UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JOAQUIM ROCHA DOS SANTOS

A indústria da cana-de-açúcar: uma análise sob a perspectiva da dinâmica de sistemas.

São Paulo
2012

JOAQUIM ROCHA DOS SANTOS

A indústria da cana-de-açúcar: uma análise sob a perspectiva da dinâmica de sistemas.

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Naval e
Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ramos
Martins.

São Paulo

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 05 de julho de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Joaquim Rocha dos

A indústria da cana-de-açúcar: uma análise sob a perspectiva da dinâmica de sistemas / J.R. dos Santos. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.

323 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Simulação de sistemas 2. Dinâmica (Sistemas) 3. Cana-de-açúcar 4. Economia agrícola I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II t.

Nome: SANTOS, Joaquim Rocha dos

Título: A indústria da cana-de-açúcar: uma análise sob a perspectiva da dinâmica de sistemas

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.	_____	Instituição: _____
Julgamento:	_____	Assinatura: _____

Prof. Dr.	_____	Instituição: _____
Julgamento:	_____	Assinatura: _____

Prof. Dr.	_____	Instituição: _____
Julgamento:	_____	Assinatura: _____

Prof. Dr.	_____	Instituição: _____
Julgamento:	_____	Assinatura: _____

Prof. Dr.	_____	Instituição: _____
Julgamento:	_____	Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

A Deus, por nos dar força, fé que era possível, e energia.

Aos meus pais, pelo seu carinho e dedicação ao longo de toda sua vida.

A Elizabeth e Catarina, por seu apoio, paciência, amor e dedicação.

Aos inúmeros amigos que me ajudaram nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho marca uma importante etapa da nossa vida. Tais momentos exigem de nós reflexão sobre os fatos e as pessoas que nos trouxeram até aqui. Sou grato a tantas pessoas, que não seria possível citá-las neste espaço. Peço de coração a todos que não têm seu nome aqui citado que me perdoem, pois isso não é prova de esquecimento, mas das minhas limitações.

Agradeço em primeiro a meus pais Joaquim Ferreira dos Santos e Fausta Rocha dos Santos que tanto fizeram por mim, com seu carinho, esforço e firmeza.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e especialmente ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica que me acolheu e viabilizou a oportunidade de realizar este sonho.

Ao Professor-Doutor Marcelo Ramos Martins, meu orientador e amigo, meu mais profundo agradecimento pela confiança em mim depositada e por sua orientação e apoio, ao longo de todo o processo, acreditando que seria possível a elaboração de um modelo de Dinâmica de Sistemas.

Ao Professor-Doutor Moyses Szajnbok, meu agradecimento pela enorme paciência e desejo de ensinar. Fique certo que suas orientações foram importantíssimas e decisivas para o sucesso desta empreitada.

Ao Professor-Doutor Vahan Agopyan, Pró-Reitor de Pós-Graduação, por seu apoio, confiança e colaboração.

Aos Professores-Doutores Pierre Jacques Ehrlich, Isaías Custódio e Abraham Yu meu agradecimento por suas perguntas difíceis que tanto nos forçaram à reflexão, sua amizade e seu incondicional apoio.

À Cátedra UNESCO de Sustentabilidade da Universidade Politécnica da Catalunha, na pessoa dos Professores-Doutores Jordi Morato, Juan Martin Garcia e Juan J. de Felipe, nosso agradecimento pela recepção e orientação durante o estágio naquela Universidade.

A Elizabeth e Catarina pelo seu apoio e amor incondicionais e por sua paciência durante minha justificada ausência.

A Deus e a seus anjos, pela força, fé, confiança e ajuda.

RESUMO

A indústria da cana-de-açúcar brasileira é reconhecida por sua competitividade e baixos custos de produção de etanol e açúcar. O lançamento do veículo bicombustível em 2003 acelerou o crescimento da indústria nesta década. Apesar desse crescimento, a indústria da cana-de-açúcar passa por momentos de incerteza devido a falta de investimentos, aumento dos custos de produção e ausência de políticas públicas que regulem o uso do etanol como combustível.

Esta tese explora a dinâmica da indústria da cana-de-açúcar. Um modelo de Dinâmica de Sistemas é desenvolvido para explorar o comportamento da indústria por uma perspectiva endógena. Sem pressupor equilíbrio, o modelo oferece uma representação geral das principais ligações entre os setores da indústria. A estrutura causal do sistema é largamente explorada, gerando *insights* sobre as razões endógenas do comportamento do sistema real.

O comportamento do modelo mostra boa agregação aos dados reais, aumentando a confiança da sua estrutura. É conduzida uma análise de política e o resultado emergente do sistema gera interessantes *insights* sobre o comportamento do modelo.

Os achados do trabalho incluem:

- Comportamento inesperado do sistema;
- Elevado grau de acoplamento entre a indústria do açúcar e do etanol;
- A baixa elasticidade-preço da demanda no mercado internacional de açúcar, e moderada no mercado nacional;
- Reação endógena à implementação de políticas;
- A indústria é pouco responsiva ao crescimento da demanda, quando isso exige aquisição de nova capacidade produtiva;
- Contribuição sobre o conhecimento existente da indústria.

A tese é concluída com sugestões para trabalhos futuros, que conectam o modelo com várias áreas de conhecimento onde podem ser esperados problemas no médio ou longo prazo; esses problemas são:

- Redução na emissão de CO₂;

- Efeitos do uso da terra;
- Efeitos da entrada de novos combustíveis no mercado; e
- Inclusão da bioenergia, gerada a partir do bagaço de cana, que altera a estrutura de custos da indústria.

ABSTRACT

The sugarcane industry in Brazil is recognized for its competitiveness and low production cost of both ethanol and sugar. The flex-fuel technology, launched in 2003, boosted the industry growth in the last decade. Despite this growth, sugarcane industry is undergoing a period of uncertainty due to a lack of investments, raising production costs, and a lack of policies concerning the ethanol regulation.

This dissertation explores the dynamic of the sugarcane industry. A system dynamics model is developed to explore the industry behavior from an endogenous perspective. The model provides a general disequilibrium representation of the major linkages between the main sectors of the industry. The causal structure of the system is highly explored generating insights on the endogenous reasons of the industry behavior.

Model behavior shows a good fit with real world data increasing the confidence on model structure. A single policy analysis is carried out and its emerging results generate insights on the endogenous reasons of system behavior.

Findings on these results include:

- Surprising behavior of the model;
- The high degree of coupling between the sugar and ethanol industries;
- The very low price-elasticity of demand on the international sugar market, and a moderate price-elasticity of demand on the national sugar market;
- Endogenous policy reaction;
- Low responsivity of industry to an increase demand, due to high delays in capacity acquisition;
- Delays in capacity acquisition generating dynamics;
- Contribution to existing knowledge on the system.

The dissertation finishes with suggestions for future works linking the model with several areas of knowledge with potential problems in the middle or long term for the industry; these problems are:

- Reduction in CO₂ emissions;
- Land-use effects;

- Effects of new fuels insertion in the market; and
- Inclusion of power generation using sugarcane bagasse, which changes the industry cost structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vendas de Carros no Brasil (1975 a 2009).....	4
Figura 2 - Evolução da produção anual de etanol hidratado no Brasil.	6
Figura 3 – Exportações de etanol	7
Figura 4 – Retrato da década.....	8
Figura 5 – Comparação das safras 2010/11 e 2011/12.....	8
Figura 6 – Evolução dos custos e preços do etanol.....	9
Figura 7 – Preço do Etanol à Vista (2003 a 2011).....	10
Figura 8 – Preço do Açúcar (2003-2011)	11
Figura 9 – Como as decisões são tomadas	18
Figura 10 – Eixos da complexidade	21
Figura 11 – Classificação dos Modelos	24
Figura 12 – Fontes de dados de um modelo de DS.....	27
Figura 13 – Uma Representação do Processo de Modelagem.....	31
Figura 14 – Visão do Pensamento Orientado a Eventos	38
Figura 15 - Exemplo de diagrama causal	40
Figura 16 – Exemplo da variação da aceleração e da velocidade	41
Figura 17 – Exemplo de Sistema Dinâmico	44
Figura 18 - Exemplo de Diagrama de Forrester.....	45
Figura 19 – Exemplo de Diagrama de Forrester de uma estrutura de atraso.....	47
Figura 20 – Exemplo de Atraso.....	48
Figura 21 – Cana-de-açúcar	50
Figura 22 – O ciclo fenológico da cana-de-açúcar	51
Figura 23 – Evolução da parcela de renovação dos canaviais.....	55
Figura 24 – Impacto do trato do canavial.....	55
Figura 25 – Corte manual	59
Figura 26 – Corte mecanizado	59
Figura 27 – Regiões de Produção de cana-de-açúcar no Brasil.....	63
Figura 28 – Comparação de prazos para eliminação da queima da palha de cana no Estado de São Paulo	65
Figura 29 – Evolução das áreas plantadas e colhidas de cana-de-açúcar.....	67

Figura 30 – Evolução do rendimento da terra.....	67
Figura 31 – Evolução do percentual de produção de açúcar e etanol	68
Figura 32 – Evolução da produção brasileira de etanol anidro e hidratado	69
Figura 33 – Evolução da produção brasileira de açúcar	69
Figura 34 – Exportações e importações de açúcar.....	70
Figura 35 – Exportações e importações de etanol	71
Figura 36 – Evolução da paridade do preço do etanol versus o da gasolina C	72
Figura 37 - Diagrama de Influências do modelo de decisão de produção de etanol e açúcar	76
Figura 38 – Visão exógena do comportamento da indústria.	79
Figura 39 – Condições de convergência e divergência do modelo "Teia de Aranha"	81
Figura 40 – Tragédia dos Comuns	84
Figura 41 – Proposta de modelo geral para o mercado de açúcar	86
Figura 42 – Malhas que afetam o preço do produto	93
Figura 43 – Curva de aprendizagem do etanol: preços, tendências e taxas de evolução.	93
Figura 44 – Exportações e importações de etanol (1989 – 2009).....	94
Figura 45 – Exportações e importações de açúcar (1989 – 2009)	95
Figura 46 – Diagrama de setores do modelo	99
Figura 47 – Diagrama de subsistemas do modelo.....	101
Figura 48 – Diagrama Causal	103
Figura 49 – Detalhe da malha de Substituição	106
Figura 50 – Malha <i>Utilização Capacidade Açúcar</i>	107
Figura 51 – Detalhe da malha de <i>Utilização Capacidade Etanol</i>	108
Figura 52 – Detalhe da malha <i>Nova Capacidade Industrial para Açúcar</i>	109
Figura 53 – Detalhe da malha <i>Nova Capacidade Industrial para Etanol</i>	110
Figura 54 – Detalhe da malha <i>Atratividade Produção Açúcar</i>	111
Figura 55 - Detalhe da malha <i>Atratividade Produção Etanol</i>	112
Figura 56 – Visão das Variáveis de Controle com seus Valores.	117
Figura 57 – Diagrama de Forrester do Módulo M00100 – Produção e Estoque de Cana	120
Figura 58 – Visão da Tela do Módulo M02400 – Interface de Calibração.	124

Figura 59 – Colheita de cana-de-açúcar	125
Figura 60 – Erros percentuais da <i>Colheita de Cana</i>	126
Figura 61 – Valores do coeficiente de desigualdade de Theil para a <i>Colheita de Cana</i>	127
Figura 62 – Entregas de açúcar	128
Figura 63 – Erros percentuais de <i>Entregas de Açúcar</i>	129
Figura 64 – Valores do coeficiente de desigualdade de Theil para <i>Entregas de Açúcar</i>	129
Figura 65 – Preço do açúcar ao consumidor	130
Figura 66 – Erro percentual da variável <i>Preço do Açúcar ao Consumidor</i>	131
Figura 67 – Valores do coeficiente de desigualdade de Theil para <i>Preço do Açúcar</i>	131
Figura 68 – Encomendas de açúcar no mercado interno.....	132
Figura 69 – Erro percentual da variável <i>Demanda de Açúcar no Mercado Interno</i>	133
Figura 70 – Valores de U_m , U_s e U_c para a variável <i>Demanda de Açúcar no Mercado</i> <i>Interno</i>	133
Figura 71 – Exportações brasileiras de açúcar	134
Figura 72 – Erro percentual da variável <i>Demanda de Açúcar para Exportação</i>	135
Figura 73 – Valores de U_m , U_s e U_c para a variável <i>Demanda de Açúcar Brasileiro para</i> <i>Exportação</i>	135
Figura 74 – Entregas de etanol	136
Figura 75 – Erro percentual para a variável <i>Entregas de Etanol</i>	137
Figura 76 – Valores de U_m , U_s e U_c para <i>Entregas de Etanol</i>	137
Figura 77 – Preço do etanol ao consumidor.....	138
Figura 78 – Erro percentual na variável <i>Preço Etanol ao Consumidor</i>	139
Figura 79 – Valores de U_m , U_s e U_c para <i>Preço do Etanol ao Consumidor</i>	139
Figura 80 – Percentagem de uso de etanol em carros bicom bustíveis.....	141
Figura 81 – Erro percentual da variável <i>Preço do Etanol ao Consumidor</i>	142
Figura 82 – Valores de U_m , U_s e U_c para <i>Percentual de Uso de Etanol em Carros Flex</i>	142
Figura 83 – Evolução da Capacidade Industrial da Indústria Sucroalcooleira.....	148
Figura 84 – Módulo M00500 alterado para representar a política.....	150
Figura 85 – Módulo M00800 alterado para representar a política.....	151
Figura 86 – Efeito do PIPE na Colheita de Cana-de-Açúcar	152
Figura 87 – Efeito do PIPE no Consumo de Etanol Anidro em Carros Flex	154

Figura 88 – Efeito do PIPE nas Entregas de Etanol	154
Figura 89 – Efeito do PIPE no Preço do Etanol ao Consumidor.....	155
Figura 90 – Efeito do PIPE na Decisão de Uso de Etanol em Carros Flex.....	155
Figura 91 – Efeito do PIPE nas Entregas de Açúcar	157
Figura 92 – Efeito do PIPE na Exportação Brasileira de Açúcar.....	157
Figura 93 – Efeito do PIPE no Preço do Açúcar ao Consumidor.....	158
Figura 94 – Efeito do PIPE na Capacidade Industrial de Operação	158
Figura 95 – Demanda Natural Internacional de Açúcar	164
Figura 96 – Exemplo de resistência do sistema às políticas.....	165
Figura 97 – Efeitos dos Preços e da Cobertura de Estoque no Preço do Etanol	166
Figura 98 – Evolução dos custos estimados do etanol.....	170
Figura 99 – Fluxograma de Processo do Açúcar e Álcool.	189
Figura 100 – Diagrama de Forrester do Módulo M00200 – Previsão de Demanda de Cana.	191
Figura 101 – Diagrama de Forrester o Módulo M00300 – Produção e Estoque de Açúcar.	195
Figura 102 – Módulo M00400 – Produção e Estoque de Etanol.....	198
Figura 103 – Diagrama de Forrester do Módulo M00500 – Custos de Produção.....	201
Figura 104 – Diagrama de Forrester do Módulo M00600 – Utilização de Capacidade Industrial.....	204
Figura 105 – Diagrama de Forrester do Módulo M00700 – Capacidade de Produção Industrial.....	207
Figura 106 – Diagrama de Forrester do Módulo M00800 – Capacidade Desejada de Produção Industrial	210
Figura 107 – Diagrama de Forrester do Módulo M00900 – Decisão de Produção Açúcar ou Etanol.....	214
Figura 108 – Diagrama de Forrester do Módulo M01000 – Demanda Total de Cana, Açúcar e Etanol.....	218
Figura 109 – Diagrama de Forrester do Módulo M01100 – Encomendas de Açúcar no Mercado Interno.....	220
Figura 110 – Diagrama de Forrester do Módulo M01200 - Demanda Natural de Açúcar no Mercado Interno.	223

Figura 111 – Diagrama de Forrester do Módulo M01300 – Demanda de Açúcar Brasileiro no Mercado Externo.....	226
Figura 112 – Diagrama de Forrester do módulo M01400 – Consumo Mundial de Açúcar.....	230
Figura 113 – Diagrama de Forrester do Módulo M01500 – Preço do Açúcar.	233
Figura 114 – Diagrama de Forrester do Módulo M01600 – Frota de Carros a Gasolina.	236
Figura 115 – Diagrama de Forrester do Módulo M01700 – Frota de Carros Flex.	239
Figura 116 – Diagrama de Forrester do Módulo M01800 – Frota de Carros a Etanol.	242
Figura 117 – Diagrama de Forrester do Módulo M01900 – Demanda Natural de Etanol Anidro.	245
Figura 118 – Diagrama de Forrester do Módulo M02000 – Demanda Natural de Etanol Hidratado.....	248
Figura 119 – Diagrama de Forrester do Módulo M21000 – Preço do Etanol.	250
Figura 120 – Diagrama de Forrester do Módulo M02200 – Decisão de uso de Etanol em Carros Flex.	253
Figura 121 – Diagrama de Forrester do Módulo M02300 – Preço do Açúcar para Decisão.	256

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos Defensivos versus Reflexivos	36
Tabela 2 – Testes em modelos de Dinâmica de Sistemas	36
Tabela 3 – Símbolos de Identificação de Malhas em Diagramas Causais	43
Tabela 4 – Composição média dos colmos da cana-de-açúcar.....	50
Tabela 5 – Faixas dos valores de Índice de Maturação (IM)	57
Tabela 6 – Informações técnicas da cultura de cana-de-açúcar	71
Tabela 7 – Custos Variáveis e Fixos de Produção do Açúcar e do Etanol	74
Tabela 8 – Relação entre as elasticidades da oferta e da demanda e o comportamento do sistema econômico no modelo Cobweb.	82
Tabela 9 – Tabela de Limites do Modelo.....	90
Tabela 10 – Definições dos setores.	97
Tabela 11 – Relação dos módulos aos setores do modelo	100
Tabela 12 – Relação de módulos do modelo.	116
Tabela 13 – Equações do Módulo M00000 – Variáveis de Controle	118
Tabela 14 – Equações do módulo M00100 – Produção e Estoque de Cana.....	121
Tabela 15 – Avaliação do comportamento dos custos do etanol	140
Tabela 16 – Testes Realizados no Modelo	145
Tabela 17 – Resumo das observações dos efeitos do PIPE	159
Tabela 18 – Equações do módulo M00200 – Previsão de Demanda de Cana	192
Tabela 19 – Equações do módulo M00300 – Produção e Estoque de Açúcar.....	196
Tabela 20 – Equações do módulo M00400 – Produção e Estoque de Etanol.....	198
Tabela 21 – Equações do módulo M00500 – Custos de Produção	201
Tabela 22 – Equações do módulo M00600 – Utilização de Capacidade Industrial.....	205
Tabela 23 – Equações do módulo M00700 – Capacidade de Produção Industrial.	208
Tabela 24 – Equações do módulo M00800 – Capacidade Desejada de Produção Industrial.....	211
Tabela 25 – Equações do módulo M00900 – Decisão de Produção Açúcar ou Etanol.	215
Tabela 26 – Equações do módulo M01000 – Demanda Total de Cana, Açúcar e Etanol.	219

Tabela 27 – Equações do módulo M01100 – Encomendas de Açúcar no Mercado Interno.....	221
Tabela 28 – Equações do módulo M01200 – Demanda Natural de Açúcar no Mercado Interno	224
Tabela 29 – Equações do módulo M01300 – Demanda de Açúcar Brasileiro no Mercado Externo.....	227
Tabela 30 – Equações do módulo M01400 – Consumo Mundial de Açúcar.....	231
Tabela 31 – Equações do módulo M01500 – Preço do Açúcar	234
Tabela 32 – Equações do módulo M01600 – Frota de Carros a Gasolina.....	237
Tabela 33 – Equações do módulo M01700 – Frota de Carros Flex.....	240
Tabela 34 – Equações do módulo M01800 – Frota de Carros a Etanol.	243
Tabela 35 – Equações do módulo M01900 – Demanda Natural de Etanol Anidro.....	246
Tabela 36 – M02000 – Demanda Natural de Etanol Hidratado.	249
Tabela 37 – Equações do módulo M02100 – Preço do Etanol.....	251
Tabela 38 – Equações do módulo M02200 – Decisão de uso de Etanol em Carros Flex.	254
Tabela 39 – Equações do módulo M02300 – Preço do Açúcar para Decisão.	257
Tabela 40 – Produção de cana-de-açúcar no Brasil	260
Tabela 41 – Produção de açúcar no Brasil.....	261
Tabela 42 – Importações de açúcar para o Brasil.....	262
Tabela 43 – Exportações de açúcar do Brasil	263
Tabela 44 – Produção de etanol anidro, hidratado e total no Brasil.	264
Tabela 45 – Importações de etanol para o Brasil.....	265
Tabela 46 – Exportações de Etanol do Brasil.....	266
Tabela 47 – Fração de cana-de-açúcar para a produção de açúcar	267
Tabela 48 – Fração de cana-de-açúcar para a produção de etanol	268
Tabela 49 – Demanda de açúcar no mercado interno	269
Tabela 50 – População do Brasil.....	270
Tabela 51 – População mundial.....	271
Tabela 52 – Consumo mundial de açúcar.....	272
Tabela 53 – Preço do açúcar ao consumidor (Brasil)	273
Tabela 54 – Preço internacional do açúcar	274

