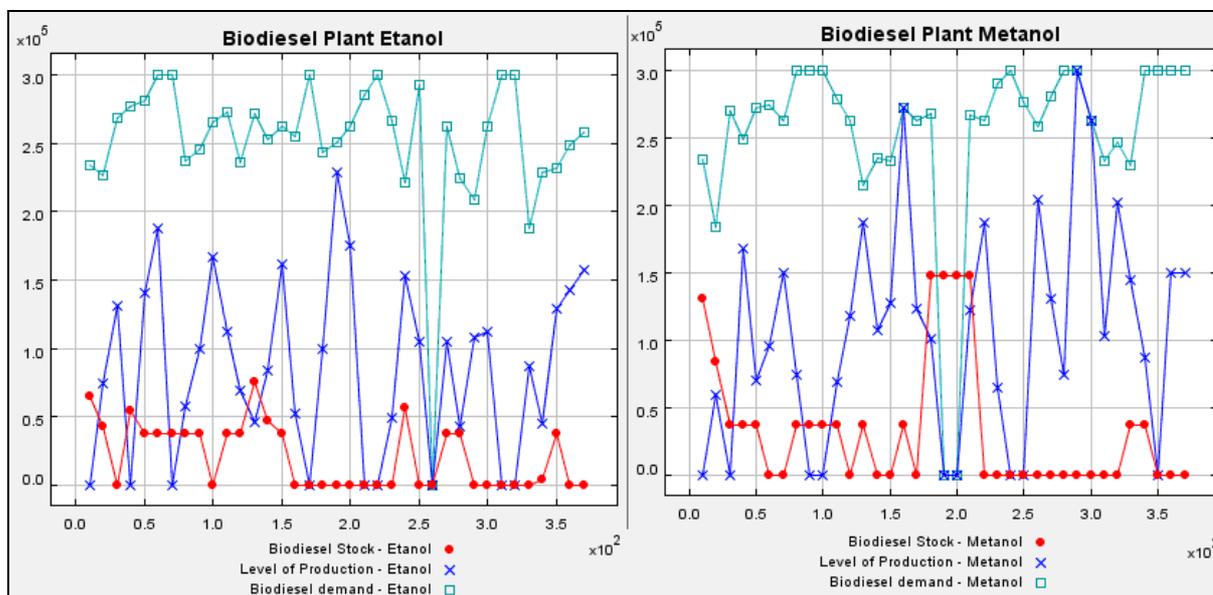


Gráfico 2 – Produtividade de biodiesel nas usinas

De acordo com os coeficientes de produção apresentados na Tabela 3, a usina que utiliza rota metálica para produção apresenta uma demanda por álcool inferior àquela que utiliza rota etílica. Essa tendência se confirmou ao longo das simulações, conforme pode ser observado na Tabela 6, registrou-se um consumo de etanol superior ao consumo médio de metanol em cerca de 35%.

Tabela 6 – Demanda por matéria-prima (experimento 1)

Matéria-prima	Custo unitário médio (R\$)	Demanda média (Litros)	Custo total (R\$)
Metanol	0,62	21.426,00	13.307,76
Óleo – outras fontes	1,22	131.984,00	161.163,05
Óleo – Agricultura familiar	1,53	65.888,00	100.704,07
Etanol	0,88	29.724,00	26.029,25
Óleo – outras fontes	1,32	122.393,00	160.968,58
Óleo – Agricultura familiar	1,50	62.148,00	93.136,75

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação às matérias-primas relacionadas ao óleo para produção de biodiesel, que correspondem a maior parte do custo de produção, têm-se duas situações. A primeira corresponde àquela oriunda da agricultura familiar e a segunda corresponde àquela oriunda das outras fontes de óleo (óleo de soja, sebo bovino e óleo reciclado). O Gráfico 3 apresenta a demanda por matéria-prima de cada fornecedor ao longo da simulação.

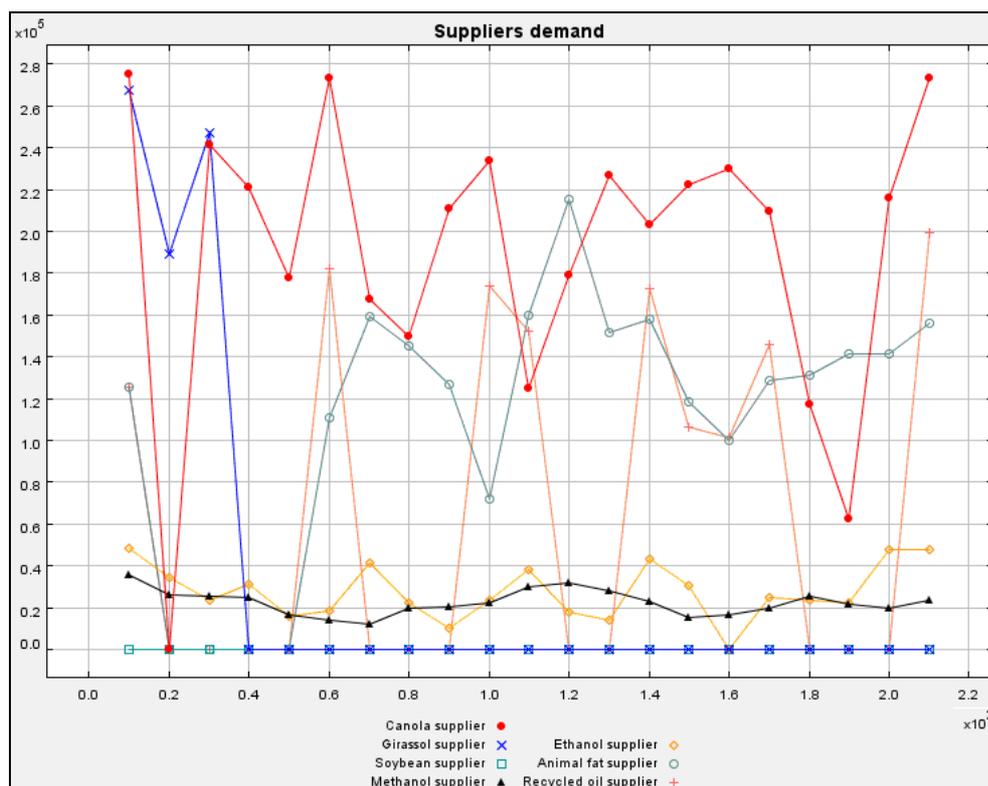


Gráfico 3 – Demanda por matéria-prima

No primeiro caso, verifica-se um amplo predomínio da utilização da canola em relação à utilização de girassol, em termos percentuais, corresponde a dizer que em 93% das situações, o agente que controla o estoque de óleo fez a opção pelo uso do óleo de canola. O custo de aquisição médio do óleo da agricultura familiar apresentou valores bastante próximos nas duas usinas, pois ambas utilizaram a mesma fonte de matéria-prima.

No segundo caso, quando se avalia a fonte pela matéria-prima a ser adquirida em maior escala (70%), verifica-se o predomínio da utilização do óleo reciclado e do sebo bovino. Entre a utilização do sebo bovino e do óleo reciclado, o primeiro

mostrou-se mais vantajoso em termos econômicos, correspondendo a 63% do volume de óleo adquirido, ou seja, 61 pedidos de sebo bovino com média de 126.941 kg e 29 pedidos com média de 157.918 litros de óleo reciclado.

Apesar da opção pela produção de biodiesel com etanol não apresentar diferença econômica significativa em relação à produção com metanol, conforme demonstrado anteriormente, o etanol tem a desvantagem de apresentar um maior tempo de reação. Parente (2003) afirma que a rota metílica possui o dobro da velocidade de reação da rota etílica. Adaptando o tempo de produção das usinas para esses números, verifica-se, de fato, uma queda acentuada na produtividade da usina que utiliza etanol, enquanto que a usina que utiliza metanol realizou a entrega de 73 pedidos, em média, com média de 258.739 litros, a usina que utiliza etanol realizou a entrega de 48 pedidos, em média, com média de 248.388 litros. Sob as mesmas condições de produção, a média de pedidos enviados a cada usina foi de 79 e 65, respectivamente. O Gráfico 4 ilustra evolução da demanda, da produtividade média e dos níveis de estoque de biodiesel nas usinas.

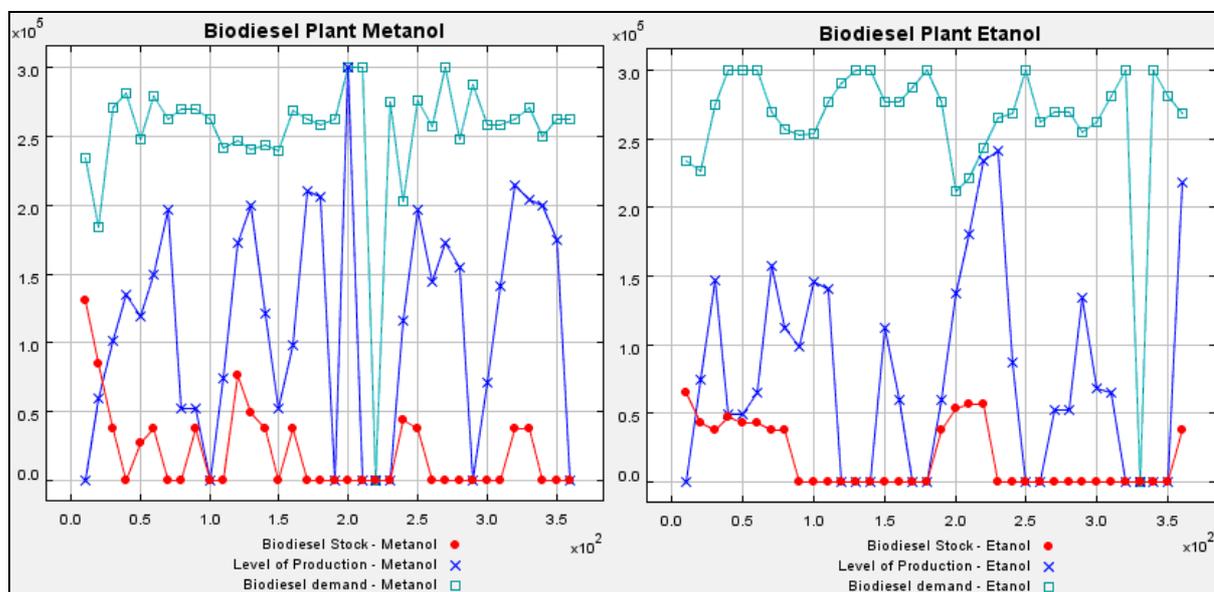


Gráfico 4 – Produtividade de biodiesel nas usinas

Do custo de produção do biodiesel pode ser deduzida a receita obtida com a glicerina, porém a contribuição é pequena, considerando que o preço de glicerina tem decaído nos últimos anos em função do aumento da produção, conforme Anexo D. Nos experimentos realizados, obteve-se uma diminuição média no custo de

produção do biodiesel de R\$ 0,07 por litro com a receita obtida com a venda da glicerina, considerando a contabilização de toda produção.

Por fim, é oportuno frisar que todos os valores apresentados ao longo dessa seção estão livres de impostos, ou seja, as normas 7 e 8 da Quadro 4 foram desconsideradas. Ao repetir os experimentos considerando a tributação sobre todas as matérias-primas (ICMS de 17%) e sobre o biodiesel (ICMS de 17%; PIS/Pasep e COFINS de R\$ 0,07 por litro), tem-se o efeito apresentado no Gráfico 5. Onde, o custo médio de produção com metanol aumenta, em média para R\$ 1,27, enquanto que o custo médio de produção com etanol aumenta para R\$ 1,35, em média nas três rodadas de simulação.

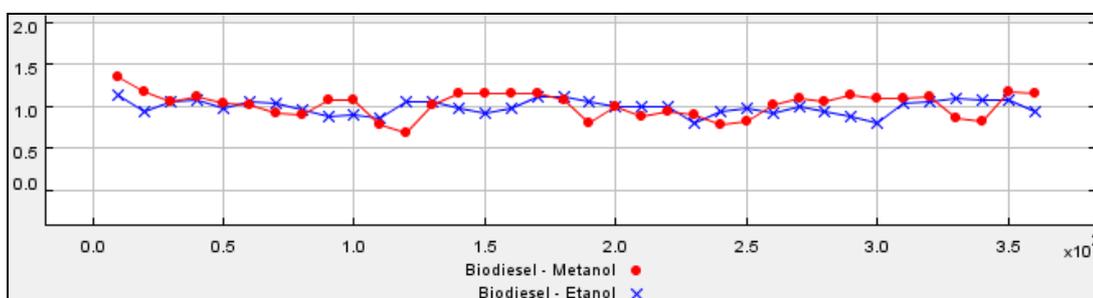


Gráfico 5 – Custo de produção de biodiesel com impostos

6.4.2 Resultados do segundo experimento

Nesse experimento procura-se reproduzir um modelo de produção mais próximo da realidade atual (conforme Anexo D), onde se faz uso da soja como alternativa para aquisição do óleo que não é oriundo da agricultura familiar e utiliza-se apenas a usina que utiliza a rota metálica para produção. Desse modo, em relação ao primeiro experimento, desconsideram-se os fornecedores de óleo reciclado, sebo bovino e etanol do conjunto de fornecedores potenciais das usinas A configuração da nova cadeia resultante dessas mudanças pode ser visualizada na Figura 31.

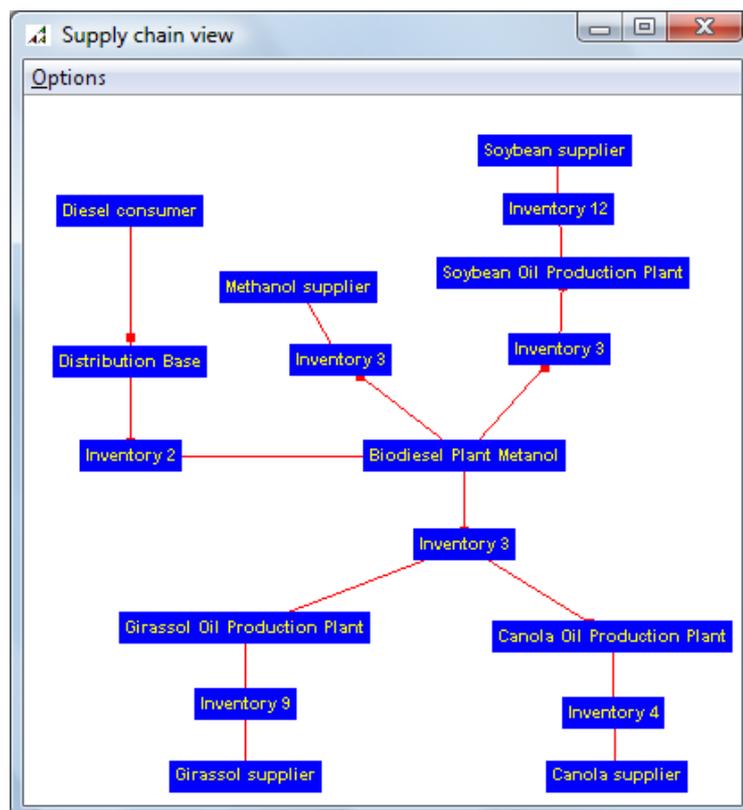


Figura 31 – Configuração da cadeia para segundo experimento

Com este cenário, o custo médio de produção do biodiesel obtido a partir das três rodadas de simulação foi de R\$ 1,54, cerca de 30% superior ao custo obtido no primeiro experimento. O Gráfico 6 apresenta a evolução do custo de produção ao longo da simulação em um dos experimentos realizados com este cenário.

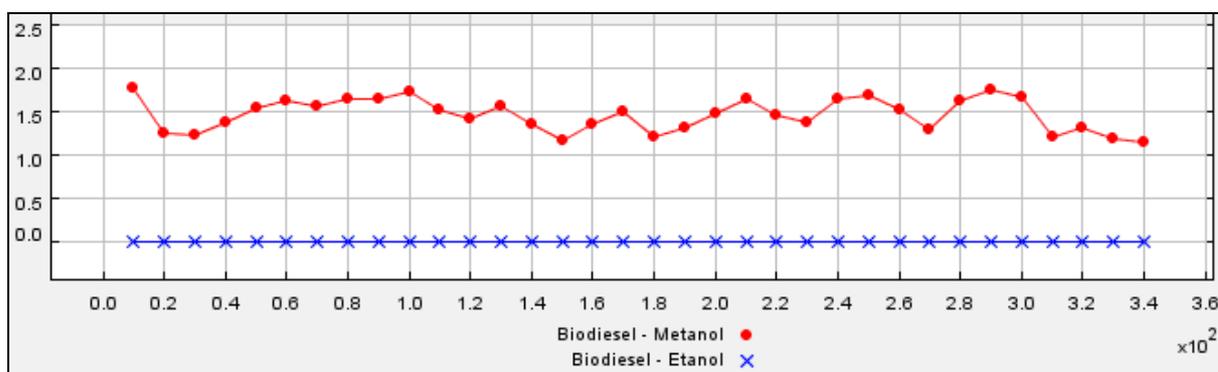


Gráfico 6 – Evolução do custo de produção do biodiesel

O acréscimo ao custo de produção pode ser explicado a partir da análise comparativa das Tabelas 6 e 7. Entre o primeiro e o segundo experimento, não houve maiores variações no custo unitário médio de aquisição do metanol e de óleo

adquirido da agricultura familiar. Porém, por outro lado, o custo de aquisição de matéria-prima corresponde ao óleo vegetal obtido de outras fontes no primeiro experimento foi de R\$ 1,22 (Tabela 6), enquanto que no segundo experimento passou a R\$ 1,53 (Tabela 7), fato que explica o aumento no custo de produção.

Tabela 7 – Demanda por matéria-prima (experimento 2)

Matéria-prima	Custo unitário médio (R\$)	Demanda média (Litros)	Custo total (R\$)
Metanol	0,64	26.751,00	17.155,74
Óleo de soja	1,53	158.893,00	243.525,21
Óleo – Agricultura familiar	1,52	68.778,00	104.274,17

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa afirmativa se confirma também quando se recorre aos dados apresentados no Gráfico 7, onde pode-se visualizar o crescimento da demanda por produção de soja e, por conseqüência, utilização em maior escala de óleo de soja pelas usinas produtoras de biodiesel. Verifica-se também, a continuidade da preferência pela escolha do óleo de canola como alternativa para agricultura familiar.

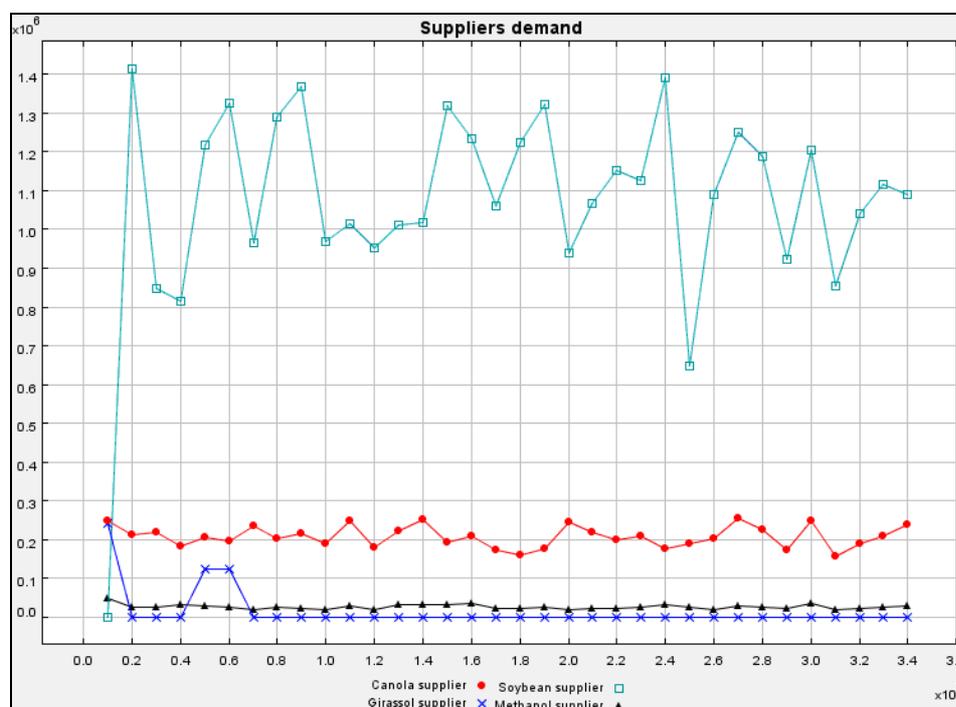


Gráfico 7 – Demanda por matéria-prima

Assim como no primeiro caso, os valores apresentados até o momento nessa seção estão livres de impostos. Ao repetir os experimentos considerando as mesmas tributações do primeiro experimento, obtém-se um custo médio, nas três rodadas de simulação, de R\$ 1,76, aproximadamente 15% superior em relação ao custo obtido sem tributação.

6.4.3 Resultados do terceiro experimento

Nesse experimento considera-se a demanda por diesel do estado do Rio Grande do Sul, ver Tabela 4, mantêm-se todos os fornecedores, como no primeiro experimento, mantêm-se apenas a usina que utiliza rota metálica para produção, como no segundo experimento, porém, desconsidera-se a restrição quanto a sua capacidade produtiva. Dessa forma, é possível agregar o atendimento da demanda por biodiesel do Estado em uma única usina, analisando as conseqüências para a produção familiar e para as demais matérias-primas não usadas em grande escala atualmente em nível estadual. A configuração da cadeia é a apresentada na Figura 32.

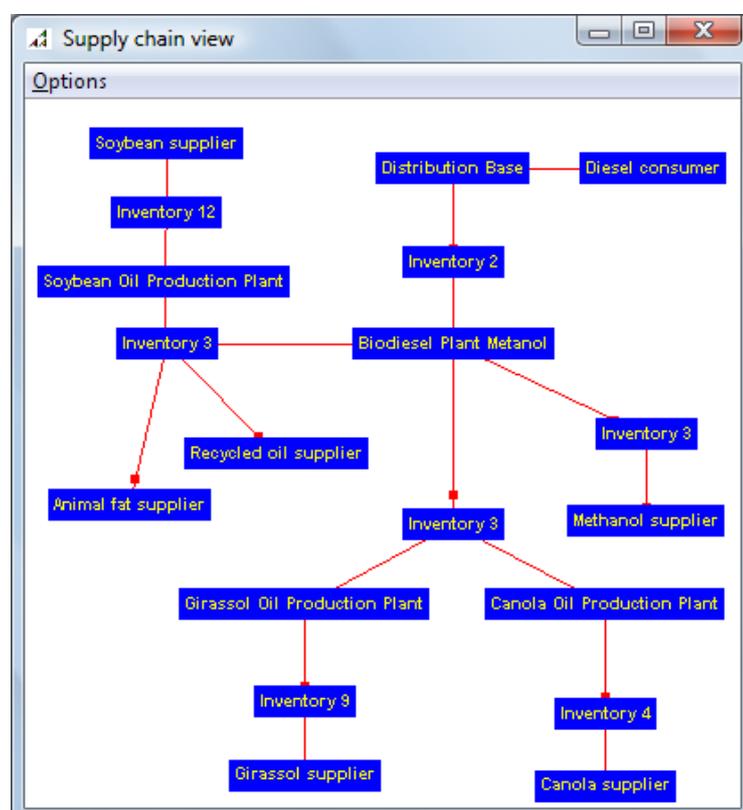


Figura 32 – Configuração da cadeia para terceiro experimento

Os resultados apresentados consistem da média obtida em três rodadas de simulação de 600 passos, assim pode-se verificar os efeitos da adoção da norma número 5, conforme Quadro 4. O Gráfico 8 apresenta a evolução da demanda por matéria-prima resultante do experimento realizado, em termos de custos de produção, foram obtidos valores semelhantes aos obtidos no primeiro experimento realizado, ou seja, um custo médio de produção por litro de R\$ 1,39 sem impostos.

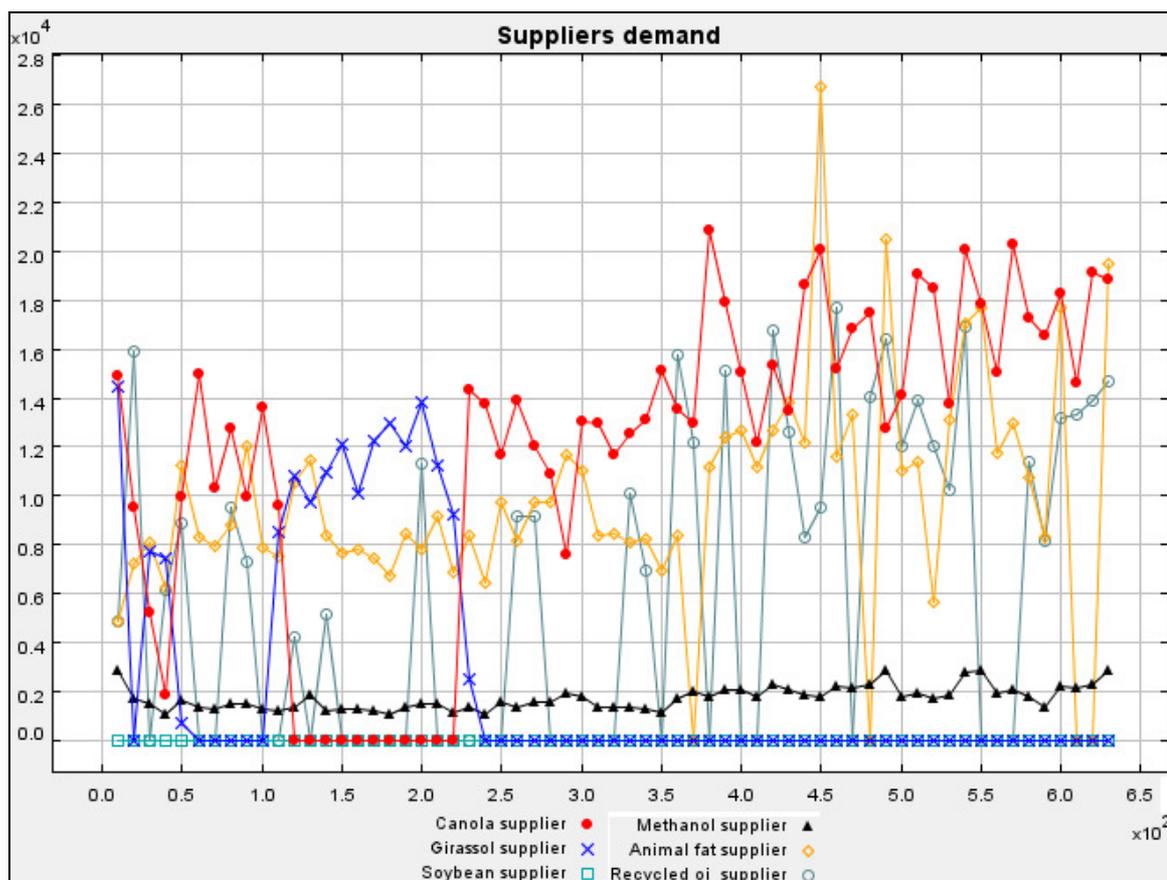


Gráfico 8 – Demanda por matéria-prima

A Tabela 8 apresenta os valores médios de demanda por matéria-prima de forma numérica. A partir desses números pode-se verificar que, para um percentual de mistura de 3%, a demanda por matéria-prima originada da agricultura familiar chega próximo a 4 milhões de litros de óleo ao mês, em média. O Gráfico 8 demonstra que a matéria-prima mais utilizada durante as simulações foi o óleo de canola, para deixar mais claro essa tendência, o agente produtor de óleo de canola enviou, em média, durante as rodadas de simulações, cerca de 208 pedidos ao elo produtor de biodiesel. Quando se trata de um percentual de mistura de biodiesel ao diesel de 5%, chega-se a uma demanda de 6,4 milhões de litros de óleo ao mês.

Esses resultados confirmam a tendência que se verifica no estado do Rio Grande do Sul e no Brasil, onde diversas iniciativas têm sido feitas para incentivar a cultura de canola, conforme confirma trecho da reportagem extraída de BiodieselBR (2008):

O Governo Federal quer diversificar a produção do biodiesel e está incentivando o plantio de canola. Até 2010 agricultores de cinco Estados brasileiros terão seguro total para cultivar a planta, criando uma nova alternativa de renda para produtores rurais. [...] Por enquanto o Brasil só usa o óleo de canola na cozinha, mas ele também pode ser transformado em biocombustível. Pelas metas do Governo Federal, o Rio Grande do Sul deve ser o primeiro a produzir o biodiesel a partir da planta. O Estado já é responsável por 20% da produção nacional de biocombustíveis.

Em termos práticos, a demanda estimada por óleo de canola para a demanda por B3, utilizando uma taxa de conversão para óleo de 40%, resulta em uma necessidade de produção de canola na ordem de 10.000 mil toneladas mensais, ou ainda, equivale a uma produtividade anual de 120.000 mil toneladas, em média. Para B5, a demanda estimada por canola atinge a marca de 16.000 mil toneladas mês, ou seja, 192.000 mil toneladas ao ano.

De acordo com dados informados pela Emater/RS, a área plantada de canola no estado do RS no de 2008 foi de 28 mil hectares, com uma produtividade média estimada de 1.500 kg/hectares. Desse modo, a produção de canola no Estado no ano de 2008 chegou a 42.000 mil toneladas, ou seja, volume bastante inferior a demanda estimada pelo modelo. No Brasil, a produção prevista para 2008 é de 75.000 mil toneladas, ou seja, a produção total atual de canola responde a 62,5% da demanda necessária para produzir B3 no RS e a 39% da demanda para produzir B5, também no RS.

Por outro lado, em relação ao restante da demanda por óleo não originário da agricultura familiar, registrou-se, durante as rodadas de simulação, uma demanda média de 8.300 m³ mensais para percentual de mistura de 3% e 14.489,00 para 5%. Durante os experimentos, a demanda por sebo bovino correspondeu a 73% da demanda total por óleo (6.059 m³ para B3; 10.576 m³ para B5), a demanda por óleo reciclado a 25% da demanda total (2.075 m³; 3.622 m³ para B5) e a demanda por

óleo de soja correspondeu a 2% da demanda total. Convém destacar que o modelo de simulação avalia, a cada passo de simulação, a matéria-prima que apresenta melhor custo-benefício para aquisição.

Tabela 8 – Demanda por matéria-prima (experimento 3)

%	Matéria-prima	Custo unitário médio (R\$)	Demanda média (m ³)	Custo total (R\$)
3	Metanol	0,62	1.347,00	840,38
	Óleo – outras fontes	0,99	8.300,00	8.253,32
	Óleo – Agricultura familiar	1,61	3.983,00	6.425,88
5	Metanol	0,64	2.341,00	1.496,91
	Óleo – outras fontes	1,03	14.489,00	14.952,11
	Óleo – Agricultura familiar	1,91	6.428,00	12.301,69

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os dados apresentados na Tabela 12 do Anexo D, a produção média de sebo bovino no RS é de 2,8 mil toneladas mensais e no Brasil é de 58 mil toneladas mensais. Desse modo, embora a produção de sebo bovino do RS seja inferior a demanda exigida por este modelo de produção de biodiesel, pode-se dizer que o Brasil tem produção suficiente para tal empreendimento, pois o RS é apenas o sétimo maior produtor de sebo bovino no Brasil. A produção do Estado do MS, por exemplo, terceiro maior produtor brasileiro, tem condições de atender a demanda estimada pelo modelo por sebo bovino quando o percentual de mistura é 3%.

A Tabela 13 do Anexo D apresenta uma estimativa de descarte de óleo residual que chega a aproximadamente 3,2 milhões de litros mensais no RS, volume superior a demanda estimada no experimento. Porém, a volume de óleo reciclado disponível no mercado precisa ser melhor estimado, através de pesquisas empíricas, para que se consiga chegar a conclusões mais aprofundadas sobre seu aproveitamento para produção de biodiesel. Como contribuição desses experimentos fica a idéia da boa viabilidade econômica de produção.

Por fim, o Gráfico 9 apresenta a evolução da produção de biodiesel ao longo de uma das rodadas de simulação com o modelo para esse experimento, destaca-se a mudança no percentual de mistura de 3 para 5% a partir do 351º passo de simulação.

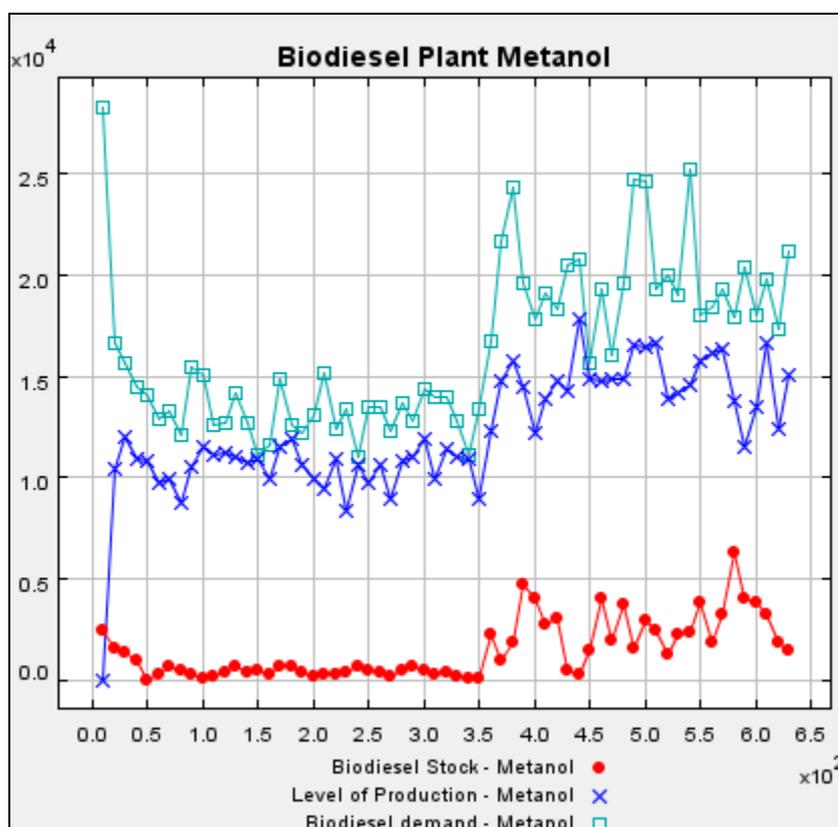


Gráfico 9 – Evolução da produção de biodiesel

6.5 POTENCIALIDADES DO MODELO

Após a realização e interpretação dos experimentos, deve-se ainda destacar a importância e utilidade do modelo desenvolvido para a análise e gestão de cadeias de suprimento. Entre as principais contribuições pode-se citar:

- Estimar níveis de estoque de matérias-primas e/ou produtos acabados;
- Planejar a demanda por matérias-primas e produtos acabados, mesmo na presença de incertezas, através da utilização de dados históricos da simulação;

- Estimar custos de diferentes planos de produção;
- Selecionar fornecedores, conforme heurística apresentada na seção 5.3.4;
- Estimar capacidades de produção de plantas de produção, depósitos e fornecedores;
- Avaliar o impacto de normas sobre a estruturação de cadeias de suprimento e sobre o comportamento dos agentes
- Demonstrar indicadores de desempenho da cadeia diante de diferentes experimentações com o modelo, tais como frequência de pedidos, atrasos, tempo de produção, níveis de estoques, custos, entre outros;
- Modelagem flexível da demanda, custos de produção, níveis de produção, custos de fornecimento e níveis de fornecimento através da utilização de distribuições de probabilidade;
- Em particular, para o contexto do estudo de caso, o modelo permitiu realizar análises de diferentes cenários de produção, fornecendo subsídios para análise da viabilidade de utilização de diferentes matérias-primas para produção de biodiesel, além de possibilitar a estimativa de expansão do cultivo de oleaginosas. O modelo também pode ser utilizado por órgãos governamentais e empresas do setor que desejam estudar a cadeia do biodiesel, avaliar sua competitividade e avaliar os impactos causados por políticas econômicas e regulamentações.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É crescente o interesse pela área de gestão de cadeias de suprimento, sua emergência fica bastante clara quando se recorre a literatura especializada pelo tema, há diversos problemas nessa área que chamam a atenção de pesquisadores de diferentes áreas, tais como: problemas de decisão quanto ao número, localização e capacidade de depósitos e plantas de produção; problemas de decisão quanto a nível de produção, pedidos, políticas de gerenciamento de estoques e distribuição; problemas de decisão quanto a rota de veículos, alocação de recursos e equipamentos; enfim, o rol de problemas a serem pesquisados nessa área envolve decisões de nível estratégico, tático e operacional.

Analisando estes problemas sob a ótica da pesquisa operacional, diversos modelos e sistemas de apoio à decisão podem ser desenvolvidos para melhorar a eficiência e eficácia das decisões a serem tomadas em diferentes horizontes de tempo de planejamento, diversos problemas ainda merecem melhores soluções e diferentes alternativas de modelagem.