Tabela 55 – Vendas de carros a gasolina, etanol e flex.....	275
Tabela 56 – Frota de carros a gasolina, etanol e flex	276
Tabela 57 – Preço do etanol no Brasil	277
Tabela 58 – Preço da gasolina no Brasil	278
Tabela 59 – Critério de decisão gasolina ou etanol.....	279
Tabela 60 – Taxa de câmbio R\$/US\$	280
Tabela 61 – Taxa de inflação	281
Tabela 62 – Custos da cana-de-açúcar (1998 – 2010).....	282
Tabela 63 – Custos de Produção do Etanol (1980 – 2002).....	283
Tabela 64 – Custos de Produção do Açúcar e do Etanol (2006 – 2010).....	284
Tabela 65 – Custos do Açúcar e do Etanol (1980 – 2010)	285
Tabela 66 – História da Distribuição de Combustíveis no Brasil	294

LISTA DE SIGLAS

ANFAVEA	Associação Nacional de Veículos Automotores
ATR	Açúcar Total Recuperável
BLUM	<i>Brazilian Land Use Model</i>
CEPEA	Centro de Pesquisas em Economia Aplicada
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Querioz”
IAA	Indústria do Açúcar e do Alcool
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICONE	Instituto de Estudo do Comércio e Negociações Internacionais
MR	Modo de Referência
NIPE	Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Estratégico
OCDE	Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PIB	Produto Interno Bruto
PROALCOOL	Programa Nacional do Alcool
ÚNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
UNICAMP	Universidade de Campinas
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Propósito.....	1
1.2	Histórico	2
1.3	Problema de pesquisa.....	6
1.4	Relevância e contribuição	12
1.5	Objetivos	14
1.5.1	Objetivo Principal	14
1.5.2	Objetivos Secundários	14
1.6	Estrutura do trabalho.....	15
2	Metodologia	17
2.1	Justificativa do método de pesquisa adotado	17
2.1.1	Como os problemas são abordados	17
2.1.2	Definição de modelo.....	18
2.1.3	Porque modelar	19
2.1.4	Os eixos da complexidade	20
2.1.5	Características dos sistemas complexos.....	21
2.1.6	Classificação dos modelos	23
2.1.7	Modelos de simulação.....	24
2.1.8	A escolha da Dinâmica de Sistemas como método de condução do trabalho	28
2.2	Processo de criação de modelos em Dinâmica de Sistemas	29
2.2.1	Articulação do problema	31
2.2.2	Formulação da Hipótese Dinâmica.....	35
2.2.3	Formulação de um Modelo de Simulação.....	35

2.2.4	Testes do modelo	35
2.2.5	Formulação e avaliação de políticas.....	37
2.3	Conceitos básicos de modelagem em Dinâmica de Sistemas	38
2.3.1	Pensamento sistêmico versus pensamento orientado a eventos	38
2.3.2	Relações causais e realimentação	39
2.3.3	Diagramas causais	39
2.3.4	Diagramas de Forrester (Níveis e Vazões).....	44
2.3.5	Atrasos.....	46
3	A indústria da cana-de-açúcar	49
3.1	A cana-de-açúcar	49
3.2	Processo agrícola	52
3.2.1	Manejo.....	52
3.2.2	Efeitos da inadequação do manejo	54
3.2.3	Maturação	56
3.2.4	Colheita e Transporte	57
3.3	Processo industrial.....	60
3.4	Aspectos ambientais.....	61
3.4.1	Impacto na qualidade do ar.....	61
3.4.2	A competição comida versus combustível	62
3.4.3	Queimadas e protocolo ambiental.....	64
3.5	Aspectos econômicos	66
3.5.1	Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol.	66
3.5.2	Custos de produção	72
3.5.3	A decisão de produção de açúcar ou etanol	75
4	Aprendendo com trabalhos anteriores	79

4.1	Primeiro modelo: uma visão exógena para previsão de preços do açúcar e do etanol	79
4.2	Segundo Modelo: “Teia de Aranha”	80
4.3	Terceiro modelo: a tragédia dos comuns (<i>The tragedy of commons</i>)	82
4.4	Quarto modelo: o modelo genérico do mercado de <i>commodities</i>	84
4.4.1	A linha de suprimentos do açúcar	85
4.4.2	A malha B1 - Substituição	87
4.4.3	A malha B2 – Utilização de Capacidade	87
4.4.4	A malha B3 – Aquisição de Capacidade	87
5	Hipótese Dinâmica	89
5.1	Tabela de Limites do Modelo	89
5.1.1	Variáveis exógenas	92
5.1.2	Variáveis excluídas	96
5.2	Diagrama de Subsistemas	97
5.3	Diagrama Causal	102
5.3.1	Linha de suprimento da capacidade industrial	102
5.3.2	Linha de suprimento da cana-de-açúcar	104
5.3.3	Linha de suprimento do açúcar	104
5.3.4	Linha de suprimento do etanol	104
5.3.5	Malha de Substituição	106
5.3.6	Malha de Utilização de Capacidade Industrial do Açúcar	107
5.3.7	Malha de Utilização de Capacidade Industrial do Etanol	108
5.3.8	Malha de Nova Capacidade Industrial para Açúcar	109
5.3.9	Malha de Nova Capacidade Industrial para Etanol	110
5.3.10	Malha de Atratividade Produção Açúcar	111
5.3.11	Malha de Atratividade Produção Etanol	112

6	Modelo de simulação	115
6.1	Apresentação do modelo.....	115
6.1.1	Módulo M00000 – Variáveis de Controle	117
6.1.2	Módulo M00100 – Produção e Estoque de Cana.....	119
6.1.3	Módulo M02400 – Interface de Calibração.....	123
6.2	Apresentação e discussão dos resultados do modelo.....	124
6.2.1	Colheita de cana-de-açúcar	125
6.2.2	Entregas de Açúcar	128
6.2.3	Preço do açúcar	130
6.2.4	Encomendas de açúcar no mercado interno.....	132
6.2.5	Exportações de açúcar.....	134
6.2.6	Entregas de Etanol.....	136
6.2.7	Preço do etanol ao consumidor	138
6.2.8	Porcentagem de uso de etanol em carros flex.....	141
6.3	Testes do modelo.....	143
7	Projeto e análise de políticas.....	147
7.1	Uma visão dos problemas da indústria sucroalcooleira	147
7.2	Uma política de incentivo à produção de etanol (PIPE)	149
7.3	Avaliação da política de incentivo à produção de etanol	151
7.3.1	Efeitos do PIPE na cana-de-açúcar	152
7.3.2	Efeitos do PIPE no etanol.....	153
7.3.3	Efeitos do PIPE no açúcar.	156
8	Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	161
8.1	Conclusões	161
8.1.1	Ocorrência de comportamentos não previstos.....	162
8.1.2	Acoplamento da indústria sucroalcooleira.....	163

8.1.3	Sensibilidade da Demanda ao Preço do Açúcar	164
8.1.4	Reação do sistema à política.	165
8.1.5	A demora na reação da indústria	167
8.1.6	Contribuição a Campos (2010)	167
8.2	Limitações do modelo.....	168
8.2.1	Regras de Decisão.....	168
8.2.2	Extensões dos limites do modelo	169
9	Bibliografia.....	175

APÊNDICES

Apêndice A – Fluxograma de Processo – Açúcar e Alcool

Apêndice B – Módulos do Modelo de Simulação

Apêndice C – Dados Usados no Processo de Modelagem

Apêndice D – Súmula da Entrevista com Luís Carlos Correa de Carvalho

1 Introdução

1.1 Propósito

O propósito desta tese é estudar o comportamento dinâmico da indústria da cana-de-açúcar brasileira, por meio do desenvolvimento de um modelo de Dinâmica de Sistemas do setor. O modelo apresentado pretende servir de base para estudos futuros, seja por meio de aperfeiçoamentos, seja por meio de maior detalhamento em algum dos seus setores específicos, seja por extensões dos seus limites.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e açúcar, sendo o segundo produtor mundial de etanol. Além desses dois produtos, o bagaço de cana é utilizado para cogeração de energia elétrica, fabricação de ração animal e fertilizantes para as lavouras. Na safra 2008/2009, estima-se que a indústria canavieira movimente 51 bilhões de reais anuais, o equivalente a 1,76% do Produto Interno Bruto do Brasil, com 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos, com área cultivada de aproximadamente 8 milhões de ha (NEVES e CONEJERO, 2010). Ainda nessa safra o equivalente monetário das exportações de açúcar e etanol foi de seis e 2,2 bilhões de dólares, respectivamente (NEVES e CONEJERO, 2010).

A indústria da cana-de-açúcar contribui de maneira relevante para a segurança energética do país, reduzindo sua independência dos combustíveis fósseis, e contribui para a redução de emissão de CO₂ na atmosférica, seja pelo uso do etanol hidratado como combustível substituto da gasolina em motores de ciclo Otto, seja pela adição do etanol hidratado à gasolina.

Apesar da relevância estratégica, econômica e ambiental do setor, não se identificou na literatura um modelo que permitisse uma análise ampla dessa indústria. Este trabalho pretende contribuir para a redução dessa lacuna, analisando o setor sob a ótica da Dinâmica de Sistemas, metodologia que tem se mostrado adequada à análise de sistemas complexos e que permite gerar modelos que comuniquem as diferentes visões dos interessados em um sistema de maneira consistente, permitindo discussões e análises.

1.2 Histórico

No século XIV o açúcar era muito valioso, uma vez que sua produção na Europa era possível em quantidades que não supriam a demanda do continente, uma vez que por questões climáticas não era possível desenvolver-se o plantio da cana-de-açúcar. O açúcar era então comercializado com o Oriente por rotas terrestres. Com a tomada de Constantinopla pelos turcos em 1453, considerada por muitos historiadores como o marco final da Idade Média, o fornecimento que vinha do Oriente foi interrompido, aumentando ainda mais o seu valor.

Após esse evento histórico, iniciou-se o período das grandes navegações. Portugal destacou-se nessa fase uma vez que possuía grande domínio das ciências náuticas, desenvolvidas a partir da fundação da Escola de Sagres, pelo infante Dom Henrique, fato esse contestado pelos historiadores nos dias atuais¹. Evento marcante do período das grandes navegações foi o descobrimento do Brasil, terra propícia ao cultivo da cana-de-açúcar.

O cultivo de cana-de-açúcar começou no Brasil por ordem do rei Dom Manoel I, iniciando-se na Capitânia de Pernambuco e tendo grande desenvolvimento na Capitania de São Vicente, onde foi introduzida por Martin Afonso de Souza, que em 1532 instalou o Engenho dos Erasmos. No início do século XV o Brasil já era o maior produtor mundial de açúcar (Seabra, 2008).

O sucesso português na plantação de cana levou outros países europeus a desenvolverem plantações de cana na região do Caribe (UNICA, 2011). Com o desenvolvimento da tecnologia de obtenção do açúcar a partir da beterraba na Europa, que ocorreu no século XIX, houve uma crise no setor canavieiro e o Brasil passou a ocupar o 8º lugar na produção mundial da *commodity* (UNICA, 2011).

Já no século XX, o setor sofreu novas crises, com seu crescimento desordenado, o que obrigou o governo a intervir no setor, criando, em 1933, o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), com a missão de controlar a produção, por meio de um sistema de cotas, mantendo um equilíbrio entre a oferta e a demanda. Um

¹ Uma versão oficial da Marinha de Portugal sobre esse fato histórico pode ser encontrada em <http://www.marinha.pt/PT/amarinha/historia/historiadamarinha/Pages/CriacaodaEscoladeSagresedeseenvolvimentodeconhecimentosocanografosemeteorologicos.aspx>

evento externo que abalou a economia mundial gerou uma nova perspectiva para o setor: a primeira crise do petróleo, ocorrida em 1973.

No período decorrido entre 1950 e 1973 a demanda mundial por petróleo cresceu de maneira estável em torno de 9,5% ao ano, sendo que seu preço nesse período se manteve na faixa entre dois e três dólares o barril. Em 1973, por razões políticas, a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) estabeleceu um novo patamar de produção e os custos subiram para 11,65 dólares por barril (PINTO Jr., et al., 2007).

O aumento no preço do petróleo e a pequena elasticidade-preço da demanda no curto prazo levaram os países dependentes das importações de petróleo a passar por sérios problemas econômicos. Os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) reagiram reduzindo seu consumo discricionário de derivados de petróleo, alterando sua matriz energética e fazendo alterações em suas políticas macroeconômicas (fiscal e monetária), de forma a se oporem à crise energética e econômica (SANTOS, et al., 2009).

No Brasil a adição sistemática de etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar, à gasolina iniciou-se em 1935. Em 1975, como uma forma de enfrentar a crise do petróleo, o Brasil iniciou seu Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), que em sua primeira fase teve pretensões modestas de aumentar a mistura de etanol anidro à gasolina, de forma a reduzir as importações de petróleo. Com o decorrer do tempo as metas do governo se tornaram mais ambiciosas e a substituição do consumo de gasolina por etanol cresceu de 1% para 41% (LEITE, 2007).

O PROALCOOL teve vários projetos; um deles, de grande importância, foi o desenvolvimento autóctone do motor E-100, que usa como combustível o etanol hidratado². Em 1978, um acordo entre o Governo Brasileiro e a Associação Nacional de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2011) estabeleceu o início do desenvolvimento do

² A diferença entre o etanol anidro e o hidratado está no teor de água; no anidro o teor fica em torno de 0,5%, no hidratado ele chega a cerca de 5% em volume. O etanol anidro é o adicionado à gasolina, enquanto o hidratado é o etanol vendido nos postos de combustíveis. O etanol hidratado é obtido a partir do processo de destilação, enquanto o etanol anidro é produzido por um processo de desidratação do etanol hidratado.

carro movido a etanol, cuja primeira unidade foi lançada em 1979 (LEITE, 2007). A Figura 1 apresenta a evolução das vendas de carros no Brasil no período decorrido entre 1975 e 2009. Durante a década de 1980, as vendas de carro E-100 contribuíram com 70% das vendas totais de carros no país (LEITE, 2007).

Ao longo de toda a década de 1980 o Brasil passou por problemas econômicos, que aliados à redução do preço internacional do petróleo, reduziram o interesse do Governo no PROALCOOL. Aliados a esses fatores, o aumento no preço internacional do açúcar levou os usineiros a aumentarem a produção de açúcar em detrimento da produção de etanol, levando a uma escassez do combustível em 1989.

Como consequência de curto prazo, houve queda abrupta na venda de carros E-100 nos anos de 1989 e 1990; e como consequência de médio prazo houve a perda de confiança do consumidor, que levou as vendas do E-100 a caírem praticamente a zero nos anos seguintes. A participação do etanol como combustível automotivo caiu de 50% em 1988 para 40% em 1994 (LEITE, 2007).

Algumas modestas ações remanescentes mantiveram a venda de carros E-100, sempre em patamares muito baixos; um exemplo dessas ações foi uma decisão do governo federal, que preocupado com o desemprego no campo, adotou a política de que parte da frota de carros do governo fosse movida a etanol, essa política criou o que ficou conhecido como a “frota verde” (SANTOS, et al., 2009).

Em 2003, diante de uma grande incerteza no setor, foi lançada a injeção flexfuel no Brasil. Essa inovação tecnológica já estava disponível nos EUA desde 1988, tendo sido desenvolvida pela BOSCH. A tecnologia usada pela BOSCH era cara para os padrões nacionais e não era adequada. O motivo de sua inadequação é o uso de um sensor que avaliava a qualidade da queima monitorando os gases de descarga motor. Tal processo é eficaz quando o carro usa uma mistura com gasolina e etanol anidro, mas não quando usando gasolina C³ ou etanol hidratado (SANTOS, et al., 2009).

Em 2003 a Martin Marietta lançou uma nova tecnologia flexfuel no Brasil, que não utiliza o sensor de escape de gases, substituindo esse sensor por uma adaptação do seu software de controle da injeção. A Bosch e a Delphi lançaram suas versões alguns meses depois.

A incerteza inicial que cercava o lançamento do carro flex foi diluída pelo seu sucesso, assumindo a liderança de vendas no mercado nacional. Uma característica importante na tecnologia é que ela contorna a desconfiança do consumidor, gerada pela crise de abastecimento do início da década de 1990.

Com o carro flex, a decisão do tipo de combustível que será usado passa a ser tomada no posto de abastecimento e não mais no momento de se comprar o carro. Interessante discussão sobre a teoria desse comportamento dos consumidores pode ser encontrada em (SILBIGER, 2005), adaptada ao contexto desta indústria por (SANTOS E MARTINS, 2011).

Com o sucesso do carro flex, a demanda por etanol combustível cresceu rapidamente, como pode ser visto na Figura 2. Nessa figura, a parte cinza escuro representa a produção de etanol anidro, que é adicionado à gasolina, e a parte cinza claro representa a produção de etanol hidratado, que é usado diretamente como combustível.

³ Chama-se de gasolina C à mistura da gasolina pura, chamada de gasolina A, com o etanol anidro, dentro de padrões definidos pela ANP.

Como se pode observar no gráfico, a produção de etanol hidratado cresce rapidamente após 1978, atingindo um pico em 1990; como consequência da crise no final da década de 1980, há uma queda brusca na produção, que foi retomada a partir de 1993, atingindo um patamar de quase 10 milhões de m³ por ano. Com a obsolescência da frota de carros E-100, a produção teve uma queda constante a partir de 1997 até o ano 2000, quando teve uma ligeira recuperação. A partir de 2003, como consequência do lançamento do carro flex é notável o aumento de produção de etanol hidratado, atingindo na safra 2008/2009, representada no gráfico pelo ano 2008, uma produção de quase 18 milhões de m³.

Figura 2 - Evolução da produção anual de etanol hidratado no Brasil.

Fonte: MAPA (2011)

1.3 Problema de pesquisa

Como pode ser visto na Figura 1, a venda de carros flex continua a crescer, o que permite concluir que o mercado potencial do etanol no país também evolui positivamente. Com o crescente interesse de outros países pelo uso do etanol como uma alternativa aos combustíveis fósseis o etanol brasileiro também tem despertado interesse no mercado externo; isso pode ser verificado pelo crescente aumento nas exportações de etanol, mormente a partir de 2003 (vide Figura 3).

Figura 3 – Exportações de etanol

Fonte: MAPA (2011)

Com o potencial aumento da demanda interna e o aumento das exportações seria razoável esperar que o setor se desenvolvesse, mantendo a importante taxa de crescimento apresentada no período de 2003 a 2009; entretanto, os dados apresentados na Figura 4 e na Figura 5 mostram que o setor parece estar enfrentando uma crise. Essas figuras foram retiradas do site da União da Indústria de Cana-de-Açúcar, em sua página de multimídia.

A Figura 4 apresenta um retrato da década para a indústria da cana-de-açúcar (UNICA, 2011). Pode-se observar que no período decorrido entre as safras 2000/01 e 2008/09 houve um “crescimento vigoroso da produção”, seguido por um período de desaceleração, com aparente decréscimo entre as safras de 2010/11 e 2011/12.

Figura 4 – Retrato da década

Fonte: JANK (2011)

AValiação QUINZENAL DA SAFRA 2011/2012 DA REGIÃO CENTRO-SUL

Posição em 01/12/2011

Valores ACUMULADOS até 01/12/2011

Produtos	Safras		Variação (%)
	2010/11	2011/12	
Cana-de-açúcar ¹	544.123,4	488.460,1	↓ -10,23%
Açúcar ¹	33.033,2	30.987,6	↓ -6,19%
Etanol anidro ²	7.220,2	7.887,8	↑ 9,25%
Etanol hidratado ²	17.540,4	12.488,8	↓ -28,80%
Etanol total ²	24.760,6	20.376,6	↓ -17,71%
ATR ¹	76.697,4	67.251,2	↓ -12,32%
ATR/ tonelada de cana ³	140,96	137,68	↓ -2,32%
Mix (%) açúcar	45,20%	48,36%	↑
etanol	54,80%	51,64%	↓
Litros etanol/ tonelada de cana	45,51	41,72	↓ -8,33%
Kg açúcar/ tonelada de cana	60,71	63,44	↑ 4,50%

Fonte: UNICA. Nota: ¹ - mil toneladas; ² - milhões de litros; ³ - kg de ATR/ tonelada de cana; dados sujeitos a pequenos ajustes.

Figura 5 – Comparação das safras 2010/11 e 2011/12

Fonte: JANK (2011)

A Figura 5 apresenta uma comparação mais detalhada dos resultados obtidos entre as safras de 2010/11 e 2011/12. Pode-se observar uma queda de 10,23% no processamento de cana-de-açúcar; a produção de açúcar caiu 6,9%; e a produção de etanol hidratado caiu 28,8%.