Esse trabalho procurou contribuir com o estado da arte de modelagem de cadeias de suprimento apresentando a estruturação de um modelo de simulação que propõe a idéia de utilizar agentes normativos para estudar cadeias de suprimento. A motivação principal para a proposição desse modelo partiu da análise de literatura especializada na área, especialmente sobre a literatura que trata sobre modelagem de cadeias de suprimento utilizando agentes de software. Analisando os trabalhos publicados nos principais periódicos da área, verificou-se uma diversidade de soluções e modelos, porém, algumas necessidades de modelagem para trabalhos futuros foram detectadas, entre as quais: (1) a maior parte dos trabalhos procura resolver um problema específico de uma cadeia de suprimentos, ou seja, pouca atenção é dada a soluções mais genéricas, que podem ser expandidas

facilmente; (2) a definição dos relacionamentos entre os atores da cadeia é feita antes da simulação iniciar, ou seja, os agentes apresentam pouca capacidade de observação do seu ambiente; (3) em muitos casos, os agentes apresentam pouca ou nenhuma capacidade de aprendizado ao longo da simulação. Na idéia de aprendizado e adaptação, é tarefa do agente determinar ao longo da simulação parâmetros relacionados a níveis de estoque, níveis de produção, melhores fornecedores e, a partir daí, adaptar-se a diferentes situações do ambiente onde está inserido; (4) não se considera a idéia de agentes externos influenciarem no comportamento dos agentes, propondo indicadores, interferindo nas metas de produção, proibindo relacionamentos, enfim, nos trabalhos atuais, cada agente busca maximizar seus objetivos individualmente, não se considera a possibilidade de normas interferindo em seu comportamento.

A partir dessas motivações, procurou-se estruturar um modelo de simulação que pudesse contemplar tais necessidades. A primeira das necessidades levantadas, foi contemplada no modelo através da utilização do paradigma de orientação a objetos e da linguagem Java para a programação dos agentes do modelo, dessa forma, consegue-se estender o modelo facilmente, bem como adicionar novas funcionalidades aos agentes já desenvolvidos. A segunda necessidade levantada foi contemplada através da criação de um banco de dados que representa o ambiente onde o agente está inserido (Anexo E), em certos intervalos de tempo, cada agente realiza consulta nessa base de dados para saber se sua rede de relacionados está atualizada. Essa ação vale tanto para atualizar novos agentes, como para atualizar aqueles agentes que deixaram de existir ao longo da simulação.

A terceira necessidade de modelagem detectada foi contemplada no modelo através da utilização de dados históricos gerados ao longo da própria simulação, cada agente armazena dados sobre demanda de produtos ou matérias-primas, níveis de produção, níveis de estoque, custos de fornecimento, tempo de entregas, entre outros, assim, a partir desses dados históricos torna-se possível realizar, a cada período de tempo, estimativas sobre indicadores de produção, níveis de estoque a manter e melhores fornecedores, por exemplo.

A quarta necessidade de modelagem levantada durante a fase de pesquisa bibliográfica foi contemplada no modelo através da utilização do modelo de López *et al.* (2005) e da sua integração ao modelo de agentes para cadeias de suprimento. As idéias advindas da área de sistemas multiagentes normativos foram incorporados ao modelo através do desenvolvido dos agentes *NormativeAgent*, *LegislatorAgent* e *RegulatorAgent*. Com isso pode-se ponderar a atuação de cada ator da cadeia de acordo com as normas propostas, pelos incentivos e pelas punições que estão relacionadas a cada norma.

Após o desenvolvimento desse modelo inicial, o caso da cadeia do biodiesel foi utilizado para validar todas as idéias propostas. Nesse aspecto deve-se ressaltar também que, conforme levantamento bibliográfico apresentado, poucas pesquisas estavam sendo direcionadas para o desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão para o contexto dessa cadeia dentro de uma visão sistêmica de análise dos resultados.

Em relação aos resultados obtidos com a utilização do modelo para análise da cadeia do biodiesel, pode-se estimar que não há diferenças significativas entre o custo de produção da rota ética e metélica; que o sebo bovino e óleo reciclado apresentam-se como uma ótima opção para diminuir os custos de produção de biodiesel; que o custo de produção com óleo de soja é cerca de 30% superior a melhor combinação de matérias-primas determinadas pelo modelo de simulação, composta por diferentes percentuais de sebo bovino e óleo reciclado; que a contribuição da receita da glicerina para reduzir o custo de produção de biodiesel, dados as baixas cotações atuais, é de cerca de R\$ 0,07 por litro; que a canola representou melhor alternativa de matéria-prima para a agricultura familiar quando comparada ao girassol, pois apresentou melhor relação custo-benefício durante os experimentos; que o girassol, dado seu elevado preço de mercado, se apresentou como uma matéria-prima pouco viável economicamente para produção de biodiesel; que os níveis atuais de produção de sebo bovino no Brasil podem suprir a demanda de óleo para produção de biodiesel; que é necessário aumentar a produção de canola, caso a mesma seja utilizada como alternativa de produção de biodiesel, como alternativa de compra de matéria-prima da agricultura familiar.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Na continuidade desse trabalho uma série de atividades podem ser desenvolvidas, entre elas:

- (i) desenvolver uma interface gráfica para o usuário projetar a cadeia de suprimentos, podendo configurar os parâmetros para cada agente, hoje a estruturação da cadeia e a configuração dos parâmetros dos agentes é realizada em banco de dados próprio (ANEXO E);
- (ii) expandir o modelo desenvolvido para considerar aspectos de distribuição, roteamento e alocação de recursos;
- (iii) adicionar agentes de mercado ao modelo, tais como bolsa de valores, por exemplo;
- (iv) estudar como criar normas dinamicamente e como resolver conflitos entre normas durante a simulação, hoje não se considera que uma norma pode interferir em outra, ou que possa existir conflitos entre elas;
- (v) desenvolver novas estratégias de aprendizado para os agentes, utilizando, por exemplo, redes neurais, aprendizagem por reforço ou algoritmos genéticos;
- (vi) desenvolver novas estratégias para seleção de fornecedores;
- (vii) aplicar o modelo em outros contextos de estudo, adicionando funcionalidades específicos e/ou aprimorando as existentes.

7.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Considerando a amplitude do tema abordado nesse trabalho, algumas restrições e limitações precisaram ser feitas durante o seu desenvolvimento para que se atingisse o objetivo central da pesquisa, ou seja, compor a idéia de agentes normativos com gestão de cadeias de suprimento.

Uma das primeiras limitações dos resultados obtidos com esse trabalho diz respeito ao horizonte de tempo de coleta de dados. Os dados utilizados no modelo de simulação, em sua maioria, foram coletados no período de janeiro de 2007 a novembro de 2008. Como se sabe, as cotações de preços das *commodities* utilizadas no modelo sofrem variações consideráveis, sazonalidades são comuns nesses casos, a utilização, portanto, de um período maior, pode amenizar variações abruptas de cotações de preços, crises agrícolas e outros cenários adversos ou favoráveis. Outra importante consideração acerca dos resultados diz respeito ao fato de que todos os custos são estimados a preços de mercado, custos de produção foram utilizados apenas para as usinas de biodiesel.

Em relação ao modelo e, em particular, a utilização da média móvel para determinação dos níveis de estoque de matérias-primas, verificou-se que essa estratégia se comporta muito bem quando a demanda é estacionária, porém, em alguns casos de testes, essa estratégia reagiu muito lentamente quando há mudanças repentinas e abruptadas, representando sazonalidades.

Outro aspecto diz respeito ao modelo de decisão para adoção de normas. O modelo desenvolvido segue o modelo de López *et al.* (2005), porém, trata-se de um modelo determinístico, ou seja, dado um valor de reforço e um valor de punição, o agente escolhe pelo maior valor. Outros critérios poderiam ser utilizados na decisão, inclusive de caráter subjetivo, embora tenha maior dificuldade de mensuração. Futuramente, pode-se avaliar o uso de lógica difusa para modelar as decisões sobre deliberação de normas.

REFERENCIAS

ALVARES, L.; SICHMAN, J. Introdução aos Sistemas Multiagentes. In: Jornada de Atualização em Informática, 1997, Brasília. **Anais...** Brasília: Unb, 1997. p. 1-37.

ALLWOOD, J. M., LEE, J. H., The design of an agent for modelling supply chain network dynamics. **International Journal of Production Research**, v. 43(22), p. 4875-4898, 2005.

AMBROS, J. O., **A relação usuário-produtor em empresas da cadeia automobilística gaúcha**. Porto Alegre: UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Administração, 2000. (Dissertação de Mestrado)

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em <http://www.anp.gov.br>. Acesso em 12 de dezembro de 2008.

ANDRADE FILHO, M., **Aspectos técnicos e econômicos da produção de biodiesel: o caso do sebo bovino como matéria-prima**. Salvador: UNIFACS, Programa de Pós-Graduação em Energia, 2007. (Dissertação de Mestrado).

ARAUJO, V. K. W. S., **Avaliação dos custos de produção de biodiesel a partir de óleos residuais de fritura**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, 2008. (Dissertação de Mestrado)

BARROS, G. S. C., SILVA, A. P., PONCHIO, L. A., ALVES, L. R. A., OSAKI, M., CENAMO, M., Custos de Produção do Biodiesel no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, n. 3, p. 36-50, 2006.

BEAMON, B. M. Supply chain design and analysis: Models and methods. **International Journal of Production Economics**, v. 55, p. 281-294, 1988.

BEAMON, B. M. Measuring supply chain performance **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, p. 275-292, 1999.

BENDER, M. Economic feasibility review for community-scale cooperatives for biodiesel. **Biores Technol**, Volume 70, pp. 81-87, 1999.

BENEDETTI, O., PLÁ, J. A., RATHMANN, R., PADULA, A. D., Uma proposta de modelo para avaliar a viabilidade do Biodiesel no Brasil. **Teoria e Evidência Econômica**, v. 14, n. 82, 2006.

BIODIESELBR. Disponível em <http://www.biodiesebr.com>. Acesso em 16 de agosto de 2008.

BOELLA, G., van der TORRE, L., VERHAGEN, H., Introduction to normative multiagent systems. **Computational & Mathematical Organization Theory**, v. 12 p. 71-79, 2006.

BOOCH, G., **Object analysis and design with application**. Redwood City: The Benjamin/Cummings, 1994

BOOCH, G., RUMBAUCH, J., JACOBSON, I., **The Unified Modeling Language User Guide**. Massachusetts: Addison Wesley, 1999.

BORENSTEIN, D. Towards a practical method to validate decision support systems, **Decision Support Systems**, v. 23, p. 227–239, 1998.

BORGES, M. C., PEREZ, R., SILVA A. G., Decision Support System related to the Biodiesel Program in Brazil. In: AMS2006 Applied Modeling and Simulation, 2006, Buzios.

BOZBAS K., Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, In Press, Corrected Proof, August 2005

BILICH, F., DA SILVA, R., Análise multicritério da produção de Biodiesel. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais...** Goiânia: 2006.

BISWAS, S., NARAHARI, Y. Object Oriented modeling and decision support for supply chain. **European Journal of Operational Research**, v. 153, p. 704-726, 2004.

BRATMAN, M. E., ISRAEL, D. J., POLLACK, M. E., Plans and resource bounded practical reasoning, **Computational Intelligence**, v. 4, n. 4, p. 349-355, 1988.

BRUYNE, P., HERMAN, J., SCHOUTHEETE, M., **Dinâmica da pesquisa em ciências sociais**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1991.

CADERNO NAE - Processo estratégicos de Longo Prazo: Biocombustíveis. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, n. 2, 2004.

CÁNEPA, D.L. **Alternativas de configuração da cadeia produtiva do Biodiesel na perspectiva de Centros de P&D**. Porto Alegre: UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, 2004. (Dissertação de Mestrado)

CARRARETTO, C., MACOR, A., MIRANDOLA, A., STOPPATO, A., TONON, S., Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations, **Energy**, v. 29, 2004.

CAVALIERI, S., CESAROTTI, V., INTRONA, V., A Multiagent Model for Coordinated Distribution Chain Planning. **Journal Of Organizational Computing and Electronic Commerce**, v. 13(3-4), p. 267–287, 2003.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em <http://www.cepea.esalq.usp.br/>. Acesso em 18 de novembro de 2008.

CHATFIELD, D. C., C., JACK, HAYYA, C., HARRISON, T. P., A multi-formalism architecture for agent-based, order-centric supply chain simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 15, p. 153–174, 2007.

CHIU, M., LIN, G., Collaborative supply chain planning using the artificial neural network approach **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 15 (8), p. 787-796, 2004.

CHWIF, L., MEDINA, A. C., **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. Bravarte: São Paulo, 2006.

COLLIER, N., RePast : An extensible framework for agent simulation. Disponível em: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/RepastTutorial.Collier.pdf>. Acesso em 20 ago.2008.

COLLIER, N., HOWE, T., NORTH, M., Onward and Upward: The Transition to Repast 2.0, Proceedings of the First Annual North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference, 2003.

DAL ZOT, F. **Biodiesel no Rio Grande do Sul: Um Modelo de Localização e Distribuição das Usinas de Biodiesel**. Porto Alegre: UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Administração, 2006. (Dissertação de Mestrado)

DANIEL, J. S. R.; RAJENDRAN, C. A simulation-based genetic algorithm for inventory optimization in a serial supply chain. **International Transactions in Operational Research**, v. 12, p.101-127, 2005.

DAVIDSSON, P., Agent Based Social Simulation: A Computer Science View, **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 5, n. 1, 2002.

DAVIDSSON, P., KWERNSTEDT, F., A multi-agent system architecture for coordination of just-in-time production and distribution, **The Knowledge Engineering Review**, v. 17, n. 4, p. 317–329, 2002.

DEMIRBAS, M. F., BALAT, M., Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: A global perspective. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 2371-238, 2006.

DORADO, M.P., CRUZ, F., PALOMAR, J.M., LÓPEZ, F.J., An approach to the economics of two vegetable oil-based biofuels in Spain. **Renewable Energy**, v. 31, p. 1231-1237, 2006.

DROGOUL, A. VANDERGUE, D., MEURISE, T. Multi-Agent Based Simulation: Where are the Agents? Proceedings of Multi-Agent Based Simulation Conference, Bologna, Italy, 2002.

FALEIROS, E. L., **Biodiesel Plantas Contínuas – Custos e Rendimentos**. Disponível em <http://www.dedini.com.br>. Acesso em 10 de setembro de 2008.

FERREIRA, L. BORENSTEIN, D. A DSS to location biodiesel production plants. In 9th ICDSS. **Anais...** Kolkata (Índia): 2007

FOX, M. S., BARBUCEANU, M., TEIGEN, R. Agent-oriented supply chain management, **The International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 12, p. 165–188, 2000.

FREITAS, A. A. M. **Análise crítica do projeto de cadeias de suprimento: modelagem e estudo de caso**. Rio de Janeiro: UFRJ, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, 2004. (Dissertação de Mestrado).

FREITAS, L. A. A., JUNIOR, E. F. N. Logística de distribuição do biodiesel da mamona: Prováveis canais de distribuição e a integração dos prestadores de serviços logísticos. In: **Anais do XI SIMPEP**, Bauru, São Paulo, 2004.

GE, Y., YANG, J.-B., PROUDLOVE, N., SPRING, M., System Dynamics modeling for supply chain management: A case study on a supermarket chain in the UK. **Internacional Transactions in Operational Research**, v. 11, p. 495-509, 2004.

GIANNOCCARO, I., PONTRANDOLFO, P., Inventory management in supply chains: a reinforcement learning approach, **International Journal of Production Economics**, v. 78, p. 153-161, 2002.

GIL, A. C., **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GILBERT, N., **Agent-Based Models**. Sage Publications: Thousand Oaks, California, 2008.

GILBERT, N., BANKES, S., Platforms and Methods for Agent-based Modeling, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, v. 99, n. 3, pp. 7197-7198, 2002.

GIMENES, I. M. S., HUZITA, E. H. M., **Desenvolvimento Baseado em Componentes: Conceitos e Técnicas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2005.

GOLFARELLI, M., RIZZI, S., PROLI, A., Designing what-if analysis: towards a methodology, Proceedings of the 9th ACM international workshop on Data warehousing and OLAP, 2006, Arlington, Virginia, USA.

GOLDBARG, M. C., PACCA, H., LUNA, L. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro: Editora Campus. 2005.

GOVINDU, R., CHINNAN, R. B., MASCF: A generic process-centered methodological framework for analysis and design of multi-agent supply chain systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, p. 584–609, 2007.

GUNASEKARAN, A., McGAUGHEY, R. E. A framework for supply chain performance measurement, **International Journal of Production Economics**, v. 87, p. 333-347, 2004.

HASS, M. J., McALOON, A. J., YEE, W. C., FOGLIA, T. A., A process model to estimate Biodiesel production costs, **Bioresource Technology**, n. 97, p. 671-678, 2006.

HUGOS, M. **Essentials of Supply Chain Management**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2003

HIGUCHI, T., TROUTT, M. D. Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product – Lessons from the Tamagotchi case. **Computers & Operations Research**, v. 31, p. 1097-1114, 2004.

HUNG, W. Y., SAMSATLI, N. S., SAHH, N. Object-oriented dynamic supply-chain modeling incorporated with production scheduling, **European Journal of Operation Research**, v. 169, p. 1064-1076, 2006

IPA – Inovação e Projectos em Ambiente. Linhas de Definição Estratégica do Sistema de Gestão dos Óleos Alimentares Usados. Disponível em http://azinhaga.net/portal/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=101. Acesso em 26 de dezembro de 2008.

JULKA, N., SRINIVASAN, R., KARIMI, I. Agent-based supply chain management – 1: Framework, **Computers and Chemical Engineering**, v. 26, 1755–1769, 2002.

JANSSEN, M., The architecture and business value of a semi-cooperative, agent-based supply chain management system. **Electronic Commerce Research and Applications**, v. 4, p. 315–328, 2005.

KHALIL, C. N.. As tecnologias de produção de biodiesel. In: José Rincon Ferreira; Carlos Manuel Pedroso Neves Cristo. (Org.). O futuro da indústria: biodiesel. Brasília: MDIC-STI/IEL, p. 83-90, 2007.

KIMBROUGH, S. O., WU, D. J., ZHONG, F., Computers play the beer game: can artificial agents manage supply chains? **Decision Support Systems**, v. 33, p. 323–333, 2002.

KIM, C. O., JUN, J., BAEK, J. K., SMITH, R. L., KIM, Y. D., Adaptive inventory control models for supply chain management. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, p. 1184-1192.

LAI, C. L., LEE, W. B., IP, W. H., A study of system dynamics in just-in-time logistic. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 138, p. 265-269, 2003.

LAW, A. M., KELTON, W. D., **Simulation Modeling and Analysis**, ew York: McGraw-Hill, 2000.

LEIRAS, A., HAMACHER, S., SCAVARDA, L. F., Análise da viabilidade econômica da cadeia produtiva do Biodiesel: o caso da soja da Bahia, In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...** Foz do Iguaçu: 2007.

LIM, S. J., SUK, J. J., KIM, K. S., PARK, M. W., A simulation approach for production-distribution planning with consideration given to replenishment policies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, p. 593-603, 2006.

LONGO, F., MIRABELLI, G., An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation, **Computers & Industrial Engineering**, v. 54, 570-588, 2008.

LOPEZ, F., LUCK, M., Modelling Norms for Autonomous Agents. In Proceedings of the 4th Mexican International Conference on Computer Science, 2003.

LOPEZ, F., LUCK, M., d'INVERNO, M., A normative framework for agent-based systems. In: Proceedings of the Symposium on Normative Multiagent Systems, The Society for the Study of Artificial Intelligence and the Simulation of Behaviour, p. 24-35, 2005.