A produção de etanol anidro subiu 9,25%; como esse subproduto é misturado à gasolina, o crescimento de sua produção pode ser interpretado como um indício de perda de competitividade do etanol perante a gasolina, ou seja, os proprietários de carros flex estão optando mais pelo uso da gasolina C ao abastecer seus carros, do que pelo etanol hidratado.

A Figura 6 apresenta a evolução dos custos e preços do etanol, comparando-os aos da gasolina ao consumidor. Pode-se observar que no período entre 2007 e 2010 o setor sofreu uma pressão grande, com os custos totais de produção sendo superiores

ao preço do etanol pago ao produtor⁴. É razoável concluir que custos totais de produção superiores aos preços de venda desestimulem o crescimento da capacidade de produção, com as consequências observadas nas últimas colheitas.

A Figura 7, obtida a partir de dados disponíveis no site do Centro de Pesquisas Avançadas em Economia Aplicada (CEPEA) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, parece confirmar as apreensões da ÚNICA; entretanto, esse não parece ser o único problema do setor.

Apesar de já ser um mercado maduro e estabelecido, o açúcar também parece sofrer problemas de oscilação de preços, como pode ser visto na Figura 8.

A ligação dos mercados do açúcar e do etanol no Brasil é muito forte tanto pelo compartilhamento da mesma matéria-prima quanto, na grande maioria das vezes, pelo compartilhamento da capacidade industrial de produção. Uma análise do mercado do etanol não ficaria completa sem que fosse considerado o mercado de açúcar, também sujeito a oscilações de preços e demanda como será visto posteriormente.

⁴ Este autor interpreta que os custos totais incluem os custos variáveis, fixos, todas as despesas (fixas e variáveis) e os custos econômicos.

O Proálcool foi praticamente desativado como programa de benefícios e incentivos fiscais do governo federal pela Lei nº 8723/1993, que apesar disso manteve a adição de etanol anidro à gasolina, na proporção de 22%. O etanol que havia atingido 50% do volume de combustíveis usados no país, caiu para 40% em 1994 (LEITE, 2007). Com a queda dos subsídios do governo a indústria da cana-de-açúcar e seus derivados passaram a seguir as leis de mercado, com seus pontos positivos e negativos.

Alguns aspectos são apontados como causadores das oscilações tanto dos preços, quanto da demanda no mercado de etanol, entre elas:

- Sazonalidade da produção (BRESSAN FILHO, 2010);
- Fatores climáticos (UNICA, 2011) e (BRESSAN FILHO, 2010);
- Limitações de financiamentos devido à crise de 2008 (UNICA, 2011);
- Falta de incentivos do governo (BRESSAN FILHO, 2010); e
- Poder de barganha dos produtores na cadeia de comercialização (BRESSAN FILHO, 2010).

Entretanto, pouco se fala das variações de preço e demanda do açúcar, que, como visto, é um mercado interligado ao do etanol, pelo menos no Brasil.

As oscilações de preço acarretam problemas. Apesar de hoje o desabastecimento de etanol não representar o mesmo que no passado, pois o usuário

pode simplesmente escolher a gasolina como combustível, tais oscilações trazem insegurança ao consumidor; exercem pressão inflacionária causada pelo aumento dos combustíveis; e fazem variar as importações e exportações⁵. Todos esses efeitos são considerados indesejáveis.

As oscilações nos dois mercados geram um ambiente de negócio com grandes incertezas no retorno dos investimentos nessa indústria; tais incertezas reduzem a atratividade para os investidores, uma vez que o risco operacional só pode ser compensado por taxas de retorno mais elevadas, o que não ocorre no momento.

Em capítulos posteriores será visto que vários trabalhos importantes apresentam aspectos diferentes da indústria; entretanto a análise da literatura mostra que há uma lacuna importante, qual seja a compreensão da indústria como um todo. Compreender a indústria da cana-de-açúcar e seus principais produtos - açúcar e etanol, seus efeitos de longo prazo, a relação econômica entre seus agentes, os impactos no uso da terra e na produção de alimentos, entre outros, é tarefa que ainda não foi abordada em um trabalho que procurasse integrar o entendimento dos especialistas sobre o assunto.

Uma pesquisa que desenvolva um modelo que englobe todos os aspectos citados parece suplantiar as possibilidades impostas a um único doutoramento; desta forma esta pesquisa de doutorado vai focar a indústria da cana-de-açúcar sob os aspectos microeconômicos, por meio de um modelo de simulação utilizando a Dinâmica de Sistemas, método desenvolvido pelo Prof. Jay W. Forrester na segunda metade da década de 1950 nos EUA, e até hoje pouco difundido no Brasil.

Pelas razões acima, a pergunta de pesquisa deste trabalho é: porque a indústria da cana-de-açúcar e seus principais subprodutos – açúcar e etanol combustível – sofre tantas e tão severas oscilações de preço e disponibilidade?

1.4 Relevância e contribuição

No ano de 2008, o setor energético da cana-de-açúcar, etanol mais a cogeração de bagaço de cana, respondeu por um valor equivalente a 28,15 bilhões de

⁵ Reportagem publicada no Estadão On Line no dia 16 de maio de 2011, relata a importação de 150 milhões de litros de etanol pelo Brasil, com demora na entrega de 30 dias, e possível variação nos preços de importação. Endereço eletrônico: <http://www.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-importa-etanol-com-diminuicao-da-oferta,692870,0.htm>

dólares americanos, correspondendo a aproximadamente 2% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, o equivalente ao PIB do Uruguai (NEVES e CONEJERO, 2010).

Além de sua relevância para o PIB, essa indústria é de grande importância estratégica, como ficou provado no passado pela substituição da gasolina por etanol combustível, como resposta mitigadora às crises do petróleo da década de 1970. Embora a posição estratégica atual do Brasil com relação à dependência do petróleo seja muito diferente do que ocorria na década de 1970⁶, não se pode descartar a importância do combustível alternativo, com tecnologia totalmente nacional.

O etanol também tem importância ambiental, uma vez que reduz as emissões de CO₂ na atmosfera, contribuindo para o decréscimo das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (GOLDEMBERG e LUCON, 2008) e (MACEDO, 1992).

A indústria da cana-de-açúcar apresenta grande complexidade, como será discutido posteriormente, e o entendimento integrado dessa indústria é um assunto de relativa dificuldade. Alguns autores privilegiam os aspectos de produtividade; outros seus aspectos econômicos, mais concentrados em assuntos específicos, como por exemplo: formação de preços. Outros ainda tratam das tecnologias envolvidas como o carro a etanol e a tecnologia flexfuel, que fez o etanol reviver a partir de 2003.

Para permitir que esse modelo que integre as diversas partes dessa complexa indústria seja iniciado foi necessário eleger-se um assunto de interesse, quais sejam as fortes oscilações apresentadas tanto pelo preço, quanto pela disponibilidade de etanol no Brasil ao longo dos anos. Essas oscilações são tão danosas que, apenas para exemplificar, em um desses períodos de escassez, ocorrido em 1989, a confiança no carro movido a etanol ficou tão abalada que ele praticamente sumiu do mercado, após alguns anos.

Por essas razões, entende-se que esta pesquisa contribuirá com o conhecimento existente por oferecer um modelo que permite discutir, de maneira ampla, várias questões da indústria da cana-de-açúcar, sem perder de vista as consequências, muitas vezes distantes no tempo e no espaço, que determinadas políticas possam causar em seus setores. O modelo também permitirá o estudo de

⁶ Em 2006 o Brasil atingiu a auto-suficiência de petróleo, pois as exportações suplantaram as importações dessa commodity (Petrobrás, S.A., 2011)

políticas, que possam levar a indústria a ter um comportamento melhor, reduzindo suas oscilações.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Principal

Como em trabalhos similares envolvendo a Dinâmica de Sistemas, o principal objetivo dessa tese é contribuir para a compreensão da estrutura da indústria da cana-de-açúcar e dos seus principais derivados: o açúcar e o etanol, sob uma perspectiva endógena, ou seja, que destaque as ações dos agentes internos à indústria da cana-de-açúcar como causadores do seu comportamento observado.

1.5.2 Objetivos Secundários

Para que seja possível atingir o objetivo principal, há a necessidade de se atingir alguns objetivos secundários, listados a seguir:

- Entender a estrutura de custos da indústria;
- Entender a estrutura produtiva, de maneira simplificada;
- Entender a questão da produtividade, e como ela afeta a indústria como um todo;
- Entender os principais atrasos de informação, decisão e ação dentro da indústria;
- Entender o comportamento da oferta e da demanda, no âmbito da indústria;
- Entender as estruturas de decisão relativa à expansão da capacidade industrial;
- Entender a estrutura de decisão relativa à utilização da capacidade industrial;
- Entender a estrutura de decisão da opção de se produzir etanol ou açúcar, no âmbito da indústria;
- Entender os efeitos que os níveis de estoques tem no preços dos produtos;
- Entender os efeitos que os preços dos produtos tem na demanda;

- Entender as pressões que a indústria sofre, a partir dos demais interessados em seus produtos, e resultados; e
- Contribuir para a divulgação da Dinâmica de Sistemas como um método que pode contribuir para a análise de sistemas complexos.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por oito capítulos, incluindo esta introdução. O segundo capítulo tratará da metodologia, a Dinâmica de Sistemas, e está dividido em três seções: a primeira delas apresentará a justificativa do método de pesquisa escolhido; a segunda seção fará uma introdução ao processo de criação de modelos em DS; a terceira seção apresentará alguns conceitos básicos de modelagem em Dinâmica de Sistemas.

O terceiro capítulo tratará da indústria da cana-de-açúcar, e está dividido em seis seções: a primeira fará uma introdução à cana-de-açúcar; a segunda seção abordará o processo agrícola; a terceira seção apresentará de forma sucinta processo industrial da cana-de-açúcar; a quarta seção tratará dos aspectos ambientais, que embora não seja o foco deste trabalho é uma questão de grande importância e vital para o crescimento do setor; e a quinta seção tratará de aspectos econômicos específicos da indústria da cana.

O capítulo quatro apresentará quatro modelos relacionados ao assunto: o primeiro a tese de Campos (2010), que trata da previsão de preços do açúcar e do etanol; o segundo modelo é o “Teia de Aranha”, tradicional na Teoria Econômica; o terceiro modelo é uma visão do Pensamento Sistêmico da “Tragédia dos Comuns”; e o quarto é a proposta de Sterman (2000) para o modelo geral do mercado de commodities.

O quinto capítulo tratará da Hipótese Dinâmica. Sua primeira seção discutirá as fronteiras do sistema, onde são apresentadas as variáveis endógenas, exógenas e as excluídas; a segunda seção apresentará o Diagrama de Blocos do Sistema, para permitir uma visualização do modelo em alto nível; e a terceira seção apresentará o Diagrama Causal, que apresenta uma hipótese com foco endógeno para explicar o comportamento observado da indústria.

O sexto capítulo apresentará três das cinco fases do desenvolvimento de um modelo de Dinâmica de Sistemas. A primeira seção apresentará o modelo de simulação, por meio dos Diagramas de Forrester e das equações do modelo; a segunda seção apresentará os resultados obtidos pelo modelo, comparando seu comportamento com os dados obtidos de diversas fontes; e a terceira seção apresentará os testes realizados com o modelo, com o propósito de se verificar sua correção, permitindo ter confiabilidade nos seus resultados.

O sétimo capítulo apresenta a formulação e avaliação de uma política de incentivo à produção de etanol e discute os resultados obtidos comparando tais resultados com os obtidos pela estrutura básica do modelo.

O oitavo capítulo apresenta as conclusões desta tese à luz dos resultados obtidos e apresenta sugestões de trabalhos futuros, que englobam; aperfeiçoamentos, desagregação de algumas variáveis, e oportunidades de expansão dessa pesquisa.

2 Metodologia

Este capítulo trata da metodologia usada para o desenvolvimento do modelo dinâmico da indústria sucroalcooleira do Brasil. O capítulo se inicia tecendo considerações sobre a escolha da Dinâmica de Sistemas como método de pesquisa; prossegue descrevendo o processo de criação de modelos em DS; a terceira seção apresenta de maneira sucinta alguns conceitos básicos de modelagem em DS.

2.1 Justificativa do método de pesquisa adotado

2.1.1 Como os problemas são abordados

Keeney (2004) apresenta uma árvore que descreve a forma como as decisões são tratadas; uma adaptação dessa árvore é apresentada na Figura 9. Segundo Keeney (1992), uma decisão se refere a um problema ou oportunidade vislumbrada pelo agente responsável pela tomada de decisão.

A Figura 9 permite observar que de dez mil decisões apenas mil merecem reflexão; dessas apenas a metade recebe atenção. Das quinhentas decisões que recebem atenção, apenas quarenta são submetidas a processos sistemáticos de tomada de decisão, trinta por meio de processos qualitativos, e dez por meio de processos quantitativos (KEENEY, 2004).

Um bom método de pesquisa para a solução de um problema cobriria os seguintes aspectos: melhorar o entendimento do problema, o que representa 25% dos casos realmente analisados; auxiliar na criação de alternativas; deixar mais claros os objetivos a serem atingidos; e dar um tratamento quantitativo adequado às soluções de compromisso, à tolerância ao risco, às decisões ligadas, e às incertezas que envolvem o problema.

Figura 9 – Como as decisões são tomadas

Fonte: Adaptada de Keeney (2004)

2.1.2 Definição de modelo

Há várias definições clássicas de modelo. Ferreira (2004) apresenta dezoito definições de modelo, das quais três são adequadas ao propósito deste trabalho:

- Conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procuram explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema;

- Representação simplificada e abstrata de fenômeno ou situação concreta, e que serve de referência para a observação, estudo ou análise.
- Modelo segundo a concepção do item acima, baseado em uma descrição formal de objetos, relações e processos, que permite pela variação de parâmetros simular os efeitos de mudanças de fenômeno que representa.

Fontes Torres (2006) define um modelo como “uma representação simplificada de certa realidade, visando uma finalidade específica (sic)”.

Ehrlich e Moraes (2005) declaram que modelo é algo que se usa para enxergar o mundo nos quais são salientados os aspectos julgados mais relevantes, tentando decodificar seus relacionamentos.

A definição de modelo que será usada nessa tese é:

Um modelo de Dinâmica de Sistemas é uma representação abstrata e simplificada da nossa percepção da realidade, com propósito específico de explicar, dentro de teorias científicas aceitas, o comportamento de um sistema real e contribuir para a solução de um problema específico apresentado por esse sistema.

2.1.3 Porque modelar

Todos os seres humanos usam modelos para tratar seus problemas (EHRlich e MORAES, 2005); (FONTES TORRES, 2006); (FORRESTER, 1971); (SENGE, 2005); e (STERMAN, 2000). Os modelos mentais são muito fortes em representar a realidade e é de fato uma ferramenta usada pelos seres humanos diante da complexidade do mundo. O fato é que os modelos mentais têm uma série de características que os tornam ineficientes na condução de assuntos complexos. Forrester (1971) descreve uma série de características que são indesejáveis:

Mental models are fuzzy, incomplete, and imprecisely stated. Furthermore, within a single individual, mental models change with time, even during the flow of a single conversation. The human mind assembles a few relationships to fit the context of a discussion. As debate shifts, so do the mental models. Even when only a single topic is being discussed, each participant in a conversation employs a different mental model to interpret the subject. Fundamental assumptions differ but are never brought into the open. Goals are different but left unstated. It is little wonder that compromise takes so long. And even when consensus is reached, the underlying assumptions may be fallacies that lead to laws and programs that fail.

Mesmo quando os modelos mentais se revelam corretos e consistentes, eles não estão adaptados a inferir corretamente o comportamento de um sistema complexo. Sobre esse assunto prossegue Forrester (1971):

The human mind is not adapted to understanding correctly the consequences implied by a mental model. A mental model may be correct in structure and assumptions but, even so, the human mind--either individually or as a group consensus--is apt to draw the wrong implications for the future. Inability of the human mind to use its own mental models becomes clear when a computer model is constructed to reproduce the assumptions contained in a person's mental model. The computer model is refined until it fully agrees with the perceptions of a particular person or group. Then, usually, the system that has been described does not act the way the people anticipated. There are internal contradictions in mental models between assumed structure and assumed future consequences. Ordinarily assumptions about structure and internal governing policies are more nearly correct than are the assumptions about implied behavior.

Ainda Segundo Forrester (1971) os modelos de DS são explícitos sobre suas hipóteses e como elas interagem; aspectos descritos em palavras podem ser incluídos em um modelo; forçam a reflexão e a clareza de ideias; exigem que hipóteses ocultas e pouco claras sejam questionadas e debatidas. Os modelos computacionais são convenientes para estabelecer o comportamento de um sistema complexo, fazendo-o com precisão, e as hipóteses assumidas determinarão o comportamento do modelo.

De maneira similar, Sterman (2001) afirma que em teoria os modelos computacionais oferecem, em vários aspectos, uma análise mais segura que os modelos mentais: os modelos computacionais são explícitos e suas premissas são estabelecidas, documentadas e abertas a todos que a eles tem acesso, podendo ser questionadas; simulam consequências lógicas das premissas dos modeladores; são suficientemente completos, e conseguem relacionar vários fatores concomitantemente. Ainda segundo Sterman, “um modelo computacional que de fato tenha essas características tem poderosas vantagens sobre um modelo mental” (Sterman, 2001).

2.1.4 Os eixos da complexidade

Aspecto relevante na escolha da melhor ferramenta de análise de um problema é o tipo de complexidade que esse problema apresenta. Uma forma de se visualizar essa complexidade pode ser vista na Figura 10, onde a complexidade de um

sistema é representada por três eixos: o nível de incerteza; o número de variáveis; e sua característica dinâmica (SANTOS, 2011).

O primeiro eixo considera o número de variáveis; parece razoável supor que um sistema com muitas variáveis relevantes seja mais difícil de analisar do que um com poucas variáveis. O segundo eixo é o nível de incerteza, que pode ser entendido como a quantidade de fatores que estão fora do controle do agente responsável pela decisão; um problema com elevado nível de incerteza tende a ser mais complexo que um similar com baixo nível. O terceiro eixo expressa a complexidade dinâmica, entendida como o grau em que as variáveis afetam as demais por meio de cadeias de relações de causa e efeito, fechando malhas de realimentação.

Figura 10 – Eixos da complexidade

Fonte: Santos (2011)

Segundo Santos (2011), a Dinâmica de Sistemas é uma abordagem adequada para a modelagem e compreensão de sistemas com elevada complexidade dinâmica.

2.1.5 Características dos sistemas complexos

Segundo Sterman (2001), o comportamento emergente surge porque os sistemas complexos têm as seguintes características:

- Mudam constantemente: mesmo que aparentem estar em regime estático, as modificações no horizonte de tempo considerado podem mostrar alterações significativas nas variáveis de estado de um sistema.

- Apresentam forte acoplamento entre seus componentes: os diversos atores de um sistema complexo interagem entre si e com a natureza.
- São regidos por várias malhas de realimentação: devido ao acoplamento entre os diversos agentes, pode ocorrer que são fechadas malhas de realimentação, onde os efeitos de uma ação de determinado agente retorna até ele, por meio de uma intrincada cadeia de realimentação, nem sempre simples de ser identificada.
- Apresentam relações não-lineares entre os agentes: as relações entre as causas e seus efeitos raramente são constantes, seja por limitações físicas dos sistemas, seja devido a aspectos psicológicos dos seus atores.
- Depende do seu passado⁷: a trajetória pregressa no espaço de estados de um sistema complexo limita as trajetórias que podem ser percorridas no futuro; a existência das estruturas de níveis e vazões e de longos atrasos muitas vezes fazem com que ações tomadas no passado sejam irreversíveis; além da existência dos atratores e pontos de bifurcação, características comuns a sistemas não lineares.
- Autoorganização: o comportamento de um sistema complexo emergente naturalmente, resulta da sua estrutura interna. Por vezes, pequenas perturbações aleatórias geram resultados *surpreendentes*; *exemplos disso são as oscilações em certos mercados de commodities*, causadas pela própria estrutura do sistema.
- Adaptativos: as capacidades e as regras de decisão dos agentes se alteram ao longo do tempo. A evolução leva a criação de novos agentes, enquanto outros desaparecem, mudando a estrutura do sistema.
- Soluções de compromisso: as diferentes cadeias de realimentação passam por distintos agentes do sistema, sendo submetidas a variados atrasos. Essas diferenças geram efeitos de curto prazo diferentes dos efeitos de longo prazo.

⁷ A dependência que um sistema tem do seu estado inicial, as não linearidades e a existências dos *atratores* podem levar o sistema a ter comportamentos radicalmente diferentes partindo de condições iniciais muito próximas. Para manter a coerência com o texto da referência, optou-se por deixar essa característica e a anterior separadas.

Muitas vezes esses efeitos são contraditórios, gerando o conceito de “*best before worse*”;

- Comportamento não-intuitivo: o ser humano tem a tendência de procurar as causas e os efeitos em regiões próximas; como nos sistemas complexos muitas vezes as causas e seus efeitos estão distantes no tempo e no espaço, o comportamento resultante do sistema podem surpreender a quem procura entendê-los.
- Resistência às políticas adotadas: sistemas complexos tem uma intrincada cadeia de causa e efeito que tendem a reagir às intervenções externas; como resultado, falham muitas soluções que parecem óbvias, ou até agravam a situação. Os pontos de alavancagem desses sistemas podem não ser claramente identificados.

2.1.6 Classificação dos modelos

Antes de iniciar a discussão dos modelos computacionais, será apresentada uma análise feita por Forrester (1961) sobre os modelos e seus usos; a Figura 11 apresenta sua classificação. Ela se inicia por modelos abstratos ou físicos, sendo que os físicos estão fora de nossa área de interesse. Os modelos abstratos são os desenvolvidos por meio de conceitos; uma boa ferramenta para tal fim é a matemática. Os modelos abstratos podem ser divididos em dinâmicos ou estáticos. Os dinâmicos são os que mostram o comportamento do sistema variando ao longo do tempo, enquanto os estáticos se apresentam sem mudanças da situação.

Os modelos dinâmicos podem ser lineares ou não lineares, sendo que a grande maioria dos sistemas reais é não linear. Diante desse fato fica a dúvida do motivo do uso tão intenso de modelos lineares no tratamento de sistemas, mesmo de sistemas não lineares (STOGRATZ, 2001).

Szajnbok (2012) entende que o uso de sistemas lineares é útil, mesmo que seja como uma primeira aproximação do estudo de um sistema, o que inclui obtenção de estimativas e compreensão do comportamento, mesmo que seja apenas para servir de base a um estudo posterior usando-se técnicas não lineares e simulação.

A resposta a essa indagação é a possibilidade de tratamento matemático que pode ser dada aos sistemas lineares. Por exemplo, sistemas não lineares dificilmente apresentam a possibilidade de uma solução geral para suas equações diferenciais, e mesmo se for conhecida tal solução a obtenção da resposta para cada problema particular pode ser tanto ou mais trabalhosa do que sua pesquisa por outros métodos. Um exemplo importante é o uso da superposição na solução de problemas lineares, que não é válida em sistemas não lineares. Análises usando sistemas lineares já se mostraram poderosas para certos tipos de problemas, mas se mostram pobres em problemas envolvendo sistemas complexos, caso de sistemas sociais e econômicos, entre outros (STOGRATZ, 2001).

2.1.7 Modelos de simulação

O propósito de um modelo de simulação é representar a percepção do sistema real até um nível de detalhe adequado, onde o modelo imite o comportamento do sistema real, permitindo que este seja analisado e melhorado. (STERMAN, 1991).

Um propósito também muito difundido é o que o modelo tenta replicar em laboratório a percepção que se tem de um sistema real, conhecido como um micro

mundo. Por meio dessa criação de laboratório, é possível conduzir experimentos impossíveis de serem realizados no mundo real por razões de ordem ética, gastos excessivos, e várias outras (MORECROFT, 1988).

Há várias técnicas de simulação: modelagem estocástica, dinâmica de sistemas, simulação discreta e teoria dos jogos, além dos métodos numéricos e do emprego de modelos reduzidos. Apesar das diferenças entre elas, todas abordam os problemas de maneira similar; representam não só a estrutura física do sistema, mas devem retratar o comportamento dos atores nele incluídos, ou seja, como eles tomam suas decisões na vida real; ou seja, as decisões dos atores fazem parte do modelo.

O componente comportamental é incluído no modelo por meio de regras de decisão determinadas em entrevistas ou observação direta dos procedimentos reais dos atores do sistema. Assim como na vida real, as informações disponíveis aos tomadores de decisão dependem do estado do sistema (STERMAN, 1991). Um requisito essencial de um modelo é que somente as informações disponíveis no mundo real sejam utilizadas para a tomada de decisão no âmbito do modelo (STERMAN, 2000).

O comportamento do modelo será o resultado das decisões esperadas pelos atores do sistema. As hipóteses assumidas pelo modelador devem ter sua validade verificada, comparando-se os resultados do modelo com o comportamento do sistema no mundo real.

Normalmente, a representação da parte física de um sistema não é um fator de grande complexidade, podendo-se detalhar a estrutura física no nível de detalhe necessário ao modelo. Modelos de simulação também podem incorporar não linearidades, efeitos das realimentações, e a dinâmica uma vez que tem uma estrutura mais flexível que os modelos econométricos e de otimização (STERMAN, 1991).

Três aspectos do processo de modelagem exigem grande atenção e se desconsideradas podem levar a resultados indesejáveis: a descrição das regras de decisão; a quantificação das variáveis não tangíveis; e a escolha dos limites do modelo.

Regras de decisão. As regras de decisão devem representar com exatidão como os diversos atores do sistema tomam suas decisões, mesmo que tais decisões

sejam subótimas⁸. O modelo deve reagir a alguma mudança da mesma forma que os atores do sistema o fariam; entretanto, tal fato só ocorrerá se as regras de decisão forem muito bem definidas.

Por essa razão o modelo deve refletir as reais estratégias de decisão utilizadas pelas pessoas, incluindo seus erros e limitações. A dificuldade está no fato que frequentemente a descoberta das regras de decisão é difícil, uma vez que devem ser entendidas no campo onde ocorrem, ou seja, na sala de reuniões, no chão de fábrica, nas lojas, etc. Desta forma, um bom modelador necessita sólida formação na área de decisão (STERMAN, 1991).

Variáveis intangíveis⁹. A maior parte dos dados não é tangível; ou seja, a maior parte do que se sabe sobre o mundo é descritivo, qualitativo e de difícil quantificação; muitas vezes sequer foi registrado. Apesar disso, tal informação é crucial para o entendimento dos sistemas complexos. Alguns modeladores optam por limitar a descrição de um sistema às variáveis quantificáveis e registradas, argumentando que esse procedimento é mais científico do que estimar valores de parâmetros e relações para os quais não há dados disponíveis. Para Sterman a inclusão das variáveis intangíveis é importante por serem fundamentais na definição das regras de decisão; não se pode modelar uma decisão sem considerar variáveis de importância fundamental, tais como: desejos, qualidade do produto, reputação, expectativas, otimismo, além de outras. (STERMAN, 1991).

A inclusão de variáveis intangíveis é tema controverso. Pindyck e Rubinfeld (2004) tratam da construção de modelos com dados limitados. Destacam que um dos problemas dessa técnica, na qual incluem modelos de Dinâmica de Sistemas, é não permitir verificar se as relações individuais que compõe o modelo são razoáveis. Afirmam que:

“Como quem constrói o modelo é livre para escolher os coeficientes em lugar de ajustá-los aos dados, é possível ajustar os coeficientes até que o modelo consiga reproduzir os dados históricos. Nesse caso o modelo poderá aparentemente simular bem, ainda que as relações incluídas nele sejam em grande medida sem validade, de modo que o próprio modelo é inválido em

⁸ Ao contrário da teoria econômica neo-clássica, a dinâmica de sistemas não considera que todos os atores procuram otimizar seus ganhos, estão de posse de todas as informações necessárias para tomar a melhor decisão, e agem sempre de maneira racional.

⁹ Adota-se aqui o termo *variáveis intangíveis* como tradução de *soft variables*.

relação a suas implicações para previsão ou formulação de políticas” (PINDYCK e RUBINFELD, 2004).

Os dois autores concluem afirmando:

“Qualquer um que construiu um modelo econométrico sabe: o ajustamento de relações hipotéticas aos dados proporciona um controle importante dos construtores de modelos, forçando-os a testar estatisticamente cada uma das relações originalmente especificadas. Esse controle não existe quando se modela sem dados, de modo que essa abordagem só deve ser usada com grande cautela” (PINDYCK e RUBINFELD, 2004).

Forrester tem outra visão da questão; ele entende que as informações que devem ser utilizadas para a formulação de um modelo estão disponíveis em várias fontes de dados: modelos mentais; documentos escritos; e bases de dados numéricas. Uma visão gráfica dessas fontes de dados é apresentada na Figura 12 (FORRESTER, 1991).

Por inspeção da figura percebe-se que há muitas informações que não fazem parte das bases de dados, nem das instruções escritas, que são informações importantes, pois retratam a história dos sistemas, bem como as ações tomadas e suas motivações. Para concluir a visão de Forrester sobre a inclusão de variáveis intangíveis nos modelos, segue a afirmação em Forrester (1980).

“Leaving such variables out of models just because of a lack of hard numerical data is certainly less ‘scientific’ than including them and making reasonable estimates of their values. Ignoring a relationship implies that it has a value of zero—probably the only value known to be wrong!” (FORRESTER, 1980).

Definição das fronteiras do modelo. A definição de uma fronteira adequada para o modelo é outro desafio para os modeladores. Decidir quais fatores serão mantidos como exógenos e quais serão incluídos no modelo não é trivial. Uma consequência dessa decisão é quais malhas de realimentação deverão ser incluídas no modelo, o que também não é trivial. Um dos pontos fortes dos modelos de DS é sua capacidade de incorporar malhas de realimentação que reproduzam efeitos distantes no tempo e no espaço, e suas respostas às políticas sugeridas (STERMAN, 1991).

Na prática, muitos modelos de simulação têm limites muito restritos, ignorando fatores externos à área de conhecimento do modelador ou fora da área de interesse do patrocinador do modelo, e assim excluem efeitos de realimentação importantes. Como regra geral, deve-se entender que modelos com fronteiras amplas que incluem malhas de realimentação importantes, são preferíveis a modelos com grande quantidade de detalhes especificados sobre componentes individuais (STERMAN, 1991).

2.1.8 A escolha da Dinâmica de Sistemas como método de condução do trabalho

Foi afirmado na seção 1.5.1 que o principal objetivo dessa tese é contribuir para a compreensão da estrutura da indústria da cana-de-açúcar e dos seus principais derivados: o açúcar e o etanol, sob uma perspectiva endógena, ou seja, que destaque como causadores do seu comportamento observado as ações dos agentes internos à indústria.

Como se verifica no Capítulo 1 há várias visões das questões ligadas a essa indústria. Pode-se também inferir que o sistema contém elevado número de variáveis, muitas das informações sobre a indústria não estão disponíveis, e o sistema parece

possuir várias malhas de realimentação geradoras de complexidade dinâmica. Tais características apontam para o fato do sistema em estudo ser um sistema complexo.

Embora haja uma razoável base de dados e documentos escritos sobre a indústria canavieira, tal conjunto está longe de conter as informações necessárias para o modelo. Além disso, nem sempre se obtém dados confiáveis, devido às limitações de informações estatísticas.

Pelas razões expostas, e sendo consistente com as conclusões de Santos (2011), a opção de método para a simulação será a Dinâmica de Sistemas, que ao longo do tempo mostra ser uma ferramenta adequada para a modelagem de sistemas complexos, caso da indústria da cana-de-açúcar.

2.2 Processo de criação de modelos em Dinâmica de Sistemas

Segundo Sterman (2000), dois fatores parecem influenciar de maneira fundamental o sucesso de uma modelo de Dinâmica de Sistemas: o primeiro é a competência e experiência do modelador; o segundo é o rigor adotado no processo de desenvolvimento do modelo.

Há diversas propostas interessantes de processos de desenvolvimento de modelos em DS, entre elas pode-se citar Sterman (2000) Roberts et al (1983); e Martin Garcia (2006). Por questões de objetividade e foco, será apresentada somente a proposta de Sterman, que é adotada no desenvolvimento do trabalho presente.

Sterman propõe a execução de um trabalho de Dinâmica de Sistemas em cinco etapas, revistas a cada passo do projeto. Tais passos são:

- Articulação do problema;
- Formulação da hipótese dinâmica;
- Desenvolvimento do modelo de simulação;
- Testes do modelo de simulação; e
- Formulação e avaliação de políticas.

Não se deve imaginar que a sequencia acima propõe um processo linear e bem encadeado, pois isso não corresponde à realidade. Um modelo de DS é desenvolvido em processo fortemente iterativo entre as fases, com várias revisões e mudanças. Sterman (2000) afirma que “o processo de modelagem passa por vários

ciclos entre experimentos no mundo virtual do modelo e coleta de dados do mundo real”.

No trabalho desenvolvido nesta tese verificou-se que o processo possui grande número de interações. Um fato relevante que pode ser comum ao desenvolvimento de modelos desse tipo é o fato que os ciclos entre os experimentos no mundo virtual do modelo e a coleta de dados podem ser interrompidos pela indisponibilidade, inexistência dos dados necessários, informações oriundas de especialistas, ou mesmo literatura que cubra o assunto com adequado nível de detalhe. Isso exige do modelista a assunção de hipóteses plausíveis, como foi feito nesta tese.

Além das dificuldades das interações entre a experiência no mundo virtual e no mundo real, a compreensão do modelista sobre o problema de estudo se altera ao longo de todo o processo, forçando-o a rever o trabalho já executado. Essa afirmação é reforçada por Sterman (2000) que afirma: “o resultado de cada passo pode gerar insights que levem a revisões de conceitos, achados e conclusões feitas em fases anteriores”.

A Figura 13 apresenta uma visualização das interações do processo de modelagem, muitas vezes, efeito do aprendizado obtido ao longo dos processos. Os ciclos sequenciais, que representam o caminho linear, são representados pelas linhas com setas, enquanto as interações, que representam a sequência não linear, são representadas por segmentos retos.

Figura 13 – Uma Representação do Processo de Modelagem

Fonte: Sterman (2000)

2.2.1 Articulação do problema

Forrester, em seu livro seminal *Industrial Dynamics* (FORRESTER, 1961), apresentou o seguinte texto sobre os objetivos do processo de modelagem, que ele considera como primeiro passo no desenvolvimento de um modelo:

First come the goals and the questions to be answered. To be productive, laboratory design must be addressed to an important goal. The questions guide the work that follows. The problem must be worthy and significant. This seems obvious, but too often management research and academic thesis studies have been addressed to questions whose answers could have little significance to the improvement of management. The important problems are often no harder to subdue than the trivial ones; the results are more rewarding.

Uma reflexão sobre o texto acima permite concluir a importância da definição do problema. Um problema de pouca importância ou mal definido é garantia de insucesso do trabalho. Pode-se dizer que escolher o problema errado, significa estudar

e se esforçar sobre o objetivo errado, o que resulta em um trabalho sem valor. Esta visão de Forrester corresponde à afirmação de Sterman quando este afirma: “*The most important step in modeling is problem articulation*” (STERMAN, 2000).

Outra questão fundamental é o motivo pelo qual se deve modelar um problema e não uma percepção da realidade; ao se modelar a percepção da realidade qual seria o critério para simplificar uma parte não relevante da questão? Se não se tem o problema, todas as partes são igualmente importantes e não devem ser excluídas do modelo. A partir da modelagem da realidade, o modelo seria tão complexo, que seria de pouca ou nenhuma utilidade (STERMAN, 2000).

Enfatizada a importância de se modelar um problema, passa-se à fase de articulação que tem o objetivo principal de caracterizar claramente o problema a ser estudado. Essa fase define a razão, o sentido e o escopo do esforço de modelagem. Segundo Sterman (2000) a arte de modelar é simplificar, e qualquer simplificação só poderá ser feita de forma consistente se for coerente com o propósito do problema a ser estudado.

Sterman (2000) afirma:

Models must be clearly focused on a purpose. Never build a model of a system. Models are simplifications; without a clear purpose, you have no basis for excluding anything from your model and your effort is doomed to failure. Therefore the most important step in the modeling process is working with your client to articulate the problem-the real problem, not the symptoms of the problem, the latest crisis, or the most recent fad. Of course, as the modeling process leads you to deeper insight, your definition and statement of the problem may change. Indeed, such radical reframing is often the most important outcome of modeling.

Para atingir o desejado objetivo, a fase de articulação engloba quatro passos:

- Seleção do tema;
- Variáveis que devem ser consideradas;
- Definição do horizonte do tempo; e
- Definição dos modos de referência.

2.2.1.1 Seleção do tema

Nesta etapa duas questões essenciais devem ser respondidas de maneira muito clara:

- Qual é o problema?
- Porque isso é um problema?

A resposta à primeira pergunta define o que deve ser estudado, e a resposta à segunda deve esclarecer porque o problema a ser estudado é importante.

2.2.1.2 Variáveis que devem ser consideradas

Essa etapa é um desdobramento da primeira; definido o propósito do modelo, é necessário refletir sobre quais são os elementos relevantes para o estudo do problema. Uma forma de se atingir esse objetivo é responder a duas questões:

- Quais são as variáveis chave; e
- Quais os conceitos que devem ser incluídos no modelo.

Variáveis chave são as que descrevem o comportamento indesejado do sistema no transcurso do tempo; os conceitos chave são os que fundamentam teoricamente tal comportamento, além de se considerar também as práticas empresariais adotadas.

2.2.1.3 Horizonte de Tempo

Um comportamento problemático pode se desenvolver desde há longo tempo no passado e se prolonga por um longo tempo no futuro. Mesmo que ações tomadas no curto prazo possam atenuar ou mesmo resolver o problema, elas podem gerar efeitos não previstos no longo prazo. O Horizonte de Tempo é o período decorrido entre o início e o final de uma simulação; segundo Sterman (2000), ele deve se estender no passado de forma a capturar o surgimento do problema e suas origens, e deve se estender no futuro até que os atrasos dos efeitos das potenciais políticas sugeridas no trabalho possam ser observados. A escolha de um Horizonte de Tempo adequado é uma tarefa das mais importantes em uma simulação de DS.

2.2.1.4 Modo de Referência.

Sempre que possível devem-se levantar dados sobre o comportamento observado das variáveis que descrevem o problema ao longo do tempo em estudo. O comportamento deve ser apresentado e servirá como guia para todo o processo de simulação.

Quando os dados acima não estiverem disponíveis, o comportamento do modelo mental do grupo responsável pela definição do problema deve ser expresso por meio de um gráfico. Esse gráfico deve ser exaustivamente auditado para garantir sua consistência e coerência.

Sterman (2000) apresenta uma série de regras que devem ser seguidas na definição dos Modos de Referência:

- O Horizonte de Tempo deve ser definido de maneira explícita;
- Deve-se usar vários gráficos de forma a não tornar a apresentação confusa;
- O eixo do tempo deve ser alinhado em todos os gráficos;
- Variáveis com as mesmas unidades devem ser plotadas nos mesmos eixos;
- Quando dados numéricos não estiverem disponíveis, o Modo de Referência da variável deve ser estimado, a partir da descrição escrita do seu comportamento e de outras informações disponíveis;
- Variáveis importantes não devem ser omitidas por falta de dados. Se a variável se mostrar de grande importância no processo, esforço em sua obtenção pode ser feito posteriormente;
- Deve haver um fundamento nos dados para cada característica do Modo de Referência, seja ele numérico ou baseado em sua descrição.
- As magnitudes e os instantes de ocorrência dos eventos devem ser consistentes com o que se conhece do sistema; e
- Os gráficos devem ser consistentes com qualquer estrutura de estoques e fluxos que relacionem variáveis.

2.2.2 Formulação da Hipótese Dinâmica

Um modelo de Dinâmica de Sistemas procura explicar as causas do comportamento indesejável de um sistema (o problema) por meio de uma perspectiva endógena. Um passo para atingir esse propósito é a elaboração de uma hipótese, que em um modelo de DS tem o nome de Hipótese Dinâmica. Tal hipótese deve explicar o comportamento problemático como fruto da estrutura interna (endógena) do sistema.

A formulação dessa Hipótese engloba três atividades:

- Geração de uma hipótese inicial baseada nas teorias correntes;
- Formulação da hipótese dinâmica com foco endógeno; e
- Mapeamento de variáveis do sistema com a elaboração dos seguintes mapas ou diagramas:
 - a. Mapas de limites do modelo;
 - b. Diagramas de subsistemas; e
 - c. Diagrama Causal.

2.2.3 Formulação de um Modelo de Simulação

Esta fase engloba três atividades:

- Especificação da estrutura do modelo, incluindo os fluxos materiais e de informação, e a especificação das estruturas de decisão;
- Estimação dos parâmetros, relações comportamentais, e condições iniciais; e
- Testes para a verificação da adequabilidade do modelo ao propósito e aos limites pré-definidos.

2.2.4 Testes do modelo

Um aspecto importante para se crer em um modelo é que ele seja exaustivamente testado. Sterman (2000) apresenta uma extensa série de testes a que um modelo deve ser submetido para que as pessoas que venham a usá-lo tenham confiança em seus resultados, e as que pretendem auditá-lo possam fazê-lo e reproduzir seus resultados.