LUCK, M., McBURNEY, P., PREIST, C., A Manifesto for Agent Technology: Towards Next Generation Computing, **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 9, p. 203-252, 2004

LUNA-REYES, L. L., ANDERSEN, D. L., Collecting and analyzing qualitative data for system dynamics: methods and models, **System Dynamics Review**, v. 19, n. 4., p. 271-293, 2003.

MACAL, C. M., NORTH, M. J., Tutorial on agent-based modeling and simulation, **Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference**, 2005.

MAES, P., The agent network architecture (ANA). **SIGART Bulletin**, v. 2, n. 4, p. 115-120

MALHOTRA, N. K., **Introdução à Pesquisa de Marketing**. São Paulo: Prentice Hall do Brasil. 2005.

MANZINI, R., FERRARI, E., GAMBERI, M., Simulation performance in the optimization of the supply chain. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 16, n. 2, p. 127-144. 2005.

MARTINS, L. M., **Os relacionamentos privilegiados pela agroindústria láctea gaúcha no gerenciamento de sua cadeia de suprimentos**. Porto Alegre: UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Administração, 2000. (Dissertação de Mestrado).

MELE, F. D., GUILLÉN, G., ESPUÑA, A., PUIGJANER, L., An agent-based approach for supply chain retrofitting under uncertainty. **Computers and Chemical Engineering**, v. 31, p. 722–735, 2007.

METHANEX. Disponível em <http://www.methanex.com>. Acesso em 17 de dezembro de 2008.

MIN, H.; ZHOU, G., Supply chain modeling: past, present and future, **Computers & Industrial Engineering**, v. 43, p. 231-249, 2002.

MINGERS, J., Combining IS research methods: towards a pluralist methodology, **Information System Research**, v. 12, n. 3, p. 240-259, 2001.

MOSS, S., EDMONDS, B., Sociology and Simulation: Statistical and Qualitative Cross-Validation, **The American Journal of Sociology**, v. 110, n. 4, p. 1095-1132, 2005.

MÜLLER, J. P., Architectures and applications of intelligent agents: A survey, **The Knowledge Engineering Review**, v. 13, n. 4, p. 353-380, 1998.

NISSAN, M. E., Agent-based supply chain integration. **Information Technology and Management**, v. 2, p. 289–312, 2001.

Ng, W. K., PIPIANE, R., VISWANATHAN, S., Simulation workbench for analysing multi-echelon supply chains. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 14, n. 5, p. 449-457, 2003.

NORTH, M.J., COLLIER, N. T., VOS, J. R., Experiences Creating Three Implementations of the Repast Agent Modeling Toolkit, **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation**, v. 16, n, 1, p. 1-25, 2006.

OLIVÉRIO, J. L. O programa brasileiro de biodiesel na visão da indústria de equipamentos. In: José Rincon Ferreira; Carlos Manuel Pedroso Neves Cristo. (Org.). O futuro da indústria: biodiesel. Brasília: MDIC-STI/IEL, p. 105-126, 2007.

OLIVEIRA, C. M., CARVALHO, M. F. H., **Análise de políticas de gestão em cadeias de suprimentos por modelos de simulação**, Gestão & Produção, v. 11, n. 3, p. 313-329, 2004.

PARENTE, E. J. DE S. ET. AL, **Biodiesel**: uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza: Tecbio, 2003.

PERES, J. R. R., BELTRÃO, N. E. M. Oleaginosas para biodiesel: situação atual e potencial. In: José Rincon Ferreira; Carlos Manuel Pedroso Neves Cristo. (Org.). O futuro da indústria: biodiesel. Brasília: MDIC-STI/IEL, p. 67-82, 2007.

PERSON. F., OLHAGER, J., Performance simulation of supply chain designs. **International Journal of Production Economics**, v. 77, p. 231-245, 2002.

PIDD, M., **Modelagem empresarial**: ferramentas para tomada de decisão. Bookman: Porto Alegre, 1998.

PLÁ, J. A., Existe viabilidade econômica para o biodiesel no Brasil?, **Indicadores Econômicos FEE**, v. 32, p. 271-294, 2005.

PNPB. Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. Ministério de Minas e Energia do Governo Federal do Brasil. Disponível em <http://www.biodiesel.gov.br/faq.html>. Acesso em: 17 de setembro de 2008.

REPAST, Repast Organization for Architecture and Development, Disponível em <http://repast.sourceforge.net>. Acesso em: 28 nov.2008.

RUSSEL, S. J., NORVIG, P., **Artificial Intelligence**: a Modern Approach, New Jersey: Prentice Hall, 1995.

RAILSBACK, S. F., LYTINEN, S., L., JACKSON, S. K., Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations, **SIMULATION**, v. 82, n. 9, p. 609-623, 2006.

SABRI, E. H., BEAMON, B. M., A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. **Omega**, v. 28, p. 581-598, 2000

SADEH, D., NORMAN, M., HILDUM, W., KJENSTAD, D., ALLEN, T., MASCOT: An Agent-Based Architecture for Coordinated Mixed-Initiative Supply Chain Planning and Scheduling. In: Workshop on Agent-Based Decision Support in Managing the Internet-Enabled Supply-Chain, 1999.

SAMED, M. MARIANI, D. PEREIRA, N., Modelagem de uma Planta de Biodiesel e Otimização através de um Algoritmo Genético. In: XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais...** Fortaleza: 2007.

SAMUELSON, D. A., MACAL, C. M., Agent-Based Simulation. **Operations Research/Management Science Today**, v. 33, n. 4, p. 34-38, 2006.

SCHIERITZ, N., GRÖSSLER, A., Emergent Structures in Supply Chains- A Study Integrating Agent-Based and System Dynamics Modeling. In: Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 2002.

SCOT. Scot Consultoria. Disponível em <http://www.scotconsultoria.com.br>. Acesso em 17 de julho de 2008.

SEBRAE. Cartilha sobre Biodiesel. Disponível em http://www.biodiesel.gov.br/docs/Cartilha_Sebrae.pdf. Acesso em 19 de dezembro de 2008.

SILVA, V. T., LUCENA, C. J. P., Modeling multi-agent systems. **Communications of the ACM**, v. 50, n. 5, p. 103-108, 2007.

SIMCHI-LEVI, D., KAMINSKY, P., SIMCHI-LEVI, E., **Cadeia de suprimentos: projeto e gestão – conceitos, estratégias e estudos de casos**. Porto Alegre: Bookman, 2003.

SUARES, P. A. Z., ABREU, F. R., O Biodiesel no Brasil. **Senatus**, Brasília, v.4, n. 1, p. 49-52, 2005.

SWAMINATHAN, J.M., SMITH, S.F., SADEH, N.M., Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach, **Decision Sciences**, v. 29, n. 3, 1998.

SRBLJINOVIC, A., SKUNCA, O., An introduction to agent based modelling and simulation of social processes. **Interdisciplinary Description of Complex Systems**, v. 1, p. 1-8, 2003.

STERMAN, J. D., **Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World**. USA: McGraw-Hill Higher Education, 2000.

TOBIAS, R., HOFMANN, C., Evaluation of Free Java-libraries for Social-scientific Agent Based Simulation, **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 7, n. 1, 2003.

TOWILL, D. R., Time compression and supply chain management – a guided tour. **Logistics Information Management**, v. 9, n. 6, p. 41-53, 1996.

TURBAN, E., MCLEAN, E., WETHERBE, J. **Tecnologia da Informação para Gestão – Transformando os negócios na economia digital**. 3ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2004.

VALLURI, A., CROSON, D. C., Agent learning in supplier selection models. **Decision Support Systems**, v. 39, p. 219-240, 2005.

VAZQUEZ, L. E. M., LOPEZ, F. L., An Agent-Based Model for Hierarchical Organizations. **Lecture Notes in Computer Science**, p. 194-211, 2007.

van der ZEE, D. J., van der VORST, J. G. A. J., A modeling framework for supply chain simulation: Opportunities for improved decision making, **Decision Sciences**, v. 36, n. 1, p.65-95, 2005.

VICENTE, P. O uso de simulação como metodologia de pesquisa em ciências sociais. **Cadernos EBAPE.BR**, v. III, n. 1, 2005.

VRIJHOEF, R., KOSKELA, L. The four roles of supply chain management in construction. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 6, p. 169-178, 2000.

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**, v. 34, p. 1680–1691, 2008.

ZHANG, Y., DILTS, D., System dynamics of supply chain network organization structure, **Information Systems and e-Business Management**, v. 2, p. 187-206, 2004.

WAGNER, G., The Agent-Object-Relationship Meta-Model: Towards a Unified View of State and Behavior, **Information Systems**, v. 28, n. 5, 475-504, 2003.

WEISS, G., **Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence**. Cambridge: The MIT Press, 2000.

WOOD JR, T.; ZUFFO, P. K., Supply Chain Management. **Revista de Administração de Empresas**. São Paulo: FGV, vol. 38, n. 3, 1998.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multi-Agent Systems**, John Wiley & Son: New York, 2002.

WOMACK, J. P., JONES, D. T., ROOS, D., **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1992.

WU, H., SUN, C., What Should We Do Before Running a Social Simulation? The Importance of Model Analysis, **Social Science Computer Review**, v. 23; 221-234, 2005.

ANEXO A – FRAMEWORK PARA AVALIAR CADEIAS DE SUPRIMENTO

Processo \ Nível	Estratégico	Tático	Operacional
Planejamento	<ul style="list-style-type: none"> • Valor percebido pelo produto; • Lead time de pedido; • Custos de processamento de informação; • Tempo total de ciclo; • Tempo de ciclo de desenvolvimento de produto; 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de filas; • Tempo de ciclo de desenvolvimento de produto; • Precisão dos sistemas de <i>forecasting</i>; • Tempo de processos; • Produtividade de recursos humanos; • Prioridade de atendimento de pedidos; 	<ul style="list-style-type: none"> • Prioridade de atendimento de pedidos; • Produtividade de recursos humanos;
Fornecimento		<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho de fornecedores; • Lead time x normas estabelecidas; • Preços de fornecimento em relação a preços de mercado; • Eficiência de atendimento a pedidos; 	<ul style="list-style-type: none"> • Preços de fornecimento em relação a preços de mercado; • Eficiência de atendimento a pedidos;
Produção	<ul style="list-style-type: none"> • Mix de produtos e serviços; 	<ul style="list-style-type: none"> • Percentual de defeitos; • Preço de operação por hora; • Utilização da capacidade instalada; 	<ul style="list-style-type: none"> • Percentual de defeitos; • Preço de operação por hora; • Indicador de produtividade humana;
Entrega	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidade para atender necessidades dos clientes; • Efetividade do sistema de distribuição; 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidade para atender necessidades dos clientes; • Efetividade do sistema de distribuição; • Efetividade de método de fatura de entregas; • Percentual de produtos em trânsito; • Confiabilidade de entregas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade dos produtos entregues; • Efetividade de método de fatura de entregas; • Entregas sem defeito; • Confiabilidade de entregas;

Fonte: Gunasekaran e McGauchey (2004, p. 345)

ANEXO B – ARQUITETURA PARA MODELAGEM DE AGENTES

Swaminathan *et al.* (1988) apresentaram o trabalho que é considerado o artigo seminal na área de modelagem de cadeias de suprimento utilizando a abordagem por agentes. No trabalho, os autores identificaram os diferentes tipos de agentes que podem fazer parte de uma cadeia de suprimento, após propuseram uma arquitetura de agente genérico que pode ser especializado para executar diferentes atividades, conforme o interesse de modelagem.

A descrição do agente proposto no trabalho possibilita a especificação de aspectos estáticos e dinâmicos (aqueles que mudam no decorrer da simulação quando do tratamento de evento e quando da interação com outros agentes) das diferentes entidades que compõem uma cadeia de suprimentos. Num dado instante de tempo de simulação, cada agente pode ser caracterizado através dos seguintes atributos:

S_i = atributos que caracterizam o estado do agente i num instante de tempo. Atributos de estado incluem, por exemplo, nível de estoque de produto, custos de produção, custos de transporte, custo de fornecimento, demanda por produtos, entre outros. Associado com cada um desses atributos há métodos para consultar e atualizar esses valores;

D_i = conhecimento do agente i em relação a outros agentes. Como cada agente é localmente definido, normalmente cada um deles tem apenas uma visão incompleta sobre os demais agentes e sobre o sistema de maneira mais global. A base de conhecimento de um agente é formada por informações passadas acerca dos outros agentes, assim como informações de caráter dinâmico. Por exemplo, confiabilidade de um fornecedor, tempo médio de entrega e preço médio de fornecimento;

IC_i = conjunto de restrições que definem o relacionamento com outros agentes do seu ambiente. Cada agente possui um conjunto de agentes com os quais ele pode interagir;

Q_i = prioridade do agente i . Esse atributo é utilizado para gerenciar prioridades de atendimento;

PM_i = medidas de desempenho associadas com o agente i ;

I_i = conjunto de mensagens de entrada no agente i ;

O_i = conjunto de mensagens de saída no agente i ;

c_i = mensagens de entrada escolhidas pelo agente i para processamento. Por exemplo, para determinar o próximo ponto de atendimento, um agente de transporte pode chamar uma método para otimização de roteamento apropriado;

Φ_i = elementos de controle do agente i . Um elemento de controle é utilizado quando há necessidade de tomar uma decisão quando do processamento de uma mensagem. $M_i(c_i)$ define a semântica de processamento de cada mensagem c_i no agente i . Rotinas para processamento de mensagens podem utilizar um ou mais elementos de controle c_i . Por exemplo, quando se está processando uma mensagem de pedido de um determinado produto, é necessário chamar um método para realizar o atualizar o estoque desse produto. Em alguns casos, mais de um elemento de controle é utilizado, por exemplo, antes de realizar qualquer ação relacionada a estoque o agente pode consultar a capacidade de produção de cada agente fornecedor, para depois realizar ações de atualização de estoque;

$P(D_i, S_i, I_i, Q_i)$ = função de seleção que escolhe uma seqüência de mensagens de entrada (I_i) a ser processada levando em consideração a base de conhecimento do agente (D_i), o estado corrente (S_i) e as prioridades (I_i) de cada agente i . Por exemplo, quando um agente produtor recebe pedido de dois agentes do tipo cliente, essa função é utilizada para determinar a seqüência de atendimento baseado nas

prioridades estabelecidas para cada agente cliente. Esse tipo de seqüenciamento torna-se interessante quando não há estoque suficiente para atendimento das solicitações. A prioridade de cada agente pode ser atualizada no decorrer da simulação.

A seqüência de eventos geradas pelo processamento de cada mensagem de entrada por um dado agente i é ilustrada na Figura 33. Cada agente deve ser definido de acordo seus objetivos, os quais determinam as metas (do inglês, *commitment*) e os elementos de controle para interagir com outros agentes. No artigo, os autores explicam a seqüência de processamento de mensagens utilizando um agente Varejista como exemplo. Assim, se o *Objetivo* do agente Varejista for reduzir o tempo de atendimento de pedidos, mantendo os custos com estoques sob controle, então pode-se estipular que uma das *Metas* do agente é atingir um nível de serviço de cerca de 98%, por exemplo, para Clientes com prioridade mais alta. Desse modo, para atender essa Meta, um agente Varejista pode utilizar políticas de controle de estoque e técnicas de previsão de demandas avançadas. A Meta estipulada pelo agente influencia sua prioridade de atendimento (Q_i). Por sua vez, a prioridade de atendimento influencia no processamento das mensagens de entrada (I_i). Por exemplo, o agente Varejista pode priorizar (P) o atendimento de Clientes seguindo uma classificação A-B-C. As mensagens selecionadas para atendimento (c_i) são analisadas por tipo (fluxo de material ou fluxo de informação). Cada mensagem tem um controlador de mensagem $M_i(c_i)$ que especifica a seqüência de operações a serem executadas.

Após todas as operações necessárias para o tratamento de uma dada mensagem ser completa, as medidas de desempenho PM_i e a base de conhecimento (D_i) do agente são atualizadas, assim como mensagens de saída podem ser enviadas a agentes destinatários informando o resultado do processamento realizado, a chegada da mensagem ao destinatário deve respeitar os atrasos estipulados.

Esse processo se repete até que nenhuma mensagem de entrada possa ser atendida no tempo atual de simulação.

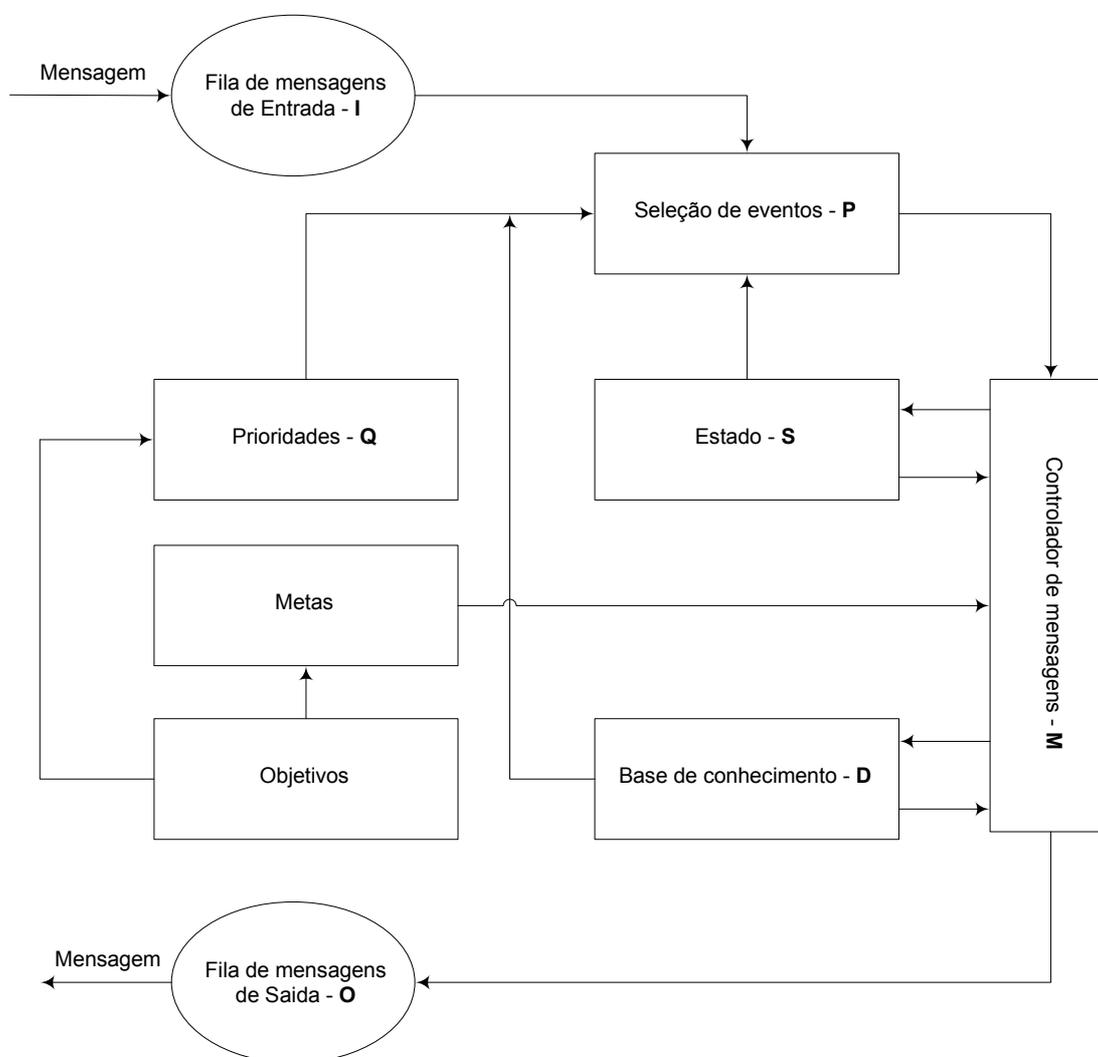


Figura 33 – Arquitetura de agente para cadeia de suprimento

Fonte: Swiminathan et al. (1998, p. 615)

Após a definição da arquitetura genérica de agente, os autores apresentam um conjunto de agentes para modelar cadeias de suprimento, conforme estrutura apresentada na Figura 34. Inicialmente, os agentes são divididos em duas categorias: elementos estruturais e elementos de controle. Elementos estruturais estão envolvidos na produção e transporte de produtos, elementos de controle auxiliam na coordenação do fluxo de produtos e informações ao longo da cadeia, no gerenciamento de estoque e na gestão da demanda.