Modelos devem estimular a reflexão e a compreensão do problema de estudo, e não defender as ideias do modelador. Para garantir esse objetivo, Sterman

(2000) sugere como primeiro teste verificar se ele estimula realmente a reflexão. A Tabela 1 apresenta as diferenças principais entre os modelos Defensivos e os Reflexivos¹⁰.

Tabela 1 – Modelos Defensivos versus Reflexivos

Modelos Defensivos	Modelos Reflexivos
Provam um ponto de vista	Promovem discussão.
Ocultam suas hipóteses	Apresentam suas hipóteses.
Usa os dados de maneira seletiva	Estimula o mais amplo espectro de testes empíricos.
Da sustentação a preconceitos e às soluções pré-selecionadas, encobrindo-as.	Desafia preconceitos e sustenta múltiplos pontos de vista, além de envolver amplamente a comunidade.
Destaca a competência do modelista.	Promove o desenvolvimento das pessoas envolvidas e que utilizarão o modelo.

Fonte: Sterman (2000)

Vários outros testes são sugeridos por Sterman, como por exemplo, os listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Testes em modelos de Dinâmica de Sistemas

Teste	Propósito (Garantir que ...)
Adequabilidade dos limites do modelo	<ul style="list-style-type: none"> Os conceitos relevantes foram tornados endógenos ao modelo; O comportamento do modelo não se altera de maneira significativa quando os limites do modelo são alterados; e As políticas não se alterem quando os limites do modelo são alterados.
Avaliação da Estrutura	<ul style="list-style-type: none"> A estrutura do modelo seja consistente com o conhecimento descritivo do sistema.
Consistência dimensional	<ul style="list-style-type: none"> Cada equação é dimensionalmente consistente, sem o uso de parâmetros sem significado no mundo real.
Avaliação dos Parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> Os valores dos parâmetros seja consistente com o conhecimento quantitativo ou qualitativo do sistema; e Todos os parâmetros tenham significado no mundo real.

¹⁰

Tradução livre dos termos *Protective* e *Reflexive*, respectivamente.

Teste	Propósito (Garantir que ...)
Condições extremas	<ul style="list-style-type: none"> • Cada equação tenha significado mesmo quando seus valores de entrada assumam valores extremos; e • Que o modelo responda de forma plausível a políticas extremas, choques e parâmetros limites.
Erro de integração	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados não sejam sensíveis as variações do intervalo de integração.
Reprodução de comportamento	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo reproduza o comportamento de interesse do sistema; • Gere endogenamente os sintomas e dificuldades que motivaram o estudo; e • Gere os vários modos de comportamento observados no sistema real.
Anomalia de comportamento	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo não apresente comportamento anômalo quando houver alterações ou exclusões nas hipóteses adotadas.
Tipo	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo gere o comportamento observado em outras instâncias do mesmo sistema.
Comportamento surpreendente	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo gere comportamentos não observados previamente, quando isso for coerente; e • O modelo antecipe a resposta do sistema a condições ainda não ocorridas.
Análise de sensibilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidade numérica: ... os resultados numéricos do modelo variem de forma plausível quando as hipóteses sobre os parâmetros, agregação, e limites do modelo são alterados dentro de limites plausíveis; • Sensibilidade de comportamento: ... os modos de comportamento do modelo se alterem dentro de limites plausíveis quando as hipóteses sobre os parâmetros, agregação, e limites do modelo são alteradas dentro de limites plausíveis; e • Sensibilidade a políticas: as implicações das políticas se alterem de maneira plausível quando as hipóteses sobre os parâmetros, agregação, e limites do modelo são alteradas dentro de limites plausíveis
Melhorias do sistema	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo contribua para a mudança do sistema para uma melhor condição.

Fonte: Sterman (2000)

2.2.5 Formulação e avaliação de políticas

Esta fase engloba cinco atividades: o estabelecimento de cenários; projeto de políticas; análise e avaliação das políticas sugeridas; análise de robustez das políticas

sugeridas diante da incerteza dos parâmetros assumidos; e análise da interação entre as políticas, de forma a avaliar quais políticas apresentam sinergia e quais não.

2.3 Conceitos básicos de modelagem em Dinâmica de Sistemas

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos de DS. Para a obtenção de mais informações sobre o tema, sugere-se a leitura de Sterman (2000), Forrester (1961), e Senge (2005).

2.3.1 Pensamento sistêmico versus pensamento orientado a eventos

A mente humana não é adaptada a interpretar como os sistemas sociais se comportam. Como já dito, os sistemas sociais pertencem a uma classe chamada de sistemas não lineares, com múltiplas malhas de realimentação (FORRESTER, 1971).

O pensamento orientado a eventos tem uma perspectiva pragmática, é orientado à ação, é simples e, frequentemente, míope. Sua hipótese básica é que os problemas têm origem exógena (externa), sendo fruto de eventos que não estão sob controle do indivíduo, ou que pelo menos não há tempo para que se medite sobre suas causas. Um exemplo gráfico desse modelo mental é apresentado na Figura 14 – Visão do Pensamento Orientado a Eventos (MORECROFT, 2007).

Um exemplo simples, proposto por Forrester (1971) ilustra bem a sequência do pensamento orientado a eventos. Uma criança coloca a mão em um fogão aquecido, sente o calor intenso e, rapidamente, tira a mão do forno. Este é um exemplo de relação causal de um sistema simples: o autor executa uma ação, sente

rapidamente os seus efeitos, executa outra ação para corrigir a anterior, e o sistema atinge seu equilíbrio.

O pensamento sistêmico, por outro lado, considera que o indivíduo (instituição) age no ambiente e depois o ambiente reage a essa ação, agindo no indivíduo (instituição). Para refletir sobre as consequências, o analista deve pensar em como esta estruturada a cadeia de causa e efeito que faz com que suas ações em um instante atual se reflitam sobre ele mesmo em instante futuro. Essa forma de raciocinar é a essência do pensamento sistêmico. Para enfatizar esta ideia, Sterman (2000) afirma que não existem efeitos colaterais, mas apenas efeitos; alguns foram avaliados a priori, outros não.

2.3.2 Relações causais e realimentação

As relações causais estabelecem a conexão entre os diversos agentes de um sistema. Diz-se que há uma relação de causalidade entre duas variáveis X e Y quando uma mudança na variável X pode ser considerada como produtora de uma mudança em outra variável Y. Diz-se então que há uma relação causal entre elas.

A interação causada pelo processo – ação, reação, mudança nas pessoas e no ambiente e efeito na ação original – estabelece uma malha de realimentação. Essa interação, chamada de relação causal, é a essência da modelagem em Dinâmica de Sistemas. A causalidade está presente em todos os sistemas importantes, sejam eles biológicos, físicos, econômicos ou sociais.

2.3.3 Diagramas causais

O Diagrama Causal (DC) é a ferramenta usada tanto no Pensamento Sistêmico quanto na Dinâmica de Sistemas para mapear as relações causais. É a ferramenta básica que o modelador usa para entender e explicar as relações entre os elementos de um sistema. É também muito usada para apresentar a estrutura dinâmica de um sistema aos que não participaram do processo de modelagem

Para exemplificar a sintaxe dos DC, a Figura 15 apresenta um Diagrama Causal, adaptado de STERMAN (2000), no qual se vê uma interpretação da visão de Adam Smith sobre o comportamento dos mercados (SMITH, 2000).

Neste diagrama as nove variáveis representam os elementos relevantes ao sistema. São elas: Oferta; Demanda; Preço, Preço dos Substitutos; Valor Relativo do

Produto; Custo de Produção; Lucro; Utilização da Capacidade de Produção; e Capacidade de Produção.

As setas indicam que dois elementos têm uma relação causal; uma variação no elemento de onde parte a seta leva a uma variação no elemento de destino. As setas têm polaridades indicadas em suas pontas, positiva ou negativa. Uma seta com um sinal positivo na sua ponta indica que, se as demais variáveis permanecem constantes, uma variação positiva na variável de origem, leva a uma variação positiva na variável de destino, maior do que a ocorreria sem tal variação. Uma seta com sinal negativo é análoga, em sentido oposto.

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Sterman (2000).

Alguns autores descrevem uma explicação mais simples da polaridade das setas afirmando que uma variação positiva na variável de origem acarreta uma variação positiva na variável de destino; entretanto, esse conceito carece de

completude, pois quando há dinâmica de níveis e vazões envolvidas na questão isso pode não ser verdade.

Para exemplificar um caso onde a explicação simplificada falha, será apresentado um exemplo. Considere-se um carro trafegando com uma velocidade (variável de destino) de 40 km/h, e uma aceleração de taxa de 10 km/h² (variável de origem). Qual seria o comportamento da velocidade, se houvesse uma variação da aceleração?

A Figura 16 mostra duas situações; na primeira o condutor mantém a aceleração durante todo o trajeto; e na segunda ele reduz a aceleração para 5 km/h² no instante $t = 5$ horas. No segundo caso, a variável de origem (aceleração) reduziu seu valor (de 10 para 5); entretanto, a variável de destino (velocidade) continua aumentando, pois o valor da aceleração ainda é positivo, como mostra a Figura 16. Esse exemplo mostra que a explicação simplificada falha nesse caso.

Figura 16 – Exemplo da variação da aceleração e da velocidade

Fonte: Elaboração própria

Resta saber se a explicação completa consegue capturar também esse caso particular. Observe-se no gráfico que embora a velocidade do carro continue crescendo, ela faz isso com valores abaixo do que faria se a aceleração não tivesse diminuído, comprovando a correção da definição dada inicialmente.

A interpretação matemática para a polaridade na ponta da seta é que ela indica o sinal da derivada parcial da variável de destino com relação à variável de origem, como indicado na Equação 1.

$$\frac{\partial(\text{Velocidade})}{\partial(\text{Aceleração})} > 0 \quad \text{Equação 1}$$

Com o propósito de facilitar a leitura, a descrição simplificada dos Diagramas Causais será usada ao longo deste texto; entretanto, deve-se ter em mente que a expressão “acima (abaixo) do que teria variado se a variável de origem não tivesse se alterado” foi omitida.

No diagrama causal mostrado na Figura 15, três variáveis formam um caminho fechado afetando-se por meio de uma cadeia de realimentação: Demanda; Preço e Valor Relativo do Produto. Esse caminho fechado é chamado de malha, malha de realimentação, *causal loop*¹¹, *loop* causal ou malha de *realimentação*. Nesta tese esses nomes serão usados de maneira indistinta.

Para compreensão da descrição de um DC, será apresentada a descrição do Diagrama Causal apresentado na Figura 15. A primeira malha a ser analisada será a malha B1 – Demanda. A partir de um aumento da Demanda, ocorre um aumento no Preço; o aumento no Preço resulta em uma redução do Valor Relativo Absoluto do Produto, que por sua vez reduz a Demanda. Com isso se fecha uma malha. A Demanda começou crescendo e ao final da análise da malha ela estava sendo reduzida.

Há apenas dois tipos de malha. As malhas de reforço amplificam alterações em suas variáveis, gerando comportamentos explosivos. As malhas de equilíbrio tendem a atenuar e compensar alterações nas variáveis que a compõem, fazendo com que o sistema se mantenha dentro de limites.

Pode-se observar no centro da malha uma seta circular envolvendo os caracteres B1, com o nome da malha (*Demanda*) logo abaixo da seta. Isso representa uma malha de realimentação considerada importante por quem comunica o modelo. A letra B representa que é uma malha de equilíbrio; se a malha fosse de reforço, ela seria

¹¹

Esta é a origem do nome do diagrama em inglês: *Causal Loop Diagram*.

indicada por meio de uma letra R¹². A Tabela 3 mostra alguns dos símbolos mais usados para cada uma das malhas, com significados intuitivos.

Tabela 3 – Símbolos de Identificação de Malhas em Diagramas Causais

Malha de Reforço	Malha de Equilíbrio
<p>R</p> <p>+</p>	<p>B</p> <p>-</p>

Fonte: Elaboração própria.

A leitura da malha B2 – *Oferta Curto Prazo* é similar à da malha B1; ou seja, um aumento de *Preço* leva a um acréscimo no *Lucro*. Aumento de *Lucro* induz os empresários a produzir mais aumentando a *Utilização da Capacidade de Produção*, o que aumenta a *Oferta*, reduzindo o *Preço*. Novamente, vê-se que o exemplo começa com uma variável crescendo seu valor (*Preço*) e ao final esse valor decresce, caracterizando uma malha de equilíbrio, na malha identifica pelo símbolo B2 – *Oferta Curto Prazo*.

A malha B3 – *Oferta Longo Prazo* introduz o conceito importante do atraso. Observem-se os dois traços interrompendo a seta que liga o *Lucro* à *Capacidade de Produção*. Os traços indicam que o efeito de uma variação do *Lucro* na *Capacidade de Produção* ocorre, mas com retardo, isto é, depois de certo período de tempo, ou seja, os empresários levam um tempo para firmar sua perspectiva de crescimento do lucro, precisam de tempo para tomar a decisão de construir uma nova fábrica ou ampliar a existente, e decorre um tempo apreciável entre a decisão de construir ou ampliar a fábrica, e ela estar operacional.

Completando a leitura do DC: partindo do *Preço* verifica-se que um acréscimo de *Preço* leva a um aumento no *Lucro*; que após certo tempo leva a um aumento da *Capacidade de Produção*, o qual resulta em um aumento da *Oferta*, que reduz o *Preço*.

¹² O uso da letra “B” em origem na palavra inglesa *Balancing*; e o da letra “R” na palavra inglesa *Reinforcing*.

Considerando-se que a análise se iniciou com um acréscimo no *Preço* e terminou com uma redução no *Preço*, fecha-se nova malha de equilíbrio, identificada na figura como *B3 – Oferta Longo Prazo*.

2.3.4 Diagramas de Forrester (Níveis e Vazões)

Segundo Sterman (2000), os Diagramas Causais têm uma limitação importante: não apresentam de maneira explícita quais as variáveis que definem o estado do sistema nem quais são as que fazem com que este estado se altere. Os Diagramas de Forrester¹³ contém elementos que permitem explicitar tais variáveis.

Em Dinâmica de Sistemas os estados de um sistema são chamados de Níveis e as grandezas que causam sua variação são chamadas de Vazão. Os Níveis representam a integração, os estoques ou os acúmulos de um sistema. As taxas que alteram os Níveis são chamadas de Vazão.

Para maior clareza desse conceito, será usado um exemplo, apresentado pelo Professor Jay Forrester, que contém muitos conceitos relevantes relativos à área de Dinâmica de Sistemas (Forrester, 1991). A Figura 17 apresenta um sistema dinâmico real, uma pessoa controlando o enchimento de um copo com água. A figura foi copiada do próprio texto de Forrester e mantida como no original.

Figura 17 – Exemplo de Sistema Dinâmico

Fonte: Forrester (1991)

¹³ Em inglês usa-se *Forrester Diagram* ou *Stock and Flow Diagram*. Alguns autores chamam esses diagramas de Diagramas de Níveis e Vazões, ou Diagramas de Estoques e Fluxos.

Apresenta-se a seguir uma tradução livre do texto ao lado da figura:

“Encher um copo com água, não é meramente uma questão de água fluindo para dentro do copo. Há o controle da quantidade de água. Esse controle representa uma malha de realimentação que contém o nível de água, os olhos, as mãos, a torneira e o fluxo de água. Tais malhas de realimentação controlam todas as ações em qualquer lugar”.

Neste sistema simples é possível identificar alguns aspectos importantes dos sistemas: o primeiro deles é o sinal de realimentação, o sinal visual do nível de água no copo; o segundo é uma meta definida, o copo cheio; o terceiro é a existência de um elemento de controle, a torneira que controla a vazão de água; o quarto é a variável de estado de interesse, a quantidade de água no copo.

A Figura 18 mostra o Diagrama de Forrester que representa esse sistema. Existem na figura dois símbolos, um nível, representado por um retângulo, e uma vazão, representada por uma válvula. O Nível representa a integração, ou o estoque, ou o acúmulo do sistema – nesse exemplo a quantidade de água dentro do copo. A taxa que altera o Nível é a Vazão – neste exemplo, o fluxo de água que entra no copo. A Vazão é definida por uma política estabelecida, que indica como a taxa deve ser controlada pelo valor do nível quando comparado à meta pré-estabelecida (*Meta*). As nuvens representam fontes ou sorvedouros e são usadas para definir as fronteiras do sistema simulado.

Segundo Forrester (1996), todos os sistemas consistem destes dois tipos de conceitos – Níveis e Vazões – e nenhum outro. Esta afirmativa é poderosa para

simplificar a visão do mundo. Todos os profissionais podem reconhecer estas duas classes de variáveis em assuntos ligados às suas áreas. A quantidade de água em uma banheira é o Nível, o fluxo de água é a Vazão que altera o Nível. A reputação de uma pessoa é o Nível, que é alterado por suas boas e más ações, que são os fluxos. O nível de frustração de um grupo é um Nível, alterado gradualmente em resposta às pressões nesse grupo (fluxo).

Outros aspectos importantes podem ser ressaltados a partir da Figura 18, como por exemplo: um Nível só é alterado por uma Vazão, nunca diretamente por outro Nível; as Vazões são controladas somente pelos Níveis, nunca diretamente por outras vazões; e a condição atual do sistema, representada pelo estado dos Níveis, é comparada com os valores de referência para determinar as ações de controle que serão exercidas sobre as Vazões.

A dinâmica de níveis e vazões é assunto complexo e difícil de ser compreendido em toda sua extensão. Para aprofundar e melhor avaliar a dificuldade sugere-se: Sterman (2000), para o tratamento da parte matemática; Cronin, Gonzalez e Sterman (2008), para interessante discussão acadêmica; e Sterman (2008), para a análise de um caso real de falha de percepção da dinâmica de níveis e vazões, examinando o caso do acúmulo de CO₂ na atmosfera terrestre.

2.3.5 Atrasos

Atrasos são comuns a muitos processos gerenciais e podem ser a fonte da dinâmica de grande parte dos sistemas. Alguns atrasos podem gerar instabilidade e oscilações, outros podem servir para filtrar os ruídos e permitir aos tomadores de decisão um quadro mais adequado, (STERMAN, 2000).

Podem ocorrer diversos tipos de atrasos, que representam o tempo requerido para que: uma medida seja tomada; uma informação seja coletada e fique disponível (atraso de informação); uma informação seja percebida (atraso de percepção); uma decisão seja tomada (atraso de decisão); e uma determinada ação seja executada (atraso de ação).

Os atrasos representam papel importante na dinâmica dos sistemas complexos, neste item introduz-se o assunto de forma sucinta. Para um maior aprofundamento no assunto, sugere-se a leitura de Sterman (2000), Cap. 11.

2.3.5.1 Definição de atraso

Segundo Sterman (2000), “atraso é um processo em que a saída leva um intervalo de tempo para refletir a entrada”. Um atraso pode ser material ou de informação. No caso do atraso material deve ser observada a conservação do material que está se movendo pela estrutura que causa esse atraso. No caso de atraso de informação essa conservação pode ocorrer ou não, pois uma informação pode ficar perdida, e quando usada não é consumida.

É interessante observar que um atraso sempre tem em sua estrutura um ou mais níveis que armazenam o material ou a informação que está em trânsito. Desta forma, os atrasos aumentam a ordem dos sistemas. A Figura 19 mostra um exemplo de estrutura com atraso.

Figura 19 – Exemplo de Diagrama de Forrester de uma estrutura de atraso

Fonte: Elaboração Própria.

É possível provar com recursos matemáticos que quanto maior a ordem do atraso, menor será sua dispersão em relação ao atraso médio. Em modelos de DS são normalmente empregados atrasos de Ordem Zero, que é um atraso de ordem infinita; atrasos de 1ª ordem, com um nível; e atrasos de 3ª ordem, com três níveis. O Diagrama de Forrester para os três tipos de atraso é o mesmo, a menos que o modelador resolva desagregá-los, quando deverão ser representados por meio de uma cadeia de níveis e vazões. Nesta seção será tratado o caso agregado. Em Santos (2007) é tratado o caso desagregado.

Os resultados de atrasos de Ordem Zero, Primeira e Terceira Ordem são apresentados na Figura 20. A curva 1 (azul) apresenta a evolução ao longo do tempo do valor da variável *Entrada*. A curva 2 (vermelha) apresenta a variável *Saída* quando o sistema é modelado como um atraso de Ordem Zero (*Delay Fixed*). A curva 3 (verde) apresenta o resultado quando a variável *Saída* é modelada como um atraso de Primeira Ordem (*First Order*). A curva 4 (cinza) apresenta o resultado quando a variável *Saída* é modelada como um atraso de Terceira Ordem (*Third Order*)

Atrasos de terceira ordem são considerados adequados para se modelar processos industriais (caso da construção de navios), atrasos de ordem 2 são bons para se modelar a construção de obras civis (STERMAN, 2000), e atrasos de primeira ordem são representações adequadas para suavização de ruídos e ajuste de previsões e perspectivas. Exemplos de aplicações de atrasos de primeira ordem são: as suavizações nas previsões de demanda, nos casos de demanda que varia de forma aleatória e com grande intensidade; formação de expectativas, a partir de informações mais estáveis e confiáveis, a partir de informações com ruídos, e erros de medição; entre outros.

3 A indústria da cana-de-açúcar

Este capítulo contém breve descrição da indústria da cana-de-açúcar. São cobertos cinco aspectos considerados principais: a cana-de-açúcar como planta; os processos agrícolas; os processos industriais; as questões ambientais; e as questões econômicas.

3.1 A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta de origem muito antiga; seu gênero consiste hoje de 35 a 40 espécies com dois centros de diversidade: o primeiro, na Ásia e África; e o segundo, nas Américas do Sul, Central e do Norte. O continente com maior quantidade de espécies nativas é a Ásia, com vinte e cinco, seguida da América do Norte, com seis. As espécies existentes no Brasil ainda não foram adequadamente caracterizadas, sendo que somente as *S. Asperum*, *S. Angustifolium* e *S. Villosum* são espécies com nomes científicos aceitos atualmente (The Plant List 2010¹⁴, apud CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011)

As espécies envolvidas no desenvolvimento do cultivo moderno de cana-de-açúcar se originaram do Sudoeste Asiático e são a *Saccharum Officinarum* e a *Saccharum Spontaneum*: a primeira é adequada para climas mais quentes; enquanto a segunda é adequada para uso em climas mais diversos (Roach and Daniels, 1987¹⁵, apud CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011).

A planta da cana-de-açúcar é composta principalmente pela raiz, colmos, folhas, e flores. A Figura 21 apresenta um desenho indicando suas partes, com exceção da raiz. As folhas podem ser verdes ou secas; as folhas verdes se localizam na parte superior da planta e as secas na parte inferior. A extremidade superior dos colmos é chamada de ponto, ou palmito. Ao se passar pelos canaviais, não é normal se ver a planta com flor, uma vez que a planta florada tem sua produtividade reduzida.

¹⁴ The Plant List (2010) Version 1. <http://www.theplantlist.org/> Jan 2011.

¹⁵ Roach BT, Daniels J (1987) A review of the origin and improvement of sugarcane. In: Copersucar International Sugarcane breeding Workshop 1: 1–31

Figura 21 – Cana-de-açúcar

Fonte: Rignanese (2011)

Os colmos são a parte da cana que contém a sacarose, que é a matéria-prima para a produção tanto de açúcar, quanto de etanol. O teor de sacarose é o principal critério de determinação da qualidade da cana. A Tabela 4 apresenta a composição média de um colmo de cana-de-açúcar (SEABRA, 2008).

Tabela 4 – Composição média dos colmos da cana-de-açúcar.

Componente	Teor (%)
Água	65 a 75
Açúcares	11 a 18
Fibras	8 a 14
Sólidos solúveis ¹⁶	12 a 23

Fonte: Seabra(2008)

¹⁶

Os sólidos solúveis incluem os açúcares

A Figura 22 apresenta o ciclo fenológico da cana-de-açúcar. A ilustração “a” mostra o tolete usado para o plantio de cana; a ilustração “b” representa o início da brotação da gema e o enraizamento; a ilustração “c” mostra o início do perfilhamento; a ilustração “d” mostra uma situação em que a planta está com intenso perfilhamento; a ilustração “e” mostra uma planta no início da maturação; a ilustração “f” mostra a planta madura e pronta para o corte; a ilustração “g” mostra a soca, que resulta do corte da cana; e a ilustração “h” mostra a germinação da soca, dando início ao segundo ciclo da planta (CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011).

Figura 22 – O ciclo fenológico da cana-de-açúcar

Fonte: (CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011)

A qualidade da cana-de-açúcar é determinada pela quantidade de sacarose, que serve de matéria-prima, tanto para a fabricação de açúcar, quanto para a fabricação de etanol. Para isso são definidos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar para verificar sua maturação; esses parâmetros são o Brix e o pol (NETAFIM, CSA, 2011).

O Brix será tratado no item referente à maturação. O pol é uma medida que indica a porcentagem de sacarose no suco. Assim o percentual de sacarose também é referido como percentual pol. Pode ser determinado pelo uso de um polarímetro ou do “sucrolyser”, instrumentos que determinam o percentual de sacarose no suco (NETAFIM, CSA, 2011).

3.2 Processo agrícola

O processo agrícola pode ser resumido em três fases principais: o manejo; a maturação; e a colheita.

3.2.1 Manejo

O manejo da cana compreende uma série de atividades que devem ser executadas em cada início de safra, afetando diretamente a produtividade do canavial, e o número de cortes que uma lavoura pode suportar sem perda expressiva de produtividade. O manejo inclui a rotação e reforma do canavial; o plantio; a irrigação; e a fitossanidade. Para os propósitos dessa tese, somente o plantio e a rotação e a reforma do canavial serão abordados.

3.2.1.1 Plantio

O plantio do canavial começa pelo planejamento da área, por meio de um trabalho de engenharia conhecido como sistematização, no qual o terreno é dividido em talhões, e os carregadores principais e secundários são definidos. Com o crescimento da mecanização, há a tendência de se buscar talhões planos e com linhas de cana com grande comprimento, para facilitar a manobra das máquinas (ROSSETTO e SANTIAGO, 2007).

Antes do plantio propriamente dito, o produtor deve cumprir uma série de atividades importantes para garantir elevada produtividade no canavial; entre elas

destacam-se: amostragem do solo para fertilização; escolha do melhor cultivar¹⁷; definição da melhor época de plantio; escolha do sistema de plantio, que pode ser de 12 ou 18 meses (ROSSETTO e SANTIAGO, 2007).

O sistema de plantio de 12 meses pode ser usado nas regiões onde o período mais adequado para a plantação decorre entre outubro e novembro . Esse sistema tem como vantagem a duplicação da época de plantio, estendendo o período de colheita e permitindo melhor distribuição temporal no uso das máquinas. Esse sistema deve ser usado com parcimônia uma vez que leva a menor produtividade, pode prejudicar o preparo do solo, e pode necessitar do uso de inibidores floríferos, para evitar o florescimento da cana (ROSSETTO e SANTIAGO, 2007).

No sistema de plantio de 18 meses a cana é plantada nos meses de janeiro a março e a planta inicia seu desenvolvimento até o início do inverno; com a chegada do período seco, a planta tem um crescimento lento que vai de abril a agosto; depois desse período, a planta cresce de setembro a abril e amadurece nos meses seguintes.

Com o uso de torta de filtro¹⁸, que contem elevada umidade, é possível plantar cana-de-açúcar durante o período de estiagem, uma vez que a torta oferece a umidade necessária para a brotação. Combinada com uso de vinhaça ou irrigação é possível plantar-se cana ao longo de todo o ano. A extensão do período de plantio facilita a logística da colheita permitindo uma maior utilização da capacidade de moagem nas usinas.

3.2.1.2 Rotação e reforma

A primeira fase de uma lavoura de cana-de-açúcar é o plantio, quando a terra deve ser devidamente preparada.

Uma lavoura de cana-de-açúcar permite de três a seis colheitas sem ser renovada. O número de colheitas depende de vários fatores: o cultivar usado; o manejo do solo; as condições de hidratação do terreno; e o clima da região. Com o

¹⁷ Cultivar é a designação dada ao tipo de cana-de açúcar cultivada, correspondendo a um determinado genótipo e fenótipo que foi selecionado e recebeu um nome único e devidamente registrado com base nas suas características produtivas (resistência à pragas, adequabilidade ao clima, etc,) que o tornem interessante para cultivo.

¹⁸ Para uma definição do significado, origem, composição, e usos da torta de filtro, sugere-se uma visita ao sítio da EMBRAPA, no endereço: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html

término do ciclo, o produtor pode optar por renovar o canavial ou fazer uma rotação com outras culturas. A primeira opção é adotada quando o produtor privilegia o lucro imediato; e a segunda, quando o produtor tem o objetivo principal de melhorar as condições físico-químicas da terra (SANTIAGO e ROSSETTO, 2007).

Ainda segundo Santiago e Rossetto (2007), o sistema mais comum de utilização de culturas em rotação ou reforma envolve as seguintes operações:

- Retirada da cana-de-açúcar e destruição da soqueira;
- Calagem e preparo do solo;
- Plantio da cultura anual;
- Colheita; e
- Novo plantio de cana.

Durante a renovação do canavial, normalmente, faz-se o uso de espécies de plantas conhecidas como adubos verdes, cujo objetivo é obter uma cobertura superficial e manter ou melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, inclusive em profundidade.

O cultivo de espécies de ciclo curto em áreas de renovação de cana-de-açúcar proporciona ao produtor uma série de vantagens agronômicas, econômicas, políticas e sociais. Algumas vantagens da rotação de culturas em cana-de-açúcar são: economia na reforma do canavial; conservação do solo, devido à manutenção de cobertura numa época de alta precipitação pluvial; controle de plantas daninhas durante o cultivo anual da cana; combate indireto a pragas; e aumento da produtividade da cana-de-açúcar e produção de alimentos.

3.2.2 Efeitos da inadequação do manejo

A Figura 23 apresenta a reprodução de um slide apresentado pelo Prof. Luiz Antonio Dias Paes em uma palestra proferida na ÚNICA em dezembro de 2011 (PAES, 2011). Pode ser observado que tanto nos anos 1999, quanto nos anos 2009 e 2010 a taxa percentual de renovação dos canaviais foi de aproximadamente 8%, significativamente inferior à média história, que se aproxima dos 13,5%.

RENOVAÇÃO: HISTÓRICO 25 ANOS - PLANTIO 18 MESES

Figura 23 – Evolução da parcela de renovação dos canaviais

Fonte: Paes (2011)

TRATOS DO CANAVIAL – IMPACTO

Figura 24 – Impacto do trato do canavial

Fonte: Paes (2011)

Paes vincula aponta a crise de 2008 com uma das razões da queda no padrão do manejo dos canaviais (renovação), que teve como consequência uma queda de produtividade na safra 2010/2011. A Figura 24 apresenta de forma gráfica o raciocínio de Paes.

O resultado obtido pela safra do ano 2000 parecer fortalecer a hipótese de Paes, uma vez que no ano de 1999 a renovação dos canaviais atingiu um valor de aproximadamente 8%, também significativamente inferior que a média histórica.

3.2.3 Maturação

Durante o período de maturação da cana, ocorre o processo que envolve a formação de açúcares nas folhas e seu armazenamento nos colmos. Há várias definições de cana madura; para o propósito dessa tese, a maturação da cana será considerada como o momento em que o colmo atinge seu máximo armazenamento de açúcar, que é quando a cana atinge um teor de sacarose maior que 13% do peso do seu colmo, tornando-se viável como matéria-prima para a indústria (ROSSETTO, 2007b).

O acúmulo máximo de sacarose ocorre quando a planta encontra condições que restringem seu crescimento; entre essas condições destacam-se: deficiência hídrica; falta de nutrientes; e condições adversas de clima. Nessas condições a planta para seu crescimento e amadurece (ROSSETTO, 2007b).

É comum o emprego de práticas nas culturas de manejo de adubação e de irrigação com o objetivo de favorecer o amadurecimento da cana-de-açúcar com elevados teores de sacarose. Na medida em que as plantas apresentarem colmos bem desenvolvidos, a adubação e a irrigação devem ser limitadas, pois seu excesso pode prejudicar a maturação da planta (ROSSETTO, 2007b).

É comum o uso de produtos químicos que induzem o amadurecimento de plantas, acelerando a translocação e o armazenamento dos açúcares na planta. São utilizados para antecipar e otimizar o planejamento da colheita. Os maturadores podem, ainda, apresentar substâncias que dessecam a planta, o que favorece a queima e diminui as impurezas vegetais ou que inibem o florescimento (ROSSETTO, 2007b).

Para determinar se a cana-de-açúcar encontra-se no ponto de maturação utiliza-se o refratômetro de campo, aparelho que fornece a porcentagem de sólidos solúveis do caldo (chamado de brix), que está ligado ao teor de sacarose da cana-de-açúcar. Após esta medição, é feita uma análise laboratorial.

A maturação da cana-de-açúcar se dá no colmo, desde a base até seu ápice. A planta imatura apresenta uma grande diferença nos teores de sacarose entre os extremos de seus colmos. Portanto, o critério utilizado para estimar a maturação pelo refratômetro de campo é o índice de maturação (IM), que fornece a relação entre os dois teores, conforme a Equação 2.

$$IM = \frac{\text{Brix na ponta do colmo}}{\text{Brix na base do colmo}} \quad \text{Equação 2}$$

As medidas devem ser tomadas na parte superior e inferior da cana (NETAFIM, CSA, 2011), sendo que as faixas de valores de IM e seus significados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Faixas dos valores de Índice de Maturação (IM)

Valor de IM	Significado
< 0,60	Cana verde
0,06 < IM < 0,85	Cana em processo de maturação
0,85 < IM < 1	Cana madura
IM > 1	Cana em processo de declínio de sacarose

Fonte: Rossetto (2007b)

3.2.4 Colheita e Transporte

A colheita e o transporte da cana-de-açúcar são etapas do processo produtivo de grande importância, tanto para a qualidade da matéria-prima entregue às usinas, quanto para os cortes subsequentes. A colheita deve levar em consideração vários aspectos, como por exemplo: máquinas, mão-de-obra, fisiologia da cultura, e aspectos econômicos, sociais e tecnológicos (ROSSETTO, 2007a).

Em seu site institucional a NETAFIM afirma que uma colheita deve garantir os seguintes aspectos (NETAFIM, CSA, 2011):

- Colher a cana no pico da maturidade, evitando colhê-la antes do tempo ou tarde demais;
- Cortar a cana a um nível próximo ao solo para que o açúcar de baixo rico de internódios seja colhido e assim adicione à produção e açúcar;
- Poda na altura certa para que os internódios imaturos superiores sejam eliminados;
- Limpeza apropriada da cana para remover folhas, cinzas, raízes etc.; e
- Entrega rápida da cana colhida para a fábrica, no máximo 24 horas.

Do ponto de vista das máquinas, informações obtidas durante visita à usina São Martinho indicam que a colheita deve ser feita do ponto mais distante para o mais próximo da usina. A razão disso é que com o decorrer da safra, os caminhões e demais máquinas se desgastam, e nesse momento é mais favorável que a cana a ser colhida esteja mais próxima da usina.

Ainda com relação às máquinas, durante o período de colheita é imprescindível a gestão eficiente do trânsito de grande quantidade de veículos, entre eles tratores, colhedoras e caminhões, que se movimentam constantemente entre o canavial e a usina, ou cidades (ROSSETTO, 2007a).

Do ponto de vista da mão-de-obra, a colheita manual movimenta grande quantidade de pessoas, geralmente com menor nível de qualificação, causando uma migração importante nas cidades menores. Esse movimento da mão-de-obra exige que setores de promoção social das agroindústrias, e muitas vezes dos próprios municípios onde estão os canaviais, tenham que efetuar medidas que mitiguem eventuais problemas causados por essa população flutuante.

É importante destacar que a decisão de se cortar a cana no momento ideal pode ser afetada por fatores intervenientes; entre os mais comuns estão a necessidade de suprir cana às moendas rapidamente, para não parar a produção, e os atrasos por falta de máquinas ou mão-de-obra.

Há três sistemas de colheita: manual; semimecanizado; e mecanizado. No sistema manual (Figura 25), o corte e o carregamento são feitos manualmente. O sistema de colheita manual é normalmente precedido de queima da palha da cana, o que causa impactos ambientais negativos.

No sistema semimecanizado, o corte é feito manualmente, e o carregamento nos caminhões é feito por carregadoras mecânicas.

No sistema mecanizado (Figura 26), o corte é feito por máquinas cortadoras e carretas de transbordo; emprega somente mão-de-obra especializada, como os operadores de máquinas e tratoristas (NETAFIM, CSA, 2011). O corte mecanizado é menos agressivo ao meio ambiente, pela redução de queima da palha e sua manutenção no terreno, o reduz a erosão do solo. Tem também a vantagem de proporcionar maior rapidez na colheita.

O processo de colheita mecanizada também tem suas desvantagens: uma delas é que as máquinas compactam o solo, o que é prejudicial para o crescimento da cana, exigindo esforços adicionais no trato da próxima plantação; outra desvantagem é que as máquinas não cortam a cana tão bem como os trabalhadores que executam o corte manual, cortando a cana muito alta e sem limpar a planta corretamente, aumentando a quantidade de impurezas que chegam às usinas.

Figura 25 – Corte manual

Fonte: NETAFIM, CSA (2011)

Figura 26 – Corte mecanizado

Fonte: NETAFIM, CSA (2011)

Segundo Paes (2011), estima-se que o aumento da mecanização da colheita acarretou uma queda adicional de 2% na produtividade da safra 2010/2011, tendo como base a produtividade média histórica.

3.3 Processo industrial

A Figura 99 (Apêndice I) apresenta o fluxograma do processo industrial do açúcar e do etanol. Ao chegar à usina, a cana-de-açúcar é lavada, picada e desfibrada, para aumentar sua densidade e romper suas células. Após o preparo, a cana é espalhada e segue para o sistema de alimentação da moenda, passando por um eletroímã para evitar que pedaços de metal causem danos aos roletes da moenda.

Embora a condição ideal seja que a cana seja moída assim que cortada, interrupções de fornecimento poderiam parar o processo industrial. Para evitar esse contratempo, pequenos estoques de cana são mantidos nas usinas de forma a garantir a continuidade do processo industrial mesmo em caso de interrupção de fluxo de cana. Não deve haver exagero em tal prática, pois após 24 horas do corte, o teor de sacarose começa a diminuir, reduzindo a produtividade do processo de transformação da cana-de-açúcar em açúcar/etanol.

O processo de moagem tem dois produtos: o bagaço de cana e o caldo. O bagaço é estocado no pátio tendo dois destinos: o primeiro é a comercialização; o segundo é a queima em caldeiras dentro da própria usina, gerando vapor, que é usado para acionar turbogeradores, que geram energia elétrica para os serviços internos da usina e podem gerar excedentes que são vendidos para as concessionárias de energia.

O caldo gerado na moagem pode seguir tanto para a produção de açúcar quanto para produção de etanol. A fabricação de etanol no Brasil pode ser feita tanto a partir da fermentação do caldo quanto da mistura de caldo e melaço, característica única no mundo (SEABRA, 2008). Tal capacidade permite grande sinergia na produção do açúcar e do etanol nas usinas brasileiras.

O processo industrial da cana é muito rico em detalhes e sua explicação detalhada fugiria do escopo do tema dessa tese. Para informações detalhadas do processo físico químico de transformação da cana-de-açúcar em açúcar ou etanol, sugere-se a leitura de Seabra (2008), ou consultar EMBRAPA (2003); essas referências contêm informações detalhadas sobre os processos de produção do açúcar e do etanol.

3.4 Aspectos ambientais

Apesar dos problemas conjunturais, é inegável que o crescimento da indústria da cana-de-açúcar nesta década foi notável e que esse crescimento tem gerado grande interesse no exterior, com publicação de cientistas brasileiros em periódicos internacionais como Goldemberg (2007) e Goldemberg e Guardabassi (2009), entre outros.

As atividades agrícolas e industriais do setor sucroalcooleiro afetam o meio ambiente e a expansão das áreas de cultivo traz consigo inevitáveis impactos ambientais no solo, recursos hídricos e sobre a fauna e flora. No entanto, para grande parte destes impactos há um conjunto de ações que têm o potencial de mitigação. Em algumas situações tais ações são mais onerosas; enquanto em outras podem ser facilmente resolvidas apenas por meio de um planejamento mais adequado das atividades produtivas (SEMA-SP, 2011).

3.4.1 Impacto na qualidade do ar

O etanol apresenta vantagem pelo fato de não possuir algumas impurezas encontradas na gasolina, tais como: enxofre, óxidos e materiais particulados. Uma importante vantagem adicional está relacionada à redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Um aspecto importante na geração de energia renovável é qual a quantidade de energia fóssil que é necessária para sua geração. A razão entre a energia renovável gerada no processo (queima de etanol para mover carros, energia elétrica a partir da queima de bagaço, etc.) e a energia fóssil utilizada para gerá-la (para mover caminhões, tratores, etc.) é chamada de balanço energético. A Equação 3 apresenta a definição matemática do balanço energético.

$$\text{Balanço Energético} = \frac{\sum \text{Geração de energia renovável}}{\sum \text{Uso de energia fóssil}} \quad \text{Equação 3}$$

Segundo estudo encomendado pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, o balanço energético, também chamado de relação de energia, pode variar

de 8,3 a 10,2. O primeiro resultado (8,3) resulta de um cenário de médio de consumo de energia e insumos; e o segundo resultado (10,2) resulta de um cenário baseado nas melhores práticas, do ponto de vista ambiental (MACEDO, et al., 2004). Goldemberg complementa que esses resultados são atingidos considerando-se a cadeia de suprimentos no seu todo e quando práticas adequadas de cultivo são utilizadas (GOLDEMBERG, 2007).