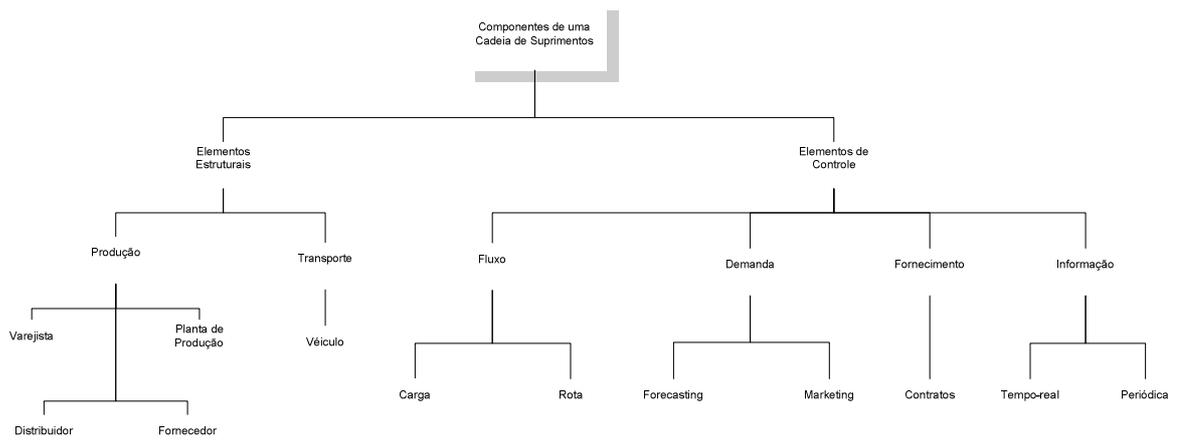


Figura 34 – Componentes de uma cadeia de suprimento

Fonte: Swaminathan et al. (1998, p. 618)

ANEXO C – REPAST

Repast (do inglês, *REcursive Porous Agent Simulation*) é uma das diversas ferramentas de modelagem de agentes disponíveis atualmente, porém com o propósito de atender o domínio das ciências sociais. Muitos dos conceitos e funcionalidades disponíveis do RePast são oriundas do Swarm, já que o objetivo inicial do projeto foi desenvolver todas as funcionalidades do Swarm em linguagem Java (RAILSBACK, 2006).

RePast é formado por um conjunto de bibliotecas e ferramentas, gratuita e de código aberto desenvolvida na Universidade de Chicago. A mantenedora do projeto, atualmente, é a *ROAD* (do inglês, *Repast Organization for Architecture and Design*). Todos os softwares, assim como os códigos fontes, podem ser copiados gratuitamente a partir página do projeto (REPAST, 2008). Há três implementações disponíveis: Repast para Java (*RePast J*), Repast para Microsoft .Net Framework® (*Repast.Net*) e Repast para Python Scripting (*Repast Py*).

Repast J é um ambiente de modelagem dos agentes em linguagem Java para suportar a construção de modelos de simulação de grande escala. Inclui uma variedade de recursos para modelagem, tais como escalonador de eventos, recursos gráficos para visualização dos resultados, integração com sistemas de informação geográfica, bibliotecas para suporte a utilização de redes neurais e algoritmos genéticos. *Repast .NET* é um ambiente de modelagem similar ao *RePast J*, porém voltado para a plataforma Microsoft .NET®. Modelos em *Repast .NET* podem ser escritos em qualquer uma das seguintes linguagens de programação: C++, C#, Visual Basic, Lisp ou Prolog.

Repast Py é uma plataforma visual que possibilita aos usuários construir modelos utilizando uma interface gráfica e escrevendo o comportamento dos agentes utilizando *Python Scripting*. Todas as funcionalidades do *Repast J* estão

disponíveis no *Repast Py*, porém o segundo é voltado para o projeto rápido de protótipos de modelos, normalmente, mais adequados para modelos de menor escala. Modelos construídos no *Repast Py* também podem ser exportados para o *Repast J*.

Nesse trabalho, utilizou-se o *Repast J* para modelagem dos agentes por oferecer maior flexibilidade, independência e rapidez de aprendizado, dado a experiência prévia dos autores com a linguagem Java. Além da sua adequabilidade para construção do modelo de simulação proposto, uma vez que o código Java dos agentes não apresenta referências a biblioteca Repast, ou seja, se houver interesse, pode-se portar os agentes para outro ambiente de simulação sem maiores problemas. No restante dessa seção apresentam-se mais detalhes sobre a utilização do *Repast J*.

Inicialmente, para se construir um modelo de simulação no *Repast J* é preciso configurar um projeto em algum ambiente de desenvolvimento Java. Esse processo é bastante simples, após criar o projeto, basta adicionar o arquivo `c:/repast/lib/repast.jar`¹ ao projeto².

As próximas etapas referem-se à criação do modelo de simulação propriamente dito. Qualquer modelo desenvolvido no *Repast J* precisará, pelo menos, duas classes: uma classe para descrever o comportamento do agente e outra para controlar a execução dos agentes e sua visualização, chamada, normalmente em modelos *Repast J*, de *SimModel*.

A classe que descreve o comportamento dos agentes é bastante específica, mas, em qualquer situação, deve conter sempre um método específico que será chamado a cada passo de simulação, conforme exemplo apresentado na Figura 35. Dessa forma, todo controle de tempo de simulação e escalonamento de execução dos agentes fica controlado pela classe *SimModel*. Ao desenvolvedor dos agentes,

¹ Considerando que o Repast esteja instalado no caminho C:\Repast

² O endereço <http://www.cscs.umich.edu/~dtrobins/abm/abm.html> demonstra como criar um projeto passo-a-passo no ambiente Eclipse.

basta codificar o comportamento desejado em Java e disponibilizar um método comum a ser chamada a cada passo de simulação. Nesse trabalho utilizou-se um método chamado *step*.

A outra classe necessária para a construção do modelo é a classe *SimModel*. Para facilitar essa atividade, o ambiente Repast fornece uma classe abstrata chamada *SimModelImpl* que parcialmente implementa os recursos básicos necessários. Dessa forma, basta criar uma classe derivada desta e definir o comportamento dos métodos apresentados na Figura 36.

```

...

public void step()
{
    demand = calculateDemand();
    setHistoryDemand(demand);

    currentLevelOfProduction = Math.max(0, (desiredStock + demand - currentStock));
    currentLevelOfProduction = Math.min((int)levelOfProduction.generator(),
                                        currentLevelOfProduction);

    incrementStock(currentLevelOfProduction);

    processOrders();

    setHistoryStock(currentStock);

    currentCostOfSupplying = costOfSupplying.generator();
    setHistoryCostOfSupplying(currentCostOfSupplying);
}

...

```

Figura 35 – Exemplo de uso do método step

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, pode-se verificar que uma classe do tipo *SimModel* é formada pelas seguintes partes (pelo menos):

- Variáveis de infra-estrutura: são utilizadas no modelo para fazer referência aos recursos da biblioteca Repast, por exemplo, a classe *MyFirstRePastModel* tem uma variável do tipo *Schedule*, a qual controla o tempo de simulação. Poderia ter também variáveis para visualização dos resultados da simulação, tais como *OpenSequenceGraph*, *Object2DDisplay*, *TextDisplay*, *OpenHistogram*, entre outros;

- Método *buildModel()*: método onde se deve criar os agentes;
- Método *buidDisplay()*: adiciona os recursos de visualização dos resultados do modelo;
- Método *buildSchedule()*: método responsável por alterar o estado da simulação, isso significa que este método é o responsável por determinar a execução de um passo de simulação para cada agente.

```
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
import uchicago.src.sim.engine.Schedule;

public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl
{
    ...

    private Schedule schedule;

    public String getName()
    {
        return "My First RePast Model";
    }

    public void begin()
    {
        buildModel();
        buildSchedule();
        buildDisplay();
    }
    public void buildModel(){
    }

    public void buildSchedule(){
    }
    public void buildDisplay(){
    }
    public Schedule getSchedule(){
        return schedule;
    }

    ...
}
```

Figura 36 – Classe MyFirstRepastModel

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dessa estruturação básica, pode-se iniciar a especificação de comportamentos específicos para o caso a ser simulado, assim como, pode-se definir especificamente quais recursos de visualização serão necessários no modelo.

Uma vantagem adicional do *Repast* refere-se à visualização dos resultados. Há uma série de recursos a serem utilizados que não precisam ser programados em conjunto com o comportamento dos agentes, basta definir quais atributos dos agentes se quer visualizar a partir da classe *SimModel*. A classe apresentada na Figura 37 demonstra essa funcionalidade para visualização da evolução do preço do Biodiesel. A cada passo de simulação os dados são atualizados na interface correspondente.

```
class biodieselPrice implements DataSource, Sequence
{
    public Object execute() {
        return new Double(getSValue());
    }

    public double getSValue() {
        Manufacturer m = (Manufacturer) agentList.get(indexManuf);
        return m.getAverageCostOfProduction();
    }
}
```

Figura 37 – Visualização dos resultados com Repast

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a construção do modelo de agentes e da classe de controle *SimModel*, a simulação pode ser iniciada. O controle da execução da simulação oferecido pelo ambiente é apresentado na Figura 38.

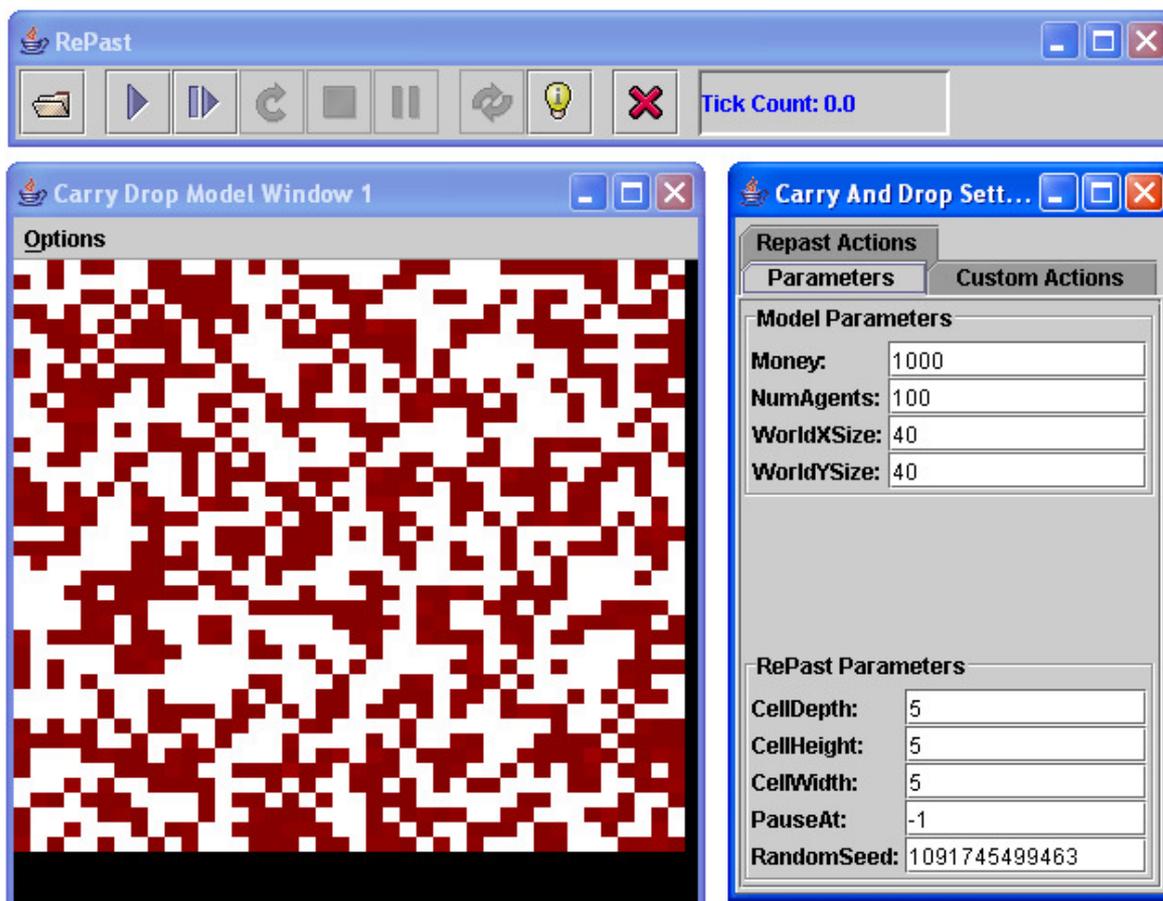


Figura 38 – Controle da simulação

Fonte: Repast (2008)

A interface permite executar a simulação passo-a-passo, parar a simulação, continuar e reiniciar. Além disso, permite definir valores iniciais para variáveis do modelo (ver opção *Parameters* da Figura 38) e gravar o resultado da simulação, o arquivo gerado pode ser “assistido” posteriormente em software apropriado.

Uma revisão mais completa sobre o ambiente de modelagem Repast pode ser encontrada, por exemplo, em: Gilbert e Bankes (2002), Tobias and Hofmann (2003), Collier (2008), Collier *et al.* (2003), Macal e North (2005), Repast (2008), Railsback *et al.* (2006), North *et al.* (2006), Samuelson e Macal (2006).

ANEXO D – COMPILAÇÃO DOS DADOS PARA EXPERIMENTOS

Este anexo tem como objetivo detalhar a compilação dos dados coletados ao longo dessa pesquisa. Será apresentada uma descrição sobre marcos regulatórios, indicadores de produção, dados sobre produção e cotação de matérias-primas. A idéia principal é aprofundar o entendimento do contexto de inserção da cadeia do biodiesel subsidiando a condução e a interpretação dos experimentos realizados com o modelo de simulação.

Leis que regulam a produção de biodiesel no Brasil

O Governo Federal vem praticando uma série de ações e políticas de incentivos fiscais para auxiliar no desenvolvimento da cadeia produtiva do biodiesel como um projeto de inclusão social e desenvolvimento econômico. Inicialmente, a Lei N° 11.097/05, aprovada pelo Congresso Nacional em 13 de janeiro de 2005, dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, conforme percentuais informados na Figura 39.

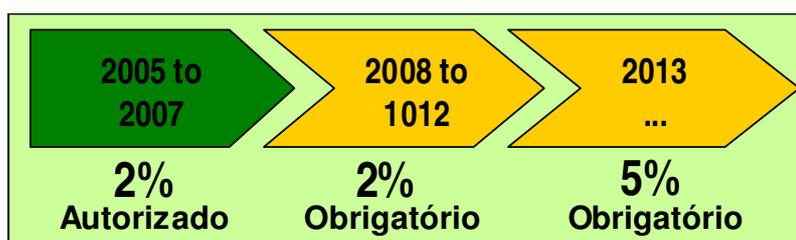


Figura 39 – Percentuais de mistura do Biodiesel ao Diesel
Fonte: PNPB (2008)

Assim, desde 2005 está autorizado o percentual de mistura de 2% do biodiesel ao diesel mineral. A partir de 2008, o percentual passou a ser obrigatório, exigindo uma produção de mais de 800 milhões de litros de biodiesel ao ano. Até 2013, a taxa subirá para 5%, equivalendo a 2,5 bilhões de litros anuais. A lei ainda prevê a possibilidade de antecipação dos prazos estabelecidos, a ser determinada por resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

Fazendo uso do que está previsto em lei, o CNPE antecipou por meio da Resolução CNPE Nº 3 de 23 de setembro de 2005, o prazo para o atendimento do percentual mínimo de 2% ao diesel para o início de 2006, restringindo a obrigatoriedade ao volume produzido pelas empresas detentoras do Selo Combustível Social. Outra mudança foi estabelecida pela Resolução Nº 2 do CNPE, publicada em março de 2008, que aumentou de 2% para 3% o percentual obrigatório de mistura de biodiesel ao óleo diesel. Atualmente, o B3 é obrigatório em todos os postos que revendem óleo diesel, que estão sujeitos à fiscalização relativa ao cumprimento dessas normas.

A Instrução Normativa MDA Nº 2, de 30 de setembro de 2005, dispõe sobre os critérios e os procedimentos relativos ao enquadramento de projetos de produção de biodiesel ao Selo Combustível Social, cujo objetivo foi assegurar a efetiva participação de pequenos produtores no programa através das seguintes condições:

1. as aquisições mínimas de matéria-prima dos agricultores devem ser realizadas de acordo com os seguintes parâmetros regionais: 50% (cinquenta por cento) para a região Nordeste e semi-árido, 30% (trinta por cento) para as regiões Sudeste e Sul e 10% (dez por cento) para as regiões Norte e Centro-Oeste;
2. os contratos com os agricultores familiares devem ter a participação de, pelo menos, uma representação dos agricultores familiares, o Sindicato dos Trabalhadores Rurais, por exemplo;
3. apresentar um plano de assistência e capacitação técnica dos agricultores familiares compatível com as aquisições a serem feitas da agricultura familiar e com os princípios e diretrizes da Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ministério do Desenvolvimento Agrário, desenvolvido diretamente pela equipe técnica do produtor de biodiesel ou por instituições por ele contratadas.

A Medida Provisória 227/04 regulamenta o Modelo Tributário Federal para a produção de Biodiesel, estabelece desoneração total e parcial da tributação, em

função do tipo de produtor, região e oleaginosa utilizada na produção, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Tributos sobre a produção de Biodiesel

Região norte, nordeste e semi-árido		
Matéria-prima	PIS/Pasep e COFINS (R\$ por litro de biodiesel)	
	Sem selo combustível social	Com selo combustível social
Mamona e palma	R\$ 0,15	R\$ 0,00
Outras matérias-primas	R\$ 0,218	R\$ 0,07

Região centro-oeste, sudeste e sul		
Matéria-prima	PIS/Pasep e COFINS (R\$ por litro de biodiesel)	
	Sem selo combustível social	Com selo combustível social
Qualquer matéria-prima	R\$ 0,218	R\$ 0,07

Fonte: Sebrae (2008)

Além do PIS e COFINS, o ICMS incide sobre a venda do biodiesel. Segundo dados do Sindicato dos Distribuidores de Combustíveis (Sindicom), a alíquota de ICMS para o biodiesel é de 18% no Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, e 17% nos demais estados. Por fim, o Decreto 5298/04 define IPI com alíquota zero para o biodiesel.

Todas essas regulamentações, diretrizes e políticas relacionadas ao biodiesel estão disponíveis no site <http://www.biodiesel.gov.br> na seção legislação e normas.

Como pode ser notado ao longo dessa seção, o segmento do biodiesel tem como órgãos reguladores as seguintes instituições:

- **CNPE** (Conselho Nacional de Política Energética), órgão de assessoramento do presidente da República que tem como atribuição a formulação de políticas e diretrizes de energia;

- **MME** (Ministério de Minas e Energia), com a responsabilidade pela execução da política energética;
- **ANP** (Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis), com delegação para regular o mercado do segmento biodiesel com as mesmas funções da regulação, da contratação e da fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis;
- **MDA** (Ministério de Desenvolvimento Agrário), com a missão de conceder o Selo Combustível Social;
- **MAPA** (Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento), com a responsabilidade pelo zoneamento agrícola.

O restante desse anexo apresenta uma visão geral sobre a produção de Biodiesel no Brasil, no que diz respeito a níveis de produção das usinas, utilização efetiva da capacidade de produção instalada, matérias-primas utilizadas na produção, rota utilizada (etílica ou metílica), produção da agricultura familiar, estimativa de demanda e, por fim, estimativa de preço de mercado do biodiesel e dos co-produtos. Uma parte de todos os dados foi coletada a partir do site da ANP, dado que a Resolução ANP Nº 25, de 2 de setembro de 2008, publicada no Diário Oficial da União em 3 de setembro de 2008, estabelece:

Art. 22. O Produtor de Biodiesel autorizado deverá enviar, mensalmente, à ANP informações sobre processamento, movimentação, estoque, discriminação de recebimento e entrega de matérias-primas e sobre produção, movimentação, estoque, discriminação de recebimento e entrega de produtos referentes à sua atividade, de acordo com a Resolução ANP Nº 17, de 31 de agosto de 2004, ou legislação superveniente que venha a substituí-la.

A outra parte dos dados foi obtida a partir de artigos científicos, revistas, sites especializados, tais como o da ABIOVE, CONAB e IBGE.

Panorama da produção de biodiesel no Brasil

Inicialmente é importante destacar que no final de novembro de 2008 foram contabilizadas 62 plantas autorizadas para operação, 23 plantas em processo de autorização (novas plantas), 8 plantas em processo de autorização para ampliação de capacidade, somando uma capacidade total de produção autorizada de 11.023,36 m³ ao dia, a Figura 40 apresenta a evolução desse dado desde janeiro de 2007, juntamente com a evolução da produção mensal de biodiesel, chegando-se a marca de 129.894 m³ no mês de outubro de 2008. Números que indicam uma ociosidade ao redor de 60% da capacidade autorizada.

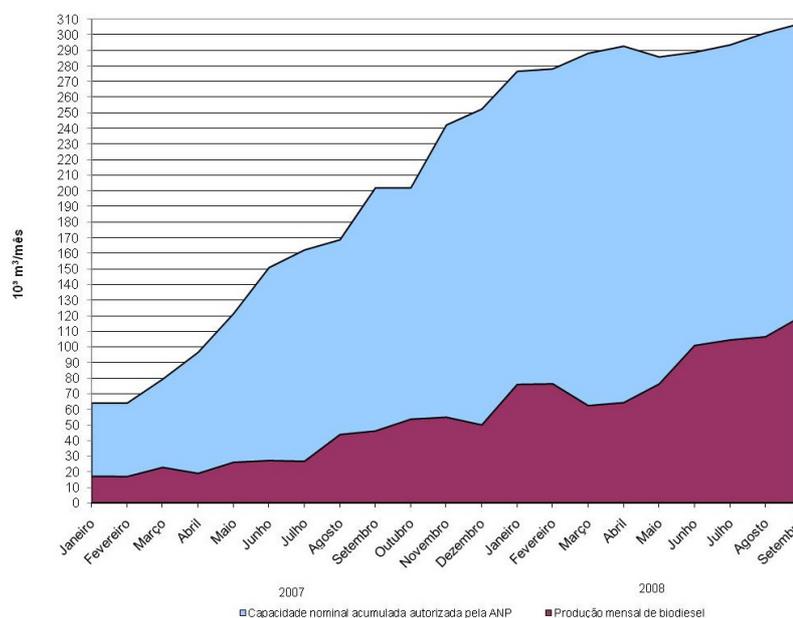


Figura 40 – Evolução da indústria de Biodiesel no Brasil
Fonte: ANP (2008)

No Rio Grande do Sul, os níveis atuais de produção podem ser estimados a partir das quatro usinas que estão participando dos leilões realizados pela ANP e também pelos dados de produção enviados a ANP. A Oleopan, situada na cidade de Veranópolis, produziu de janeiro a outubro de 2008 71.110 m³ de Biodiesel. A BSBios, situada na cidade de Passo Fundo, produziu de janeiro a outubro de 2008 69.081 m³ de Biodiesel. A Brasil Ecodiesel, situada na cidade de Rosário do Sul, produziu de janeiro a outubro de 2008 31.783 m³ de Biodiesel. A Granol, situada na cidade de Cachoeira do Sul, produziu de janeiro a outubro de 2008 68.041 m³ de Biodiesel. Os níveis de produção dessas quatro usinas totalizaram 240.014 m³, valor

correspondente a 26% da produção brasileira no mesmo período. O Gráfico 10 apresenta a evolução da produção dessas quatro usinas a partir julho de 2007.

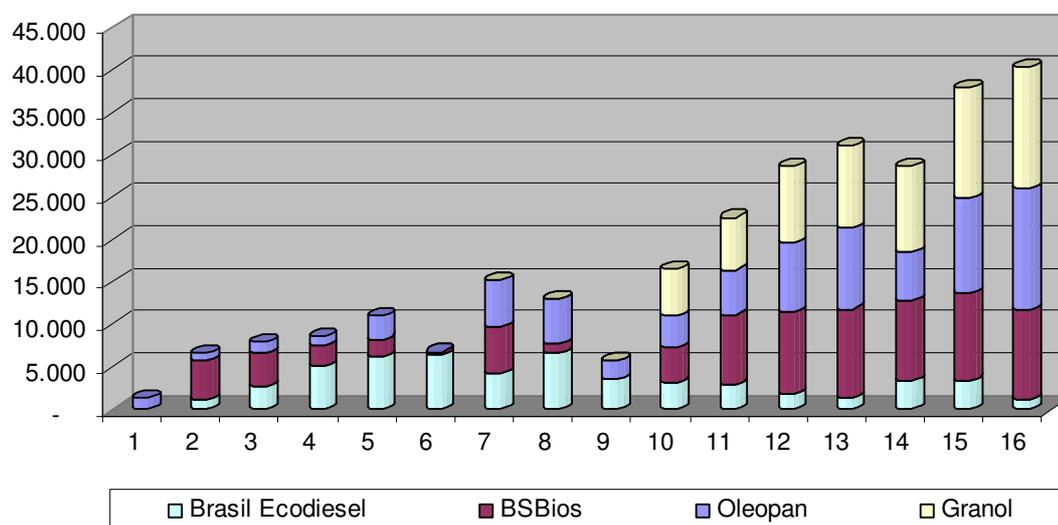


Gráfico 10 – Evolução da produção de Biodiesel no RS
Fonte: ANP (2008)

A evolução da produção indica o crescimento do setor no Rio Grande do Sul, embora nem todas as usinas estejam produzindo de acordo com sua capacidade autorizada. O Gráfico 11 apresenta a relação média entre capacidade autorizada pela ANP e produção efetiva das usinas do RS nos meses de outubro e setembro de 2008. Conforme os dados, a BSBios produziu no limite de sua capacidade autorizada, a Granol produziu acima da capacidade autorizada mensal, enquanto que a Oleopan e Brasil Ecodiesel apresentaram ociosidade de cerca de 35% e 80%, respectivamente, em relação a capacidade autorizada. Embora a Granol tenha ultrapassado o limite de produção nos meses de setembro e outubro de 2008, não quer dizer que a mesma esteja em desacordo com as normas da ANP, pois sua capacidade anual de produção autorizada pela ANP é de 144.945,90 m³.

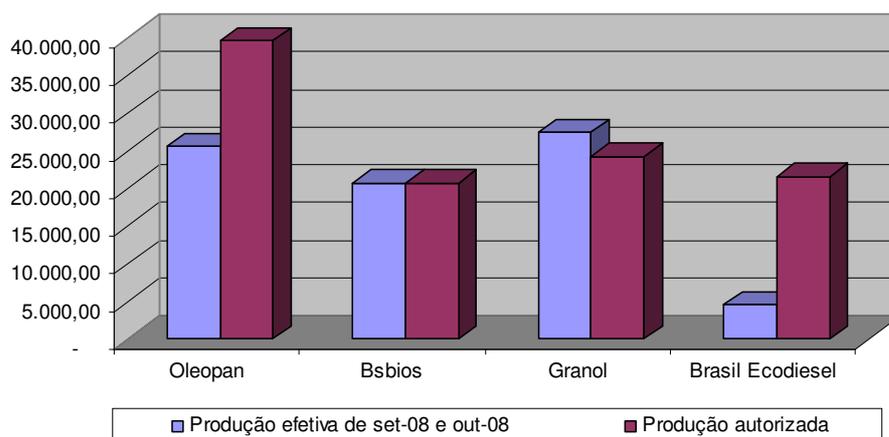


Gráfico 11 – Relação capacidade autorizada/produção de Biodiesel no RS
Fonte: ANP (2008)

Quanto se fala em matérias-primas para produção do Biodiesel no Brasil, imagina-se que por sua extensa área geográfica, clima tropical e subtropical, haverá a utilização de uma ampla diversidade de matérias-primas para a produção de biodiesel. Porém, ao deparar-se com os dados atuais relativos a produção do Biodiesel divulgados no Boletim Mensal de Biodiesel da ANP, verifica-se pouca diversidade de utilização de matérias-primas em maior escala, conforme dados apresentados no Gráfico 12, cujo mês de referência é outubro de 2008. Portanto, a expectativa inicial de ampla diversificação de uso de matérias-primas para produção de biodiesel não se confirmou até o momento.

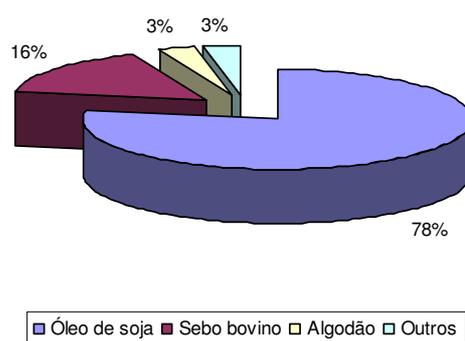


Gráfico 12 – Matérias-primas utilizadas para produção de Biodiesel
Fonte: ANP (2008)

Outro ponto bastante discutido, em relação à produção de biodiesel, é a escolha entre a utilização de etanol ou metanol. De acordo com Olivério (2007) o metanol é usado mundialmente no processamento de biodiesel. Esse álcool tem várias origens, sempre fóssil, onde a mais comum é o gás natural. No Brasil, face à

competitividade e disponibilidade do etanol, as indústrias que produzem usinas de biodiesel oferecem soluções tecnológicas com suporte para produção com rota metílica e também etílica. Segundo Olivério (2007), a escolha por uma ou outra rota é do investidor, que analisará a opção mais vantajosa de acordo com a região onde instalará a planta de biodiesel.

Ainda segundo o mesmo autor, em algumas partes do Brasil, em função dos custos logísticos, o metanol apresenta preços mais competitivos que o etanol. Além da avaliação do preço do álcool, outros fatores também devem ser observados na escolha da rota de processamento, entre eles:

- **Exportação:** o biodiesel europeu é produzido a partir de metanol e, portanto, a sua especificação admite baixos percentuais de resíduo de metanol, mas não de etanol. Isso significa que, atualmente, não é possível exportar biodiesel produzido em rota etílica para a Europa, apenas o de rota metílica. No momento, estão sendo feitas tratativas para a aceitação do biodiesel etílico na União Européia;
- **Vantagem ambiental:** trata-se de um combustível renovável. Quando produzido em rota etílica, obtém-se um biodiesel “100% verde”, de grande e efetivo apelo ambiental.

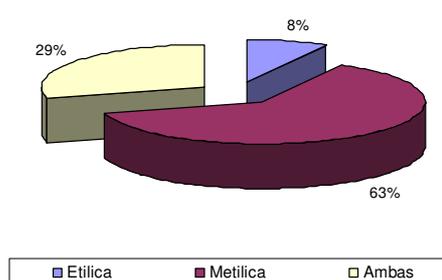


Gráfico 13 – Tipo de álcool utilizado na produção de Biodiesel

Fonte: ANP (2008)

O Gráfico 13 apresenta os dados relativos ao tipo de álcool que as empresas de biodiesel estão utilizando no Brasil. Como pode-se verificar, há grande predomínio da rota metílica. O menor consumo, o menor tempo de reação, o menor custo e a maior reatividade são os fatores citados como diferenciais para uso do metanol (PERES e BELTRÃO, 2006).

Por fim, é importante destacar o mercado potencial para o biodiesel no Brasil. Tomando como exemplo o ano de 2007 onde a demanda total de óleo diesel no Brasil foi da ordem de 41,6 milhões de metros cúbicos, pode-se estimar uma demanda por B3 de 1,2 milhões de metros cúbicos anuais ou cerca de 104 mil metros cúbicos mensais. Em termos regionais, os números do ano de 2007 indicam que o consumo de diesel ocorre principalmente na região Sudeste (45%), Sul (20%), Nordeste (15%), Nordeste (15%) e Centro-Oeste (11%), mesmos percentuais de demanda têm-se para o Biodiesel.

A projeção de demanda por Biodiesel (B3, nesse caso) também pode ser estimada quando se recorre aos dados dos leilões realizados pela ANP para aquisição de Biodiesel. De acordo com os dados apresentados, o último leilão realizado no ano de 2008 projeta uma demanda de 330.000 m³ de Biodiesel para os três primeiros anos de 2009, conforme prazos de entrega estipulados no Edital de Pregão N° 086/08-ANP:

O biodiesel leilado deverá ser produzido na unidade de produção de biodiesel vencedora no Pregão, sendo entregue, no período de 1º janeiro de 2009 a 31 de março de 2009, pelo produtor, em tancagem própria ou de terceiros, na quantidade negociada no Pregão, após a assinatura do contrato, observadas as disposições pertinentes contidas na Resolução ANP N° 33 de 30/10/07.

A Tabela 10 apresenta um resumo sobre todos os leilões realizados pela ANP para compra de biodiesel até o mês de dezembro de 2008. Algumas observações em relação ao último leilão realizado pela ANP dizem respeito: (1) ao aumento do número de usinas produtoras de biodiesel classificadas para fornecimento, 31 ao total; (2) a diminuição da amplitude entre o preço mínimo e máximo de compra no leilão, como consequência, aumento da competição no setor; e, (3) a consolidação dos maiores estados produtores: Mato Grosso (24%), Rio Grande do Sul (20%), São Paulo (17%), Goiás (16%), Ceará (8%), Tocantins (6%), Bahia (5%), Piauí (2%), Paraná (2%), Minas Gerais (2%).

Em Sebrae (2008) identificaram-se, pelos menos, dois fatores que condicionam a concentração dos empreendimentos de biodiesel nos estados do

Mato Grosso, Rio Grande do Sul e São Paulo: (1) muitos desses empreendimentos estão vinculados ao agronegócio da soja; e, (2) a proximidade com a parcela mais expressiva do mercado consumidor.

Tabela 10 – Resumo dos Leilões da ANP para compra de Biodiesel

Data	Preço Médio ¹	Desvio Padrão ¹	Menor Preço ¹	Maior Preço ¹	Moda ¹	Volume Leiloado ²	Acumulado do Ano ²
23/11/05	1.890,00	35,30	1.800,00	1.920,00	1.910,00	70.000	70.000
30/03/06	1.860,00	41,40	1.800,00	1.900,00	1.890,00	170.000	770.000
11/07/26	1.830,00	64,90	1.730,00	1.900,00	1.750,00	50.000	
12/07/06	1.760,00	32,80	1.710,00	1.800,00	1.730,00	550.000	
13/02/07	1.850,00	53,50	1.780,00	1.900,00	1.800,00	50.000	176.000
13/11/07	1.860,00	42,40	1.820,00	1.960,00	1.830,00	50.000	
14/11/07	1.840,00	60,30	1.700,00	1.930,00	1.860,00	76.000	
10/04/08	2.710,00	87,60	2.390,00	2.770,00	2.730,00	264.000	990.000
11/04/08	2.660,00	88,40	2.380,00	2.750,00	2.710,00	66.000	
14/08/08	2.610,00	24,80	2.500,00	2.620,00	2.610,00	264.000	
15/08/08	2.610,00	18,00	2.520,00	2.620,00	2.610,00	66.000	
24/11/08	2.390,00	12,90	2.300,00	2.400,00	2.390,00	330.000	

Fonte: ANP (2008)

¹ Unidade em Reais (R\$)

² Unidade em m³

No que diz respeito à produção mundial, a Alemanha destaca-se como maior produtor mundial de biodiesel. De acordo com o Quadro 6, pode-se verificar que os maiores produtores mundiais encontram-se na Europa, porém, recorrendo aos dados do Gráfico 14, pode-se verificar que a produção americana vem crescendo de uma forma bastante acelerada. Segundo dados da *European Biodiesel Board*, atualmente, há 241 plantas instaladas na Europa.