3.4.2 A competição comida versus combustível

Com a evolução do uso dos biocombustíveis e o aumento da consciência ambiental, novas questões passaram a preocupar os governos, a comunidade acadêmica e a sociedade civil, que apesar das vantagens citadas acima, tornou o uso de biocombustíveis um assunto muito controverso.

Talvez a objeção de maior impacto tenha sido levantada por Ziegler no seu relatório à Assembléia-Geral das Nações Unidas, realizada em 2007. Ziegler levantou a questão do "grave efeito potencialmente negativo dos biocombustíveis no direito à comida e ao sério risco da criação de uma batalha entre alimentos e combustível" (ZIEGLER, 2007).

No ano de 2007 o Governo Suíço encomendou um estudo para fundamentar suas decisões com relação às isenções e subsídios para biocombustíveis. Esse estudo chegou à conclusão que o etanol de cana-de-açúcar reduz a emissão de GEE; entretanto, apresenta resultado geral negativo quando são considerados todos os impactos ambientais agregados (ZAH, et al., 2007).

Prosseguindo na questão "comida versus energia", Laurence destacou o que ficou conhecido como a "conexão do milho", estabelecendo uma ligação entre a produção de etanol de milho nos EUA, a redução de área de plantação de soja naquele país, com consequente aumento dos preços, aumento da plantação de soja em outros países, inclusive o Brasil, contribuindo para o aumento do desmatamento da Amazônia (LAURENCE, 2007).

Estudo realizado no Brasil pelo Instituto de Estudo do Comércio e Negociações Internacionais (ICONE) desenvolveu o Modelo de Uso de Terra para o Brasil, conhecido

por sua sigla em inglês BLUM¹⁹, que chega a conclusões diferentes das de Laurence; afirmando que a expansão das culturas de cana-de-açúcar não tem ocorrido em terras da floresta, e apontando a expansão da pecuária, sim, tem ocorrido nessas regiões, podendo ser responsável por desmatamento na região (ICONE, 2007). Essa conclusão parece ser confirmada pelo mapa apresentado na Figura 27, que mostra as regiões de plantio de cana-de-açúcar no Brasil.

Por inspeção da figura, pode-se chegar a conclusão que a plantação de cana-de-açúcar está estabelecida no Brasil em região distante do bioma amazônico. Em adição ao BLUM e a situação apresentada no mapa da Figura 27, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento publicou em setembro de 2009 o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (MANZATTO, 2009), que foi aprovado no mesmo

¹⁹

BLUM é a sigla referente ao nome em inglês: *Brazilian Land Use Model*.

mês pelo DECRETO Nº 6.961, de 17 de setembro de 2009. Diante dessas evidências, a hipótese de Lawrence sobre cana-de-açúcar parece estar descartada.

Scharlemann and Laurence (2008) argumentaram que, considerando o ciclo de vida completo, os biocombustíveis podem ter um custo agregado ao meio-ambiente superior ao da gasolina; entretanto, esse artigo está basicamente fundamentado no estudo de Zah (Zah, et al., 2007), citado anteriormente.

Sandvik (2008) e Sandvik and Moxnes (2009), utilizaram um modelo de Dinâmica de Sistemas para estudar como os mercados de petróleo, biocombustíveis e alimentos podem interagir ao longo do tempo com o declínio das reservas de petróleo. Suas conclusões e sugestões são fortes; concluem que o uso de biocombustíveis apenas adia o problema, sem resolvê-lo, e sugerem que outras formas de energia alternativa sejam desenvolvidas, e que os biocombustíveis sejam taxados ou mesmo banidos.

Como pode ser visto, há forte oposição ao crescimento dos biocombustíveis, não só proveniente da cana-de-açúcar, mas também do milho e da beterraba, com vários artigos e órgãos importantes atacando os biocombustíveis e questionando seus benefícios para o meio-ambiente, e enfatizando a possível competição entre comida e energia em futuro, talvez próximo. A posição brasileira sobre os impactos ambientais dos biocombustíveis é pró-ativa, procurando mitigar seus impactos ambientais e manter o equilíbrio entre agricultura e meio-ambiente.

3.4.3 Queimadas e protocolo ambiental

Antes da colheita manual, é necessária a queima da palha da cana com o propósito de preservar os trabalhadores rurais que executam o serviço; tais queimadas são um aspecto de relevância do ponto de vista ambiental. O uso do fogo para despalhar a cana e facilitar seu corte tem vantagens importantes, entre elas: aumenta a produtividade do trabalho, e viabiliza economicamente o processo, pois o corte da cana crua resulta muito oneroso, além de perigoso para os trabalhadores. Por outro lado, a queima de palha da cana tem consequências ambientais negativas, tais como: liberação de monóxido e dióxido de carbono, metanos e hidrocarbonetos.

Com o propósito de eliminar de maneira gradativa a queima da palha da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, o Governo Estadual promulgou a Lei 11.241, datada

de 19 de setembro de 2002 (SÃO PAULO (Estado), 2002). Evoluindo ainda mais no sentido da preservação ambiental, em 4 de junho de 2007, representantes da indústria canavieira e o Governo do Estado de São Paulo assinaram o Protocolo Ambiental do Setor Sucroalcooleiro²⁰, “que estabeleceu uma série de princípios e diretrizes técnicas, de natureza ambiental, a serem observadas pelas indústrias da cana-de-açúcar” (UNICA, 2011).

Figura 28 – Comparação de prazos para eliminação da queima da palha de cana no Estado de São Paulo

Fonte: ÚNICA (2011)

Das dez diretrizes técnicas estabelecidas no Protocolo, quatro se referem à queima da palha, sendo que duas dessas se referem à redução de prazos para o fim das queimadas no Estado. Para áreas com declividade até 12%, o prazo foi antecipado de 2021 para 2014, com uma diferença de sete anos; e para áreas com declividade

²⁰ O protocolo pode ser encontrado no endereço eletrônico:

<http://www.ambiente.sp.gov.br/cana/protocolo.pdf>

acima de 12%, o prazo foi antecipado de 2031 para 2017, como uma diferença de quatorze anos. A Figura 28 apresenta a comparação dos parâmetros definidos na Lei Estadual nº 11.241/02 e as metas estabelecidas no Protocolo Ambiental.

As empresas que aderiram ao Protocolo Ambiental receberam do Governo do Estado de São Paulo um Certificado de Conformidade Agroambiental, que pode ser considerado como um atestado de respeito ao meio ambiente na produção de etanol. Essa chancela pode facilitar a exportação de etanol tanto para os países da Europa quanto para os EUA.

3.5 Aspectos econômicos

3.5.1 Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol.

A Figura 29 apresenta a evolução das áreas plantadas e colhidas com cana-de-açúcar, no período entre 1975 e 2009. Pode-se perceber que o crescimento da cultura de cana-de-açúcar foi apreciável, especialmente no período pós 2003, que coincide com o lançamento do carro bicombustível.

Segundo Jank (2011), a produção de cana-de-açúcar teve um crescimento vigoroso de 10,4%/ano no período decorrido entre as safras 2000/01 e 2007/08. Após esse período houve uma desaceleração da produção, que Jank imputa a três fatores: crise econômica mundial; problemas climáticos nas últimas três safras; e perda de competitividade do etanol em relação à gasolina.

Jank não aponta a influência de cada um deles, mas pode-se afirmar que a crise econômica mundial afetou a capacidade de investimento da indústria; os problemas climáticos reduziram a produtividade da safra; e a perda de competitividade relativa do etanol perante a gasolina levou os usuários a adquirirem gasolina ao invés de etanol.

Ainda segundo Jank (2011) para se atingir a um atendimento de 50% da frota de ciclo Otto com etanol hidratado, exportar um volume de 13,2 bilhões de litros de etanol, atender à demanda de 5 bilhões de litros de etanol para outros fins, e atender os mercados interno e externo de açúcar, mantendo as fatias atuais de mercado, o Brasil precisará produzir o total de 1,2 bilhões de toneladas de cana.

A Figura 31 apresenta a evolução da produtividade da terra para plantação de cana-de-açúcar, no período entre 1975 e 2009. Pode ser observado que houve um

expressivo ganho de produtividade da terra ao longo do período, saindo de um valor de 46,82 (t/ha) em 1975 para 80,24 (t/ha) em 2009 (MAPA, 2011).

Os principais derivados da cana-de-açúcar no Brasil são o açúcar e o etanol, que pode ser anidro ou hidratado. O etanol anidro é misturado à gasolina A, em uma proporção de 78% de gasolina A e 22% de etanol anidro, formando a gasolina C, que é normalmente vendida nos postos de abastecimento.

A Figura 31 mostra a evolução da distribuição da cana para produção de açúcar e etanol. Pode ser observado que até a safra 1976/1977 a predominância era do açúcar; com o lançamento do Proálcool em 1975 e do carro E-100 em 1979, essa tendência começa a reverter e etanol passa a predominar. Com a queda do programa o açúcar retoma lentamente; com o lançamento do carro bicomcombustível, ocorrido em 2003, o etanol começa a recuperar seu percentual, até a safra 2008/09, caindo a partir de então.

A Figura 32 apresenta a evolução da produção brasileira de etanol anidro (cinza escuro) e etanol hidratado (cinza claro) no período entre 1970 e 2008. Podem ser observados dois períodos de grande expansão da produção: o primeiro deles começa em 1976 com a criação do Proálcool; o outro em 2003 com o lançamento do carro bicomcombustível.

A Figura 33 mostra a evolução da produção brasileira de açúcar, que se expandiu muito a partir da safra 1989/1990, exatamente no momento em que houve a escassez de etanol que marcou o declínio do carro E-100.

A produção brasileira de açúcar atende ao mercado interno e gera considerável excedente de produção para exportação. A Figura 34 mostra as exportações e importações de açúcar, no período entre 1990 e 2008. Por meio de inspeção visual da figura, pode-se afirmar que o Brasil é um importante exportador de açúcar. Observe-se que as importações de açúcar são praticamente nulas no período.

A Figura 35 apresenta a evolução das exportações e importações de etanol no período entre 1990 e 2008. Pode-se observar que o Brasil importou etanol na década de 90 e passou a exportar após 2003, mostrando uma aceleração nessas exportações.

Figura 35 – Exportações e importações de etanol

Fonte: MAPA (2011)

A Tabela 6 apresenta as informações técnicas da cultura de cana-de-açúcar. Os dados de produtividade, rendimento de açúcar e rendimento do álcool serão usado no modelo de simulação.

Tabela 6 – Informações técnicas da cultura de cana-de-açúcar

Item	Dado
Ciclo	5 anos
Número médio de cortes	5 cortes
Produtividade de cana	85 ton/ha (120 - 65)
Rendimento de açúcar	138kg/t cana
Rendimento de álcool	82 l/t cana

Fonte: MAPA (2011)

A Figura 36 mostra a evolução da paridade entre os preços do etanol hidratado e da gasolina C²¹. A linha tracejada mostra o ponto em que é indiferente

²¹

Gasolina misturada com etanol anidro.

comprar etanol ou gasolina, do ponto de vista econômico. Pode ser observado que somente em 2011 esse limite foi ultrapassado pelo etanol.

Isso permite concluir que a decisão de usar etanol ou gasolina não é função unicamente da razão de preço entre os dois combustíveis. Essa observação será usada no modelo, que não terá como critério único de decisão o preço dos dois combustíveis.

3.5.2 Custos de produção

Os custos de produção são relevantes para o processo de modelagem, pois, por hipótese, admite-se que tais custos afetem os preços dos produtos de maneira importante. Apesar do trabalho de levantamento de custos ter sido intenso, seu resultado foi apenas parcialmente satisfatório.

A primeira informação de custos confiável foi retirada de Seabra (2008). Os custos foram classificados em Variáveis e Fixos, e a partir desses dados informações importantes para o modelo puderam ser obtidas:

- fração dos custos totais do etanol que são variáveis;
- fração dos custos totais do etanol que são fixas;

- fração dos custos totais do açúcar que são variáveis;
- fração dos custos totais do açúcar que são fixas;
- razão de preço entre etanol e açúcar.

O segundo passo para obtenção dos custos de produção foi dado usando-se as informações contidas em Goldemberg (2008). Nesse artigo é possível obter-se os custos de produção do etanol, em dólares de 2002, para o período de 1980 a 2002. Esses dados estão apresentados na Tabela 63 do Apêndice B.

O terceiro passo foi tabular as informações do CEPEA que disponibiliza os custos de produção para as safras 2006/07 a 2010/11 (CEPEA-ESALQ-USP, 2011). Essas informações estão apresentadas na Tabela 64 do Apêndice B.

Andrade e Silva (2012) informou os preços de produção da cana-de-açúcar em valores nominais para o período de 1998 a 2011. Tais informações estão apresentadas na Tabela 62 do Apêndice B. Esses dados foram passados a valores correntes de 2010 e depois para dólares americanos.

Neste ponto já se tinham os seguintes dados confiáveis:

- custos de produção do etanol de 1980 a 2002, e de 2006 a 2010;
- custos de produção do açúcar de 2006 a 2010; e
- custos de produção da cana de 1998 a 2010.

Para se calcular os custos do etanol nos anos de 2003, 2004 e 2005, foram usadas as taxas de variação dos custos da cana-de-açúcar.

Para se calcular os custos de produção do açúcar no período entre 1980 e 2006 foi usada a proporção de custos obtidas a partir das informações de Seabra (2008), apresentadas na Tabela 7. Os valores finais usados na simulação são apresentados na Tabela 65 do Apêndice B.

Tabela 7 – Custos Variáveis e Fixos de Produção do Açúcar e do Etanol

Item	Açúcar	Etanol	Classificação	CV Açúcar	CV Etanol	CF Açúcar	CF Etanol
Agrícola							
Formação do Solo	5,06	5,06	Variável	5,06	5,06		
Tratos da cultura	8,48	8,48	Variável	8,48	8,48		
Colheita	11,81	11,81	Variável	11,81	11,81		
Administração Agrícola	4,59	4,59	Fixo			4,59	4,59
Arrendamento da Terra	7,04	7,04	Variável	7,04	7,04		
Depreciação	1,91	1,91	Fixo			1,91	1,91
Juros	3,25	3,25	Fixo			3,25	3,25
Total Agrícola (R\$/ToneladadeCA)	42,14	42,14		32,39	32,39	9,75	9,75
Indústria				-			
Processamento	7,78	7,00	Variável	7,78	7,00		
Manutenção	3,64	3,64	Fixa			3,64	3,64
Administração	3,35	3,35	Fixa			3,35	3,35
Comercialização	0,28	0,28	Variável	0,28	0,28		
Depreciação	4,15	3,45	Fixa			4,15	3,45
Juros	9,50	8,17	Fixa			9,50	8,17
Total Indústria (R\$/ t cana-de-açúcar)	28,70	25,89		8,06	7,28	20,64	18,61
Agrícola+Indústria (R\$/ t cana-de-açúcar)	70,84	68,03		40,45	39,67	30,39	28,36
Kg de Açúcar e Litro de Etanol por t de CA	138,4	83,9		138,4	83,9	138,4	83,9
Custo Final	511,85	810,85		292,27	472,82	219,58	338,02
Unidade do Custo Final	R\$/t Açúcar	R\$/m3 etanol		R\$/t Açúcar	R\$/m3 etanol	R\$/t Açúcar	R\$/ m3 etanol

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Seabra (2008)

3.5.3 A decisão de produção de açúcar ou etanol

Uma abordagem razoável para explicar como os usineiros definem as proporções de açúcar e etanol que serão produzidas em uma safra é a da margem de contribuição. A margem de contribuição é calculada reduzindo-se do lucro líquido²² as parcelas de custos e despesas variáveis de produção (MARTINS, 2009).

Para verificar empiricamente essa abordagem, Lamounier, Campos e Bressan (2006) conduziram uma pesquisa na qual foi implementada uma análise visando identificar o efeito da variação dos preços do açúcar e do etanol na relação de produção das duas commodities. A análise se utilizou de um modelo de regressões aparentemente não relacionadas (ANR)²³.

Os resultados permitiram observar que os preços de açúcar e etanol afetaram a relação de produção em apenas alguns estados brasileiros e durante determinadas safras, ou seja, não ocorreu regularidade do efeito. Lamounier, Campos e Bressan (2006) também observaram que em alguns casos os aumentos no preço do açúcar levaram à diminuição da proporção da produção de açúcar, o que pode ser considerado surpreendente. O mesmo fenômeno também foi observado no caso da produção de etanol.

Em que pese o fato dos autores não terem considerado os efeitos dos atrasos de percepção, decisão e ação que são sistematicamente observados em sistemas similares, não se devem descartar outros aspectos a provável importância de outros aspectos, além da margem de contribuição. Com o propósito de explorar tais conclusões foi realizada uma pesquisa no Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração e Ciências Contábeis da Universidade de São Paulo que estudou o processo decisório dos usineiros com relação aos determinantes da produção de açúcar e etanol (DOLNIKOFF, GONÇALVES e PETHO, 2011); os resultados dessa pesquisa ainda não foram publicados.

²² O lucro líquido é o lucro bruto reduzido das despesas proporcionais às vendas e dos impostos.
²³ Em inglês a sigla é SUR, de *seemingly unrelated*

A Figura 37 apresenta o diagrama de influências elaborado por Dolnikoff, Gonçalves e Petho (2011), do processo decisório dos usineiros, que representa de maneira sintética o modelo mental dos autores sobre a questão.

O diagrama de influências apresentado na Figura 37 foi feito de acordo com a seguinte notação: uma decisão é representada por um retângulo de cantos retos (cor amarela); as incertezas são representadas por elipses (cor verde); e os resultados e fatores intermediários são representados por retângulos de cantos arredondados (cor azul).

Segundo o raciocínio dos autores, pode-se dizer que o resultado financeiro obtido pelos usineiros é função direta da produção de açúcar e da produção de etanol, e dos seus respectivos preços. Os preços são determinados pelo mercado. Já a produção de etanol e de açúcar é uma decisão que cabe ao usineiro, ou seja, está sob seu controle. A decisão do usineiro é influenciada por três conjuntos de fatores: a estratégia comercial; os parâmetros industriais; e os aspectos institucionais.

Figura 37 - Diagrama de Influências do modelo de decisão de produção de etanol e açúcar

Fonte: Dolnikoff, Gonçalves e Petho (2011)

A estratégia comercial dos usineiros é afetada por quatro aspectos, que são: a relação de preços entre o etanol e o açúcar; a garantia de reputação da empresa

perante a sociedade e os clientes; os contratos firmados com antecedência; e a aversão ao risco dos usineiros.

Os entrevistados pelos autores confirmaram que os produtores têm demonstrado preocupação com sua reputação; ou seja, não desejam que ocorra eventual escassez de açúcar ou etanol, bem como evitam que haja quebra de contratos pré-firmados. No mercado de açúcar, considerado mais maduro, há a predominância de venda da produção por meios de contratos de curto, médio e longo prazo. No mercado de etanol há uma menor tendência de venda da produção por contrato e uma maior tendência a venda no mercado *spot*; no mercado do etanol não foram identificados contratos de médio e longo prazo.

O segundo conjunto de fatores que afetam diretamente a decisão dos usineiros refere-se aos parâmetros industriais, que são: a quantidade plantada e a maturação da cana; a capacidade de processar cana; o balanço térmico da usina; e a produção de melaço.

A quantidade de cana é função da quantidade de hectares que foram plantados no ano anterior e das condições climáticas verificadas durante o período de maturação da planta. Note-se que a maturação da cana é afetada de forma importante pelo clima.

A capacidade de processamento é limitada tanto pela capacidade de moagem, quanto pela quantidade de cana-de-açúcar disponível para a colheita; ambas as limitações são parâmetros na determinação das quantidades de açúcar e etanol que serão produzidas.

O balanço térmico da usina se refere a um processo de otimização durante a operação, de forma a reduzir ao máximo o consumo de vapor normalmente gerado a partir de caldeiras próprias, que usam como fonte de energia o próprio bagaço de cana. Com o crescimento importante da cogeração de energia, a usina que conseguir economizar energia pode vendê-la no mercado de energia, prática que gera considerável receita (SEABRA, 2008).

A produção de melaço pode ser fruto de uma estratégia dos usineiros. Usinas com destilarias anexas podem utilizar tal estratégia em processo de extração de sacarose menos eficiente e mais barato, permitindo maior produção de melaço, o qual poderá ser usado como matéria-prima para a produção de etanol.

O terceiro conjunto de fatores que afetam diretamente a decisão dos usineiros refere-se aos aspectos institucionais, que são: visão do consumidor; visão dos grupos envolvidos, entre eles os próprios usineiros e outros atores do setor; e a visão e interferência do governo.