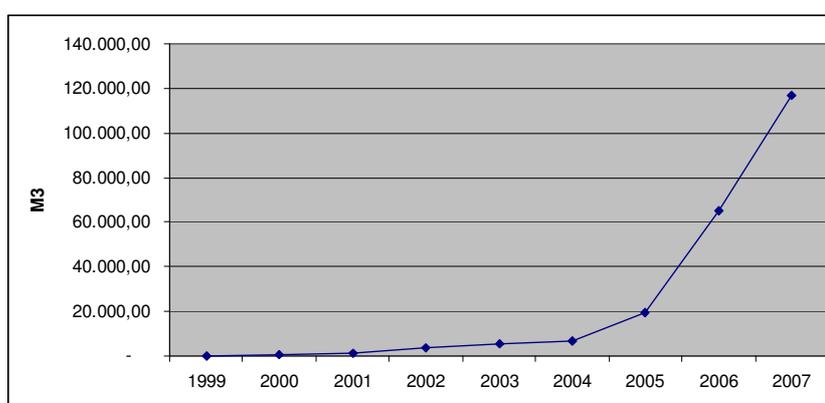
Em relação à produção dos Estados Unidos, convém mencionar que, segundo dados da *National Biodiesel Board*, a capacidade instalada de produção do biodiesel é 2,61 bilhões de galões anuais, bastante superiores a produção efetiva registrada.

Quadro 6 – Produção europeia de biodiesel em 2008

País	Quantidade em mil m ³	País	Quantidade em mil m ³
Alemanha	5.779,18	Polônia	490,50
França	2.158,20	Portugal	442,54
Itália	1.706,94	Reino Unido	235,44
Espanha	1.381,03	Bulgária	234,35
Bélgica	724,85	Suécia	231,08
Holanda	622,39	Eslováquia	224,54
Grécia	615,85	República Tcheca	221,27
Áustria	528,65	Outros	1.286,20

Fonte: European Biodiesel Board

Na Argentina, o governo fornece uma série de incentivos, como isenções tarifárias, para encorajar a abertura de usinas de biodiesel e etanol. Seu objetivo é ter capacidade suficiente para assegurar a oferta necessária para o cumprimento da mistura obrigatória de 5% no diesel e na gasolina, a partir de 2010. Para cumprir o compromisso, será necessária uma produção anual de 800 mil toneladas de biodiesel e 250 mil toneladas de etanol. Até o final de 2008, o governo espera que a Argentina consiga produzir 1,5 milhões de toneladas de biodiesel. Já a Associação Argentina dos Biocombustíveis e Hidrogênio projeta uma capacidade de 2,2 milhões de toneladas até 2010 (BIODIESELBR, 2008).

**Gráfico 14 – Evolução da produção americana de biodiesel**

Fonte: National Biodiesel Board – USA

Matérias-primas para produção de biodiesel

Os dados apresentados a seguir foram coletados a partir de publicações da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE).

A análise apresenta dados em relação ao Brasil e ao Estado do Rio Grande do Sul. Os estudos sobre a cadeia do Biodiesel normalmente procuram fazer análises por região, respeitando as vocações agrícolas de cada caso, ver, por exemplo, Barros *et al.* (2006) e Leiras *et al.* (2007). Este tipo de análise também é recomendada por especialistas da área (KHALIL, 2007, p. 85):

Em termos de atratividade econômica do agronegócio, devem-se elencar as diversas oleaginosas brasileiras por produção de óleo por unidade agrícola [...] prevalecendo como principal critério na escolha da cultura, especificamente dentro de uma determinada região agrícola. Deve-se, no entanto, respeitar a vocação agrícola de cada Região ou micro clima.

Na continuidade desse texto são apresentados indicadores relativos à disponibilidade e custos de aquisição de matérias-primas, além do perfil de produção da agricultura familiar.

As prováveis matérias-primas de origem vegetal para produção do biodiesel em cada região são listadas no Quadro 7. Khalil (2007) destaca também as potencialidades de uso das gorduras de origem animal (sebo bovino) e das gorduras residuais, resultantes de processamentos domésticos, comerciais e industriais.

As análises realizadas nesse trabalho foram realizadas com a utilização de matérias-primas de origem vegetal (soja, girassol e canola), matéria-prima oriunda de origem animal (sebo bovino) e matéria-prima oriunda de óleo residual de frituras (óleo reciclado). No restante dessa seção são apresentados dados relativos à produção de cada uma dessas alternativas para produção de biodiesel.

Região	Matéria-prima
Sul	Colza/Canola; Soja; Girassol
Sudeste	Soja; Mamona; Pinhão Bravo; Algodão; Girassol
Nordeste	Mamona; Babaçu; Dendê (BA); Algodão; Pinhão e Coco
Centro-Oeste	Soja; Algodão; Girassol; Nabo e Mamona
Norte	Dendê; Babaçu e Soja (TO; PA; RO)

Quadro 7 - Potencialidade de oleaginosas brasileiras por região geográfica

Fonte: Khalil (2007)

A Tabela 11 apresenta os indicadores de produção de soja e girassol, considerando dados das safras de 2000 a 2008/09, estes últimos valores estimados pela CONAB. Com relação à produção de canola, não encontrou-se na base de dados na CONAB resultados consolidados, porém pesquisando em BiodieselBR (2008) chegou-se aos seguintes dados:

A canola é uma oleaginosa de inverno que concorre com culturas como o trigo e o milho safrinha na América Latina. A área plantada, com início da semeadura previsto para abril/maio, está estimada em 130 mil hectares distribuídos nos principais países produtores: Paraguai (60 mil ha), Brasil (50 mil ha) e Argentina (20 mil ha). Com produtividade média de 1.400 kg/ha, o volume total de grãos esperado para 2008 é de 195 mil toneladas.

Tabela 11 – Produção de matéria-prima – Safra 2000 a 2008/09

Região	Matéria-prima	Mínimo (mil t)	Máximo (mil t)	Média (mil t)	Área (mil há*)	Produtividade (Kg/ha)
RS	Soja	2.854,90	9.924,60	7.155,90	3.721,80	2.500,00
	Girassol	5,30	38,20	18,10	12,3	1.417,20
Brasil	Soja	38.431,8	60.017,4	51.892,6	19.944,50	2.616,00
	Girassol	56,3	170,50	95,20	68,1	1.404,70

Fonte: CONAB (2008)

*1 Hectare (ha) = 10 mil m²

A produção do sebo bovino tem relação direta com o abate bovino (FILHO, 2007), considera-se um rendimento médio de 23 kg por cabeça. Dessa foram, de acordo com dados do IBGE, pode-se estimar que em 2007 foram produzidas 705.756 toneladas de sebo no Brasil e 31.895 toneladas de sebo no Rio Grande do

Sul - sétimo estado produtor do Brasil. A Tabela 12 apresenta a disponibilidade de sebo bovino no mercado brasileiro considerando a média de animais abatidos nos últimos dois anos nas maiores regiões produtoras do país.

Tabela 12 – Abate bovino – outubro de 2006 a setembro de 2008

Região	Quantidade de animais abatidos			Disponibilidade sebo bovino ¹ (kg/mês)	Disponibilidade sebo bovino ¹ (kg/ano)
	Média	Menor	Maior		
Brasil	2.521.109,50	2.319.318,00	2.805.764,00	57.985.518,50	695.826.222,00
MT	367.346,29	306.974,00	437.008,00	8.448.964,71	101.387.576,50
SP	329.620,79	283.993,00	405.785,00	7.581.278,21	90.975.338,50
MS	298.081,92	225.760,00	365.511,00	6.855.884,08	82.270.609,00
GO	240.418,25	190.297,00	286.554,00	5.529.619,75	66.355.437,00
MG	225.236,33	172.362,00	278.837,00	5.180.435,67	62.165.228,00
PA	190.809,63	165.130,00	218.112,00	4.388.621,38	52.663.456,50
RS	122.960,08	80.766,00	197.939,00	2.828.081,92	33.936.983,00

Fonte: IBGE (2008), Pesquisa Trimestral de Abate de Animais

¹ Calculado a partir da média

A disponibilidade de óleo de cozinha para reciclagem pode ser determinada, segundo IPA (2008), considerando que aproximadamente 45% do total de óleo consumido constituem resíduos, que 40% são incorporados nos alimentos e 15% constituem perdas. Dessa forma, considerando a população de cada região que se pretende estudar e o consumo *per capita* anual por óleo vegetal fornecido pelo IBGE (8,236 kg), consegue-se estimar a disponibilidade de óleo de cozinha disponível para reciclagem, conforme Tabela 13.

O jornal Correio do Povo, de 22 de outubro de 2007, traz uma reportagem mencionando que a cidade de Porto Alegre-RS descarta, em média, 400 mil litros de óleo de cozinha por mês, valor bastante próximo ao obtido com o cálculo apresentado. Porém, o mercado de reciclagem captura apenas 50 mil litros mensais. Portanto, um valor muito abaixo da capacidade disponível estimada está sendo utilizada.

Em São Paulo, de acordo com Araujo (2008), a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) estima que cada família da capital paulista descarta, em média, 1,5 litro de óleo de cozinha na rede pública de esgoto todo mês, enquanto que os restaurantes, descartam, em média, 50 litros por semana. Indicadores que também podem ser utilizados para calcular a disponibilidade potencial de óleo reciclado. Segundo Parente (2003), um levantamento primário da oferta de óleos residuais de frituras, suscetíveis de serem coletados, com produção superior a 100 kg ao mês, revela um valor da oferta brasileira superior a 30.000 toneladas anuais.

Tabela 13 – Estimativa de descarte de óleo de cozinha

Região	População ¹	Consumo óleo vegetal/ano ²	Consumo óleo vegetal/mês*	Descarte/mês*
Brasil	183.987.291,00	1.515.319.328,68	126.276.610,72	56.824.474,83
Norte	14.623.316,00	120.437.630,58	10.036.469,21	4.516.411,15
Nordeste	51.534.406,00	424.437.367,82	35.369.780,65	15.916.401,29
Sudeste	77.873.120,00	641.363.016,32	53.446.918,03	24.051.113,11
Sul	26.733.595,00	220.177.888,42	18.348.157,37	8.256.670,82
RS	10.582.840,00	87.160.270,24	7.263.355,85	3.268.510,13
SC	5.866.252,00	48.314.451,47	4.026.204,29	1.811.791,93
PR	10.284.503,00	84.703.166,71	7.058.597,23	3.176.368,75
Centro-oeste	13.222.854,00	108.903.425,54	9.075.285,46	4.083.878,46
Porto Alegre-RS	1.420.668,00	11.700.621,65	975.051,80	438.773,31

Fonte: ¹IBGE (2008), Contagem da População 2007

²IBGE (2008), Aquisição alimentar domiciliar per capita anual - Kg

* em Kg

Produção da agricultura familiar

A diferenciação entre os dados dos estabelecimentos familiares e dos patronais não é uma tarefa fácil, a base de dados pública e de livre acesso para pesquisar esses indicadores é o Censo Agropecuário do IBGE, porém, essa base de

dados não oferece esse tipo de segmentação. A alternativa encontrada foi recorrer a relatórios técnicos¹ disponíveis no INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária). A partir desse relatório, conseguiu-se analisar o perfil da agricultura familiar no Brasil. Em primeiro lugar, o trabalho apresenta uma metodologia para diferenciar estabelecimentos familiares e estabelecimentos patronais, onde o universo familiar foi caracterizado pelos estabelecimentos que atendiam, simultaneamente, às seguintes condições: (1) a direção dos trabalhos do estabelecimento era exercida pelo produtor; e, (2) o trabalho familiar era superior ao trabalho contratado.

Segundo o Censo Agropecuário 1995/96, existem no Brasil 4.859.864 estabelecimentos rurais, ocupando uma área de 353,6 milhões de hectares. Os primeiros dados do Censo Agropecuário de 2006 apontam 5.204.130 estabelecimentos rurais e uma área de 354,8 milhões de hectares. Os números apresentados nessa seção referem-se ao Censo 1995/96, pois os dados do Censo de 2006 não foram levados em consideração pelo relatório do INCRA.

De acordo com a metodologia adotada pelo INCRA, são 4.139.369 estabelecimentos familiares, ocupando uma área de 107,8 milhões de hectares, sendo responsáveis por R\$ 18,1 bilhões do total do valor bruto da produção agropecuária nacional (VBP). Os agricultores patronais são representados por 554.501 estabelecimentos, ocupando 240 milhões de hectares, sendo responsáveis por R\$ 29,1 bilhões do total do valor bruto da produção agropecuária nacional (VBP). Ou seja, há muita desigualdade nesses números, 85,17% dos estabelecimentos são familiares, porém ocupam 30,5% da área total e são responsáveis por 37,9% do VBP.

A área média dos estabelecimentos familiares, portanto, é muito inferior a dos patronais, apresentando também uma grande variação entre as regiões. A área média dos estabelecimentos familiares no Brasil é de 26 hectares, enquanto que a patronal é de 433 hectares, conforme Tabela 14.

¹ Agricultura Familiar no Brasil: uma análise a partir do Censo Agropecuário de 95/96. Projeto de Cooperação Técnica INCRA/FAO. 1999.

Tabela 14 – Área média dos estabelecimentos agropecuários

Região	Área Familiar	Área Patronal
Nordeste	17	269
Centro-Oeste	84	1.324
Norte	57	1.008
Sudeste	30	223
Sul	21	283
Brasil	26	433

Fonte: INCRA

As atividades da produção animal, por apresentarem valor agregado mais elevado, têm uma maior participação na composição do VBP nacional. Destacam-se a pecuária de leite com 13,3% de todo o VBP da agricultura familiar, seguida por aves/ovos com 10,5% e pecuária de corte com 9,5%. O milho e o feijão, apesar de serem cultivados na maioria dos estabelecimentos familiares, apresentam uma baixa participação no VBP total da agricultura familiar, representando 8,7% e 3,8%, respectivamente. A soja corresponde a 7,4% de todo VBP da agricultura familiar.

A região Sul apresenta uma maior distribuição do VBP entre os produtos, sendo que as aves/ovos é a atividade mais importante, com 15,2%, seguida por soja (13,3%), milho (11,5%), suínos (9,7%), pecuária de leite (9,2%), fumo (8,7%), pecuária de corte (5,4%), mandioca (3,9%) e feijão (2,9%). Nesta região, as 11 principais atividades são responsáveis por 82,9% de todo o VBP familiar da região Sul.

Analisando esses números em relação à produção do Biodiesel, pode-se verificar que a quantidade de matéria-prima disponível neste segmento é insignificante, sendo necessárias, portanto, as iniciativas já iniciadas de incentivo à cultura de oleaginosas passíveis de serem utilizadas como matéria-prima para produção de biodiesel pela agricultura familiar, dadas as condições para obtenção do Selo Social.

Custos de aquisição de óleo

As cotações médias para o óleo de soja e de girassol no período compreendido entre janeiro de 2007 e novembro de 2008 são apresentadas no Gráfico 15. Embora sejam *commodities*, há diversas fontes que trazem o preço já regionalizado, os quais guardam relação direta com o preço internacional.

O preço médio da tonelada do óleo de soja nesse período foi de \$ 660,00, o desvio-padrão foi de \$ 275,91, a menor e a maior cotação do período foi \$ 434,93 e \$ 1.400,00 a tonelada, respectivamente. O preço médio da tonelada do óleo de girassol nesse período foi de \$ 1.302,00, o desvio-padrão foi de \$ 448,52, a menor e a maior cotação do período foi \$ 709,00 e \$ 2.045,00 a tonelada, respectivamente.

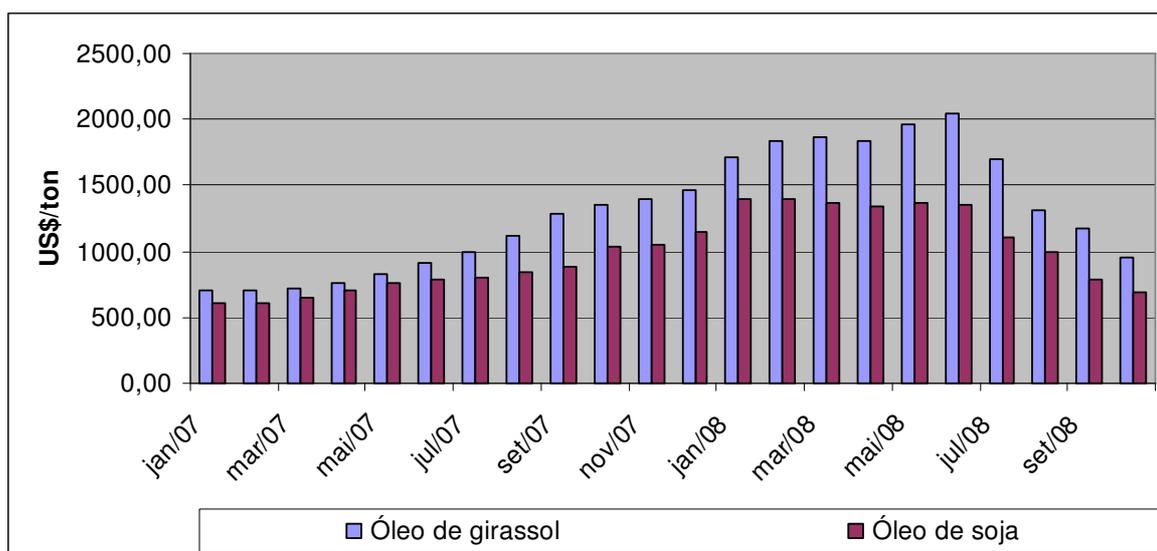


Gráfico 15 – Evolução da cotação do óleo de soja e girassol

Fonte: Abiove (2008); CONAB (2008)

O preço do sebo bovino, de acordo com especialistas, se comportava no ritmo da cotação da arroba do boi. Mas, desde meados de 2006, o preço do sebo bovino desvinculou-se da arroba e disparou nos últimos 12 meses. Enquanto as cotações do boi oscilaram no último ano em menos de 5%, as do sebo bovino duplicaram, saindo de R\$ 550 a tonelada em fevereiro de 2006 para R\$ 1.100 em janeiro deste ano, conforme demonstra o Gráfico 16.

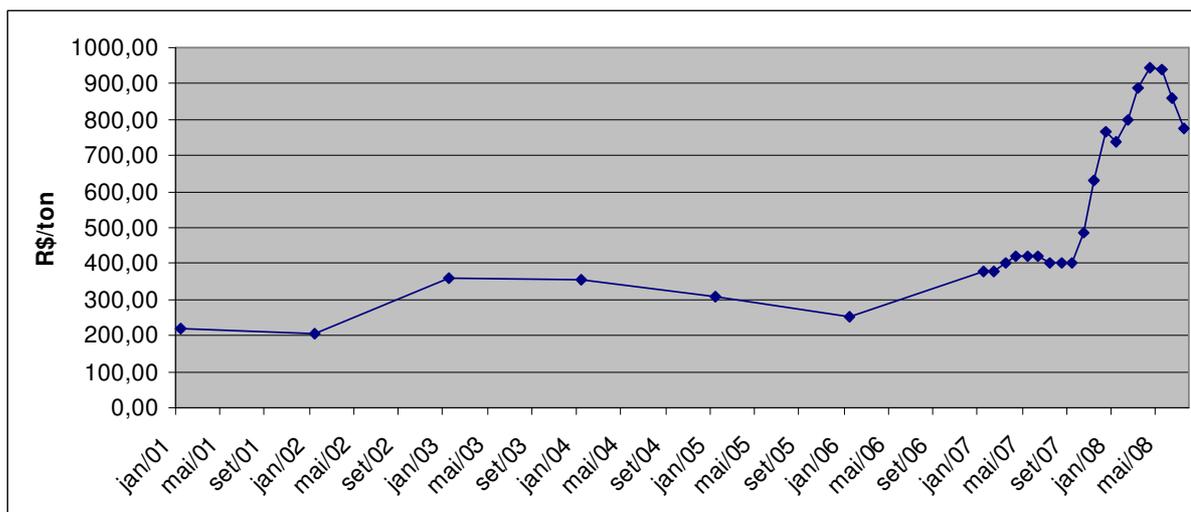


Gráfico 16 – Evolução da cotação do sebo bovino

Fonte: Scot Consultoria (2008)

O preço médio da tonelada do sebo bovino no período considerado foi de R\$ 526,20, o desvio-padrão foi de R\$ 237,53, o menor e o maior preço do período foram R\$ 204 e R\$ 945,94, respectivamente.

O preço de aquisição do óleo reciclado utilizado nesse trabalho considera o custo de aquisição, coleta e reciclagem. Andrade Filho (2008) estima uma variação no preço de aquisição entre R\$ 0,10 e R\$ 50, um custo de coleta de R\$ 0,19 e um custo de reciclagem entre R\$ 0,15 e R\$ 0,18. De acordo com dados empíricos coletados durante a realização desse trabalho, preço do litro do óleo reciclado no mercado custa cerca de R\$ 1,00. Nos experimentos apresentados na próxima seção, se fará uso destes últimos valores.

Custos de aquisição de grãos

A produção de girassol e de canola no Brasil atualmente é insignificante quando comparada à soja, porém, a popularização dos biocombustíveis deve alavancar o crescimento da produção desses grãos no Brasil, uma vez que enquanto a soja apresenta 18% de teor de óleo, o girassol e a canola possui mais que o dobro de teor (CONAB, 2008). A evolução do preço médio pago ao produtor da saca de 60 kg do girassol e da soja (grão) no Rio Grande do Sul são apresentados no Gráfico 17.

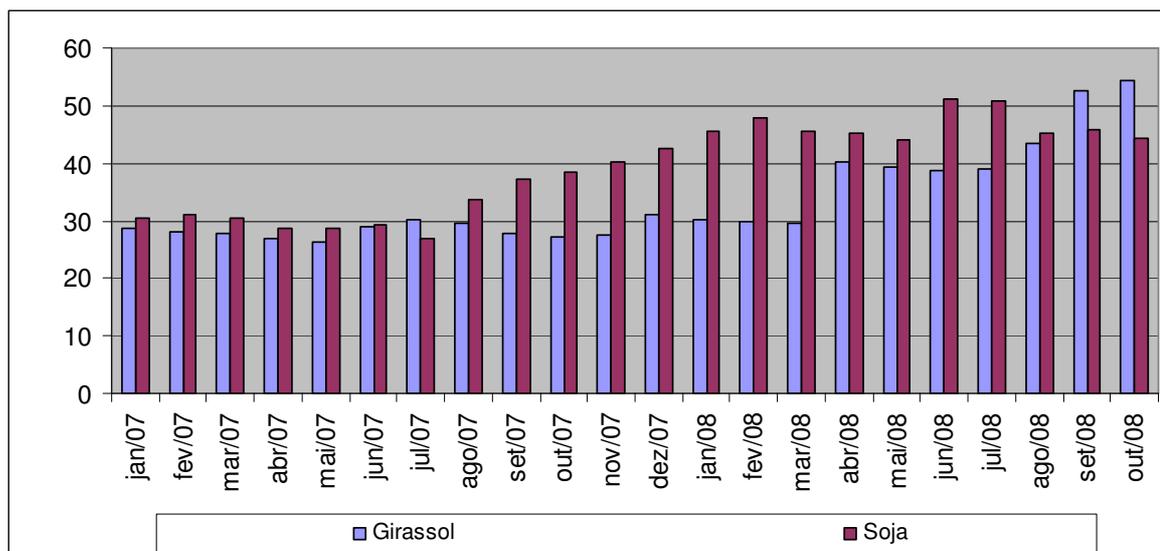


Gráfico 17 – Evolução da cotação da soja e girassol

Fonte: CONAB (2008); Emater/RS

O preço médio da saca de soja de 60 kg de soja nesse período foi de R\$ 39,47, desvio-padrão de R\$ 7,85, a menor e a maior cotação da saca no período foram R\$ 27,00 e R\$ 51,10, respectivamente. O preço médio da saca de 60 kg do girassol, nesse período foi de R\$ 33,55, desvio-padrão de R\$ 8,24, a menor e a maior cotação da saca no período foram R\$ 26,44 e R\$ 54,43, respectivamente.

A cotação da canola, segundo especialistas consultados e dados coletados, é balizada pelo preço da soja. O Jornal Zero-Hora do dia 5 de maio de 2008 publicou uma reportagem cujo título era “Plantio de canola para biodiesel é estimulado no RS”, onde constam os valores negociados para safra 2008, conforme trecho a seguir:

[...] O valor de compra para esta safra foi definido em R\$ 42 por saca até a produção de 14 sacas por hectare. Acima deste rendimento, o preço, que foi negociado com entidades rurais, equivale ao valor de mercado da soja mais R\$ 1/saca. A canola gera o dobro de óleo da soja e tem a vantagem de não competir pela mesma área, pois é cultivada no inverno, ressalta o diretor de operações da fabricante de biodiesel BSBios, Erasmo Carlos Battistella

Custo de aquisição de álcool

A rota de produção escolhida, etílica ou metílica, determina o preço de aquisição do álcool. O Gráfico 18 apresenta a evolução do preço do metanol e do etanol no período compreendido entre janeiro de 2006 a novembro de 2008.

O preço médio do metanol (em m³) no período considerado foi de R\$ 884,75, o desvio-padrão foi de R\$ 193,63, a menor e a maior cotação do período foi R\$ 581,00 e R\$ 1.128,00 o m³, respectivamente. Em relação ao etanol, o preço médio do m³ no período considerado foi de R\$ 879,19, o desvio-padrão foi de R\$ 133,31, a menor e a maior cotação do período foi R\$ 660,75 e R\$ 1.209,24 o m³, respectivamente

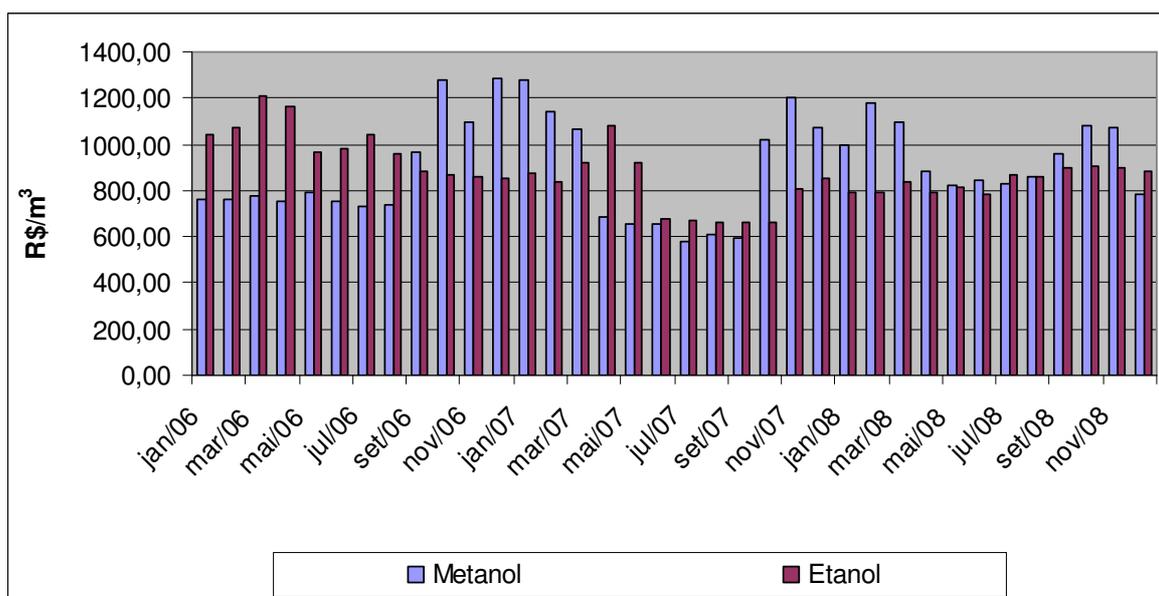


Gráfico 18 – Evolução da cotação do metanol e do etanol

Fonte: Methanex (2008), CEPEA (2008)

Mercado dos co-produtos

Uma dos grandes debates quando se fala na produção do Biodiesel é o que fazer com a glicerina, subproduto da produção do biocombustível. De acordo com a reação apresentada na seção 6.1 (Equações 11 e 12), a quantidade de glicerina produzida corresponde a, aproximadamente, 11% da quantidade produzida de biodiesel.

Tomando com exemplo a demanda por B3, estimada em 1,2 milhões de toneladas anuais, tem-se uma produção de glicerina na ordem de 140 mil toneladas anuais. A demanda por B5 tem sido estimada por especialistas em 2,6 mil toneladas, produção que irá gerar cerca de 300 mil toneladas de glicerina anuais.

Conforme levantamento da Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim), a capacidade de produção das indústrias químicas é de 35,8 mil toneladas ao ano, mas a produção situa-se em torno de 13 mil, para um consumo anual de 13,5 mil toneladas. Desse volume, 48,9% são destinados à produção de cosméticos. Outros 14,5% são utilizados pela indústria farmacêutica, 11,9%, pelo setor de tintas e vernizes e o restante é vendido a outros segmentos.

Dessa forma, a preocupação com o excedente produzido de glicerina passa a ser uma questão importante de ser debatida, pois a produção do biodiesel se dá em diversos países, portanto, a exportação deixa de ser a saída natural. Algumas das soluções para esse problema são apontadas em outra reportagem de BiodieselBR (2008). A Empresa Brasileira de Bioenergia (EBB) em parceria com a Universidade Federal do Ceará desenvolveu um “hidrogel” feito de glicerina para uso na agricultura, que absorve a água da chuva e impede que ela evapore, mas libera a água para a planta, o projeto passou por testes de laboratório e será testado em campo. Com os preços mais baixos a glicerina passa a competir com outros produtos. Um mercado potencial é o do sorbitol, produto químico que, se substituído, geraria uma nova demanda por 300 a 400 mil toneladas de glicerina ao ano no Brasil. No exterior, ainda segundo a mesma reportagem, as pesquisas de novos usos para a glicerina chegaram a polímeros plásticos.

Como se pode perceber, essa é uma questão muito ampla para ser debatida desse trabalho. Para o contexto desse trabalho importa estimar o preço de mercado da glicerina para que se possa realizar a compensação em relação ao custo de produção do biodiesel. Em BiodieselBR (2008) encontrou-se um depoimento bastante oportuno:

O preço médio da glicerina, que em 2005 chegou a R\$ 3,00 o quilo, hoje está cotada entre R\$ 1,60 e R\$ 1,70. Nas regiões onde usinas de biodiesel operam, o valor médio cai para R\$ 0,60 a R\$ 0,70 o quilo. Muitas usinas

preferem se livrar dos estoques de glicerina a qualquer preço, porque não está em seu foco de negócios.

Andrade Filho (2007) estimou que com o aumento da produção do biodiesel nos Estados Unidos e na Europa e com declínio contínuo do preço, para os próximos anos não se espera um valor superior a 450 \$/tonelada. Araujo (2008) utiliza em suas análises R\$ 0,65 como preço de referência para a glicerina.

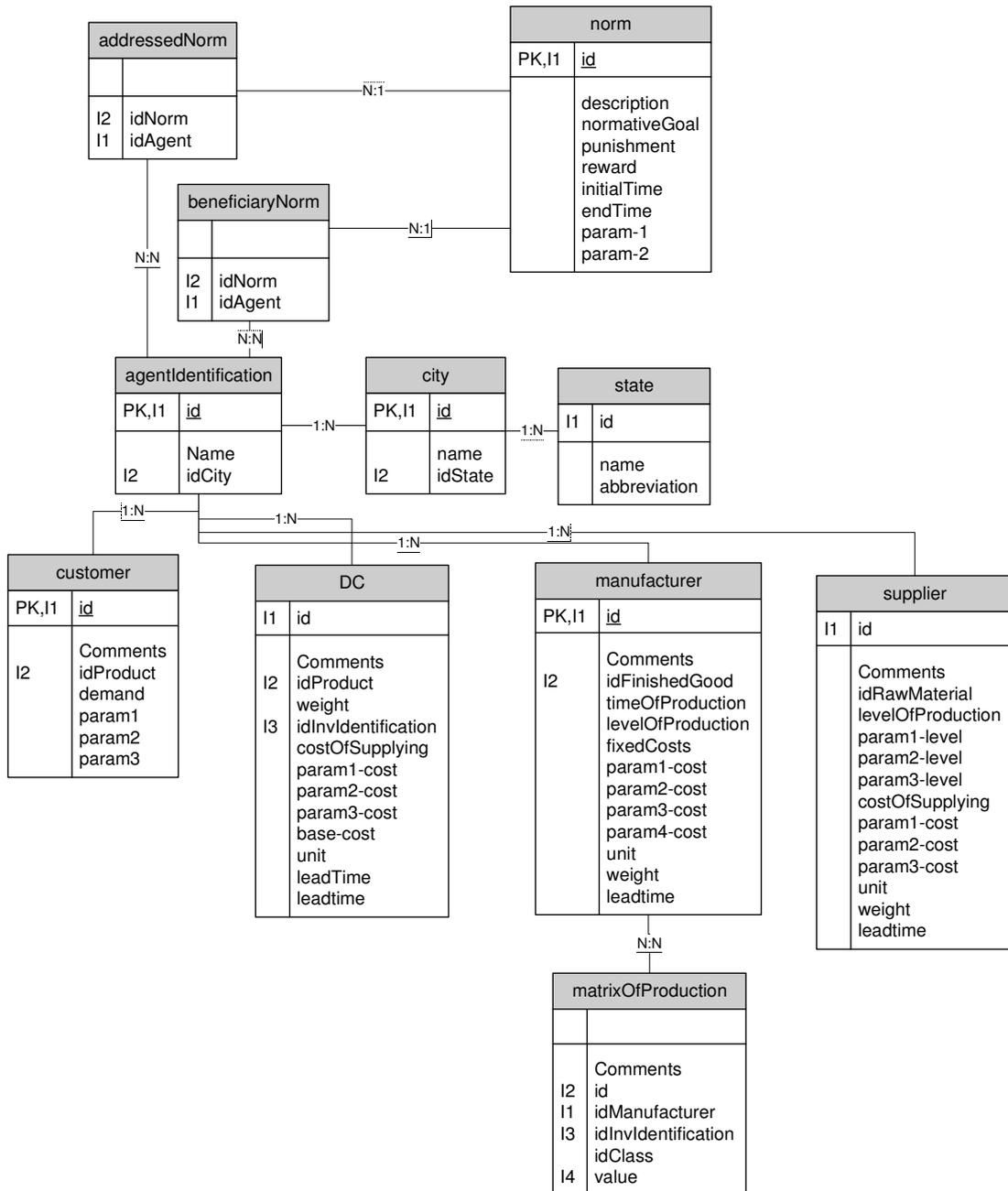
Formação do custo de produção de biodiesel

Há alguns trabalhos na literatura brasileira que procuram estimar o custo de produção do biodiesel, entre eles pode-se citar Leiras *et al.* (2007), Barros *et al.* (2006), Andrade Filho (2007) e Faleiros (2008). Entre os trabalhos do exterior, destaca-se o trabalho de Hass *et al.* (2006) como uma boa referência.

Analisando esses trabalhos pode-se verificar que o custo de produção de biodiesel é formado por três parcelas principais: custo de aquisição de matéria-prima, custos de operação e manutenção (utilidades, pessoal, encargos trabalhistas, administração) e custo de depreciação do investimento.

O custo da matéria-prima é apontado como o principal custo de uma usina de biodiesel, conforme percentuais estimados por Faleiros (2008) para uma usina de 100 mil t/ano: custos de aquisição de matérias-primas (88%); outros custos variáveis (7%); custo de depreciação do investimento (2%); e, outros custos fixos (3%). Hass *et al.* (2006) também estima 88% dos custos de produção com aquisição de matérias-primas para uma usina de 38 mil m³ anuais, Andrade Filho (2007) estima em seus experimentos um percentual de 80% com aquisição de matérias-primas.

ANEXO E – DIAGRAMA ENTIDADE-RELACIONAMENTO



ANEXO E – PUBLICAÇÕES DO ALUNO COM O ORIENTADOR

FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D.; Supply chain based agent simulation: towards a normative approach. In: 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 2009, Moscou, Rússia. (Aceito para publicação).

FERREIRA, L.; MOURA, G. L., BORENSTEIN, D.; FISCHMANN, A. A.. Utilização de redes neurais artificiais como estratégia de previsão de preços no contexto do agronegócio. In: V Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2008, Resende-RJ.

FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D. ; PROTIL, R. M. . Análise da viabilidade na produção de biodiesel a partir da soja no Brasil. In: Vanderli Fava de Oliveira. (Org.). Tópicos Emergentes e Desafios Metodológicos em Engenharia de Produção: Casos, Experiências e Proposições. 1 ed. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008, v. , p. 82-88.

BORENSTEIN, D.; FERREIRA, L.. A DSS to Locate Biodiesel Production Plants. In: 9th International Conference on Decision Support Systems, 2007, Calcutá.

CRISTO, F.; MÜLLER, F. M. ; FERREIRA, L. ; BORENSTEIN, D. Metaheurísticas para a Solução do Problema da Árvore de Cobertura Mínima Generalizado. In: XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2007, Fortaleza-CE.

FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D. Análise da viabilidade da produção de Biodiesel a partir do soja no Brasil. In: XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2007, Fortaleza-CE.

CRISTO, F.; MÜLLER, F. M. ; FERREIRA, L. ; BORENSTEIN, D.. Algoritmo de busca tabu para o problema da árvore geradora mínima generalizado. In: XXVII Enegep, 2007, Foz do Iguaçu-PR.

FERREIRA, L.; CRISTO, F. ; MÜLLER, F. M. ; BORENSTEIN, D.. Algoritmo Genético para o problema da árvore geradora mínima generalizado. In: XXVII Enegep, 2007, Foz do Iguaçu-PR.

CRISTO, F.; MÜLLER, F. M. ; FERREIRA, L. ; BORENSTEIN, D.. A Tabu Search Algorithm for the Generalized Minimum Spanning Tree Problem. In: XII International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2007, Foz do Iguaçu-PR.

FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D.. O uso da simulação para dimensionamento de uma praça de pedágio. In: XXXVIII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2006, Goiânia-GO.

FERREIRA, L. ; PILLATT, F. R.; VIT, A. R. ; BORENSTEIN, D.. Uma ferramenta para automatização do processo de negociação em ambientes B2B. In: III Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, 2006, Curitiba-PR.