A visão do consumidor: com o advento do carro flex, o consumidor passou a apresentar uma resposta rápida às flutuações de preço do etanol; quando o preço do etanol aumenta acima da gasolina, os consumidores abastecem seus carros flex com gasolina e vice-versa. Para exemplificar a influência do consumidor, o desabastecimento de etanol, ocorrido ao final da década de 1980 foi considerado um dos fatores fundamentais na redução de venda de carros E-100, levando-as praticamente a zero ao final da década de 1990.

Os diversos grupos interessados no processo definem grandes interesses e, portanto, pressões importantes na decisão de produção. Um exemplo relevante desses interesses são os contratos com a Petrobrás para fornecimento de etanol anidro que é misturado à gasolina C, atualmente em proporção superior a 20%.

O governo sempre teve um papel relevante na indústria do açúcar e no programa do álcool. Embora sua interferência direta no setor tenha se reduzido a partir da liberação do mercado, ela ainda pode ser verificada, de forma direta ou indireta; naturalmente, os efeitos dessa pressão sofrem atrasos, naturais do processo. Um exemplo de pressão seria uma sinalização do estímulo do uso de gás natural veicular, que poderia reduzir de forma importante a demanda por etanol, levando os usineiros sérios problemas.

4 Aprendendo com trabalhos anteriores

Neste capítulo serão discutidos quatro modelos sobre a indústria da cana-de-açúcar. Dois desses modelos tem origem na teoria econômica neoclássica: o primeiro uma tese de doutoramento que estudou os preços internacionais do açúcar, e os preços nacionais do açúcar e do etanol (CAMPOS, 2010); e o segundo é o modelo “Teia de Aranha”²⁴ (MEADOWS, 1970) e (WIKIPEDIA, 2012). O terceiro modelo é apresentado sob a ótica do Pensamento Sistêmico apresentando a visão de Senge (2005) de um famoso artigo publicado na revista Science em 1968, *The Tragedy of Commons* (HARDIN, 1968); no quarto e último modelo é discutido o Diagrama Causal de um modelo de Dinâmica de Sistemas proposto por Sterman (2000), que é baseado em Meadows (1970).

4.1 Primeiro modelo: uma visão exógena para previsão de preços do açúcar e do etanol

Campos (2010) apresenta uma análise econométrica sobre os preços internacionais do açúcar e os preços do açúcar e do etanol no mercado interno. Em sua análise Campos atribui a fatores exógenos o comportamento dessas commodities. A Figura 38 apresenta um diagrama contendo a interpretação do autor desta tese aos argumentos da autora.

²⁴

O nome desse modelo em inglês é *COBWEB*.

A interpretação da visão da autora, capturada pelo diagrama, mostra que o preço internacional do açúcar é afetado por três fatores: índice geral de preços de commodities; efeitos idiossincráticos, que incluem produtividade e clima, entre outros; e pelos macrofatores internacionais, como taxa de juros internacionais, taxa de câmbio, liquidez e renda disponível no mercado internacional.

Os preços nacionais do açúcar e do etanol são afetados por três fatores: preço internacional do açúcar; efeitos idiossincráticos, que incluem produtividade e clima, entre outros; e pelos macrofatores nacionais, como taxa de juros nacionais, taxa de câmbio, liquidez e renda disponível no mercado nacional.

A visão exógena do problema frequentemente é questionada pelos estudiosos da área de Dinâmica de Sistemas, que entendem que, de maneira geral, os mercados de commodities têm como principais razões das suas oscilações históricas fundamentadas em fatores endógenos, e não exógenos (STERMAN, 2000).

Sterman (2000) argumenta que é verdadeiro que toda a economia flutua durante os ciclos econômicos, e que tais movimentos induzem flutuações nos mercados de commodities. Entretanto, muitos desses flutuam muito mais do que a economia como um todo, exibindo ciclos com períodos diferentes, períodos esses que não são observados nos ciclos econômicos. Ainda segundo Sterman (2000), isso sugere que a estrutura endógena de mercado da commodity em particular seja responsável pelo comportamento observado.

Na presente tese, os preços internacionais do açúcar serão mantidos exógenos; entretanto os preços do açúcar e do etanol no mercado interno serão obtidos de forma endógena.

4.2 Segundo Modelo: “Teia de Aranha”

O comportamento oscilatório de certos mercados é foco de estudo na teoria econômica. O modelo “*Teia de Aranha*” descreve comportamento cíclico da oferta e da demanda em mercados onde a quantidade produzida é definida antes que os preços possam ser observados. As expectativas que os produtores têm dos preços são admitidas pela observação dos preços históricos (WIKIPEDIA, 2012).

O modelo se baseia em uma diferença temporal entre as decisões da oferta e da demanda. Mercados ligados às atividades agrícolas são exemplos clássicos de

aplicação de modelo "Teia de Aranha", já que a decisão de plantar deve ser tomada antes da decisão do consumidor comprar.

Uma descrição gráfica da teoria é apresentada na Figura 39; admita-se que os fornecedores de certo produto cheguem ao mercado com uma quantidade Q_1 , inferior à quantidade de equilíbrio ($Q_{\text{equilíbrio}}$). Naturalmente, os preços daquele produto no mercado subirão, uma vez que os consumidores estão dispostos a consumir a quantidade de equilíbrio. O aumento dos preços anima os produtores a produzirem mais para a próxima safra, quando então oferecem a quantia Q_2 , maior do que a $Q_{\text{equilíbrio}}$. Como a oferta agora excede a demanda, os preços caem para P_2 . O ciclo se repete podendo conduzir a dois resultados: se a elasticidade-preço²⁵ da oferta for maior que o módulo da elasticidade-preço da demanda, o mercado tende a convergir para sua condição de equilíbrio; se a elasticidade-preço da oferta for menor que o módulo da elasticidade-preço da demanda, o mercado tende a divergir da sua condição de equilíbrio.

Figura 39 – Condições de convergência e divergência do modelo "Teia de Aranha"

Fonte: (WIKIPEDIA, 2012)

²⁵ Define-se elasticidade-preço da demanda (ou da oferta) E como a relação $E = \frac{dQ}{dP} \cdot \frac{P}{Q}$, donde P representa o preço da commodity e Q representa a quantidade.

A Tabela 8 – Relação entre as elasticidades da oferta e da demanda e o comportamento do sistema econômico no modelo "Teia de Aranha". A Tabela 8 resume a descrição do efeito da relação entre as elasticidades da oferta e da demanda no comportamento do sistema econômico.

Essa dinâmica gera grande interesse, estudo e discussão entre os economistas. A primeira vez que essa dinâmica foi formalmente discutida precede à existência da própria economia; Adam Smith em seu livro *A Riqueza das Nações*²⁶ descreve o comportamento dinâmico de um mercado, explicando a oscilação de preços e as razões da diferença entre o preço natural de um produto e o seu preço de mercado. Apesar de ser um assunto rico e interessante, por uma questão de escopo do trabalho, não se prosseguirá nas discussões que ocorrem no campo da teoria econômica sobre a dinâmica dos mercados de commodities.

Tabela 8 – Relação entre as elasticidades da oferta e da demanda e o comportamento do sistema econômico no modelo "Teia de Aranha".

Elasticidades	Comportamento
Oferta < Demanda	Estável (oscilação amortecida)
Oferta = Demanda	Indiferente (oscilação constante)
Oferta > Demanda	Instável (oscilação divergente)

Fonte: Meadows (1970)

O modelo "*Teia de Aranha*" estimula muitas discussões sobre vários aspectos importantes dos sistemas econômicos; entre eles: formações de expectativas, informação dos agentes, e racionalidade dos agentes. Para maior informação sobre o assunto, sugere-se Kaldor (1934) e (1938), Nerlove (1958), e Muth (1961).

4.3 Terceiro modelo: a tragédia dos comuns (*The tragedy of commons*)

A competição por recursos é uma questão central para vários aspectos tratados nesta tese. Sob o ponto de vista dos fatores de produção, a competição entre o açúcar e o etanol pelo uso da cana-de-açúcar é um exemplo dessa competição. Será visto posteriormente que o acoplamento da indústria do açúcar com a do etanol gera

²⁶

Livro I, Capítulo 7.

uma “tragédia dos comuns”. O capítulo 6 desta tese mostrará um caso onde a “Tragédia dos Comuns” afetará de maneira inesperada o resultado de uma política de incentivo.

A preocupação demonstrada por Ziegler em seu relatório na Assembléia-Geral das Nações Unidas (ZIEGLER, 2007) também pode ser compreendida pela “tragédia dos comuns”. O crescimento da produção agrícola para servir de matéria-prima para os biocombustíveis compete em recursos com a produção de comida. Se o consumo de recursos para esses dois fins se aproximar da capacidade máxima de terras produtivas do planeta, ou muito antes disso, haverá uma competição (guerra) por esses recursos.

Naturalmente, os preços dos dois produtos se elevarão e aquele que gerar melhor margem de contribuição terá prioridade sobre o outro, podendo gerar escassez de comida, deixando um rastro de fome pela terra (ZIEGLER, 2007).

O nome “tragédia dos comuns” foi criado por Garret Hardin em artigo publicado pela Revista Science em 1968 (HARDIN, 1968); neste artigo ele discute o conflito gerado pelo uso de um recurso comum por agentes independentes que buscam otimizar seus ganhos. Esse artigo gerou impacto e controvérsia por ser uma oposição à metáfora da “mão invisível” de Adam Smith (SMITH, 2000).

A essência do raciocínio de Hardin pode ser capturada por um Diagrama Causal apresentado na Figura 40, adaptado de Senge (2005).

No diagrama da Figura 41 podem ser vistas duas atividades: A e B. As malhas R1 e R2 mostram uma situação corriqueira onde quanto mais se obtém ganhos em uma atividade mais cresce o nível dessa atividade. Pode-se afirmar que isoladamente as atividades vão gerando ganhos cada vez maiores e níveis de atividades cada vez maiores.

Considerando que as duas atividades estão crescendo pode-se afirmar que o nível total de atividades também crescerá, levando a uma demanda maior por recursos. Os recursos limitantes, que no início eram considerados abundantes, passam agora a ser escassos, gerando pressão contrária ao crescimento da produção, pois aumentam de forma importante os custos de produção.

O crescimento do custo das atividades reduz seus ganhos líquidos. Pode-se observar que essa sequência de raciocínio permite concluir que duas novas malhas (B1 e B2) se fecham. Tais malhas representam a restrição das atividades A e B, em função da limitação de recursos. No artigo de Hardin ele se utiliza de raciocínio análogo para discutir a questão do crescimento populacional, com o consequente crescimento do consumo de recursos.

4.4 Quarto modelo: o modelo genérico do mercado de *commodities*

Esse item apresenta o modelo-geral do mercado de commodities proposto por Sterman (2000), que é baseado no modelo de Meadows (1970). O modelo-geral foi alterado pelo autor deste trabalho para contextualizá-lo a uma aplicação da área em estudo. O mercado escolhido como exemplo foi o mercado internacional de açúcar.

Sterman (2000), ao comentar o modelo “Teia de Aranha”, apresenta alguns requisitos que julga necessários em um modelo para representar os ciclos dos mercados de commodities:

- Representar a estrutura de níveis e vazões dos mercados reais, incluindo os estoques, produtos em processo, e a capacidade de produção;
- Representar os atrasos de percepção, decisão e ação dos atores; e

- Ser formulado em tempo contínuo²⁷.

No modelo-geral proposto por Sterman (2000) todos os fatores recomendados para uma modelagem adequada do mercado de commodities estão presentes. O Diagrama Causal da proposta de Sterman, adaptado ao mercado internacional do açúcar, é apresentado na Figura 41.

4.4.1 A linha de suprimentos do açúcar.

A parte superior do diagrama da Figura 42 representa a fabricação e o estoque de açúcar. A Taxa de Início de Produção de Açúcar representa o início do processo de produção do açúcar. De maneira simples poder-se-ia dizer que indica a quantidade de cana-de-açúcar que está sendo plantada em um determinado ano.

O processo de produção de açúcar é longo, começando no plantio da cana e se estendendo até o final do seu processamento na usina. O intervalo de tempo decorrido entre a plantação e o processamento do açúcar é normalmente superior a seis meses, gerando uma importante quantidade de produto em processamento. Enquanto o açúcar permanece no estado de produção, seja no campo ou na usina, ele está armazenado na variável Açúcar em Processo. Essa variável é calculada integrando-se, ao longo do tempo, a diferença entre a Taxa de Início de Produção de Açúcar e a Taxa de Produção de Açúcar.

A variável Taxa de Produção de Açúcar indica a quantidade de açúcar que sai do estado de “em processo” para o estado de “em estoque”, representando a quantidade de açúcar que sai do processo da usina e entra nos estoques de açúcar pronto para ser embarcado. Essa variável é calculada pela divisão entre o Açúcar em Processo e o Tempo de Produção de Açúcar.

A Taxa de Entrega de Açúcar representa a quantidade de açúcar que é entregue para consumo em um determinado período de tempo. Ela é limitada pela disponibilidade de açúcar em estoque (malha B0 - Disponibilidade) e pela Demanda de Açúcar, que expressa a quantidade de açúcar que os usuários desejam consumir.

²⁷ A formulação do modelo em tempo discreto inclui uma hipótese importante e de difícil visualização, que é o fato de que fica implicitamente assumido que o período de produção é igual ao passo de integração do modelo, o que nem sempre se verifica.

Figura 41 – Proposta de modelo geral para o mercado de açúcar

Fonte: Sterman (2000), adaptado pelo autor.

4.4.2 A malha B1 - Substituição

Quanto maior for o *Açúcar em Estoque* maior será o *Tempo de Cobertura do Estoque*²⁸. Maior tempo de cobertura resulta em menor *Preço do Açúcar*, o que aumenta o *Valor Relativo do Açúcar*, em relação a seus substitutos. Maior *Valor Relativo do Açúcar* leva a uma maior *Demanda de Açúcar*, admitindo que nem o *Poder de Compra* nem os *Fatores Técnicos e Sociais* se alteraram. Maior demanda leva a uma maior *Taxa de Entrega de Açúcar*, que reduz o *Açúcar em Estoque*. Essa é a descrição de uma malha de equilíbrio, identificada pela malha B1 – *Substituição*.

4.4.3 A malha B2 – Utilização de Capacidade

Após um tempo de atraso, necessário para o processamento das informações, o aumento do *Preço do Açúcar* também aumenta o *Resultado Esperado das Operações Correntes*²⁹, um bom resultado estimula os empresários a utilizar mais intensamente a capacidade produtiva existente, representada pela variável *Utilização das Usinas*, o que acontece depois de um atraso da ordem de algumas semanas ou meses. Com o aumento da *Utilização das Usinas*, há um aumento da *Taxa de Início de Produção de Açúcar*³⁰, com maior quantidade de *Açúcar em Processo*, com crescimento da *Taxa de Produção de Açúcar* e aumento do *Açúcar em Estoque*, e do *Tempo de Cobertura do Estoque*. Com a ampliação do tempo de cobertura, o *Preço do Açúcar* diminui, fechando nova malha de equilíbrio, representada no diagrama pela malha B2 – *Utilização de Capacidade*.

4.4.4 A malha B3 – Aquisição de Capacidade

Com um atraso de percepção bem maior, o aumento no *Preço do Açúcar* resulta em aumento no *Resultado Esperado da Nova Capacidade*, que inclui os custos necessários à expansão de capital. Com isso os empresários ficam propensos a expandir a capacidade de produção, com a construção de novas usinas representada

²⁸ Tempo de cobertura do estoque representa o intervalo de tempo que o estoque atual poderia atender à demanda, com interrupção da produção; é calculado pela razão entre o *Açúcar em Estoque* e a *Taxa de Consumo de Açúcar*

²⁹ O Resultado Esperado das Operações Correntes pode ser calculado de várias formas. Uma forma prática e comum é a Margem de Contribuição que resulta da diferença entre a Receita Líquida e a soma dos Custos e Despesas Variáveis (Martins, 2009).

³⁰ Por simplificação, esse modelo considera que o início da produção de açúcar acontece na plantação de cana-de-açúcar.

pela variável de mesmo nome. Com os demais parâmetros permanecendo constantes, o aumento no início de construção de usinas leva a um aumento do número de usinas em construção.

As usinas permanecem no estado em construção por um período que pode variar de meses a anos, dependendo da intensidade e tamanho da obra de ampliação. Usinas em construção são representadas no diagrama pela variável *Usinas em Construção*. Depois de um período médio de construção as usinas mudam de condição, passando para o estado de prontas, o que é representado pela variável *Término Construção de Usinas*. Maior número de usinas em construção resulta em um aumento no *Término Construção de Usinas*, com atraso.

Depois de prontas, as usinas passam ao estado de “em operação”, essa dinâmica é capturada no diagrama pela variável *Usinas em Operação*. Quanto maior a variável *Término Construção de Usinas*, maior será a quantidade de *Usinas em Operação*, o que acarreta no aumento da *Taxa de Início de Produção de Açúcar*.

As variáveis *Taxa de Início de Produção de Açúcar*, *Açúcar em Processo*, *Taxa de Produção de Açúcar*, *Açúcar em Estoque*, *Tempo de Cobertura do Estoque* e *Preço do Açúcar*, fecham outra malha de equilíbrio, a malha B3 – *Aquisição de Capacidade*.

Para concluir a descrição do diagrama, deve-se observar a obsolescência da capacidade de produção, representada pela variável *Obsolescência de Usinas*. Por exemplo, a uma *Taxa de Obsolescência das Usinas* constante de 5% ao ano, quanto mais *Usinas em Operação* maior será sua obsolescência, subtraídas as *Usinas em Operação*, reduzindo a capacidade produtiva da indústria.

5 Hipótese Dinâmica

O propósito deste capítulo é apresentar a Hipótese Dinâmica, que como visto no item 2.2.2, apresenta uma teoria com foco endógeno que explique as razões do comportamento considerado indesejável apresentado pelo sistema. Para atingir esse propósito serão apresentados a Tabela de Limites do Modelo; o Diagrama de Subsistemas; e o Diagrama Causal. Cada um desses passos apresenta a Hipótese com nível de detalhe maior.

Por uma questão de consistência, destaca-se que o Diagrama Causal aqui apresentado se restringe aos aspectos cobertos pelo modelo de simulação, que será apresentado no próximo capítulo, onde foram priorizadas as partes consideradas de maior relevância para explicar o comportamento.

5.1 Tabela de Limites do Modelo.

A Tabela de Limites do Modelo é apresentada na Tabela 9. Como o propósito da Carta é transmitir em alto nível os conceitos que foram incluídos de forma endógena ou exógena no modelo e aqueles que foram excluídos, ela não pretende ser exaustiva.

A Carta contém três colunas: a primeira delas grupa as variáveis endógenas, incluídas no modelo e que serão discutidas no próximo capítulo dessa tese; a segunda coluna grupa as variáveis exógenas, que afetam o modelo, mas que não são afetadas por ele, esse grupo é discutido com maior detalhe nesse capítulo; a terceira coluna grupa as variáveis excluídas, ou seja, aspectos relevantes mas que não fazem parte do foco do modelo, essas variáveis também são discutidas, uma vez que podem representar sugestão de pesquisas futuras, que contribuam para o conhecimento científico na área.

Tabela 9 – Tabela de Limites do Modelo.

Variáveis endógenas		Variáveis exógenas	Variáveis excluídas
1	Produção de cana-de-açúcar (t cana/ano)	Importações de açúcar (t cana/ano)	Taxa variação do PIB ³¹ mundial (%/ano)
2	Colheita de cana-de-açúcar (t cana/ano)	Importações de etanol (m ³ etanol/ano)	Taxa de variação do PIB do Brasil (%/ano)
3	Cana-de-açúcar madura (t cana)	Exportações de etanol (m ³ etanol/ano)	Limitações de uso da terra
4	Capacidade de moagem (t cana/ano)	Preço da gasolina (US\$/m ³ gasolina)	Conflito alimentos versus energia
5	Utilização da capacidade de moagem (adimensional)	Taxa de câmbio (R\$/US\$)	Aspectos ambientais
6	Decisão de produção açúcar ou etanol (adimensional)	Taxa de inflação do Brasil (%/ano)	Outras opções de combustível
7	Produção de açúcar (t açúcar/ano)	Custos totais do açúcar (US\$/t açúcar)	
8	Estoques de açúcar (t açúcar)	Custos totais do etanol (US\$/m ³ etanol)	
9	Consumo de açúcar (t açúcar/ano)	Vendas de carros gasolina (carros/ano)	
10	Produção de etanol (m ³ etanol)	Vendas de carros etanol (carros/ano)	
11	Estoques de etanol (m ³ etanol)	Vendas de carros flex (carros/ano)	
12	Consumo de etanol (m ³ etanol/ano)		
13	Demanda interna de açúcar (t açúcar/ano)		
14	Exportações de açúcar (t açúcar/ano)		
15	Demanda mundial de açúcar (t açúcar/ano)		
16	Demanda de etanol anidro (m ³ etanol/ano)		
17	Demanda de etanol hidratado (m ³ etanol/ano)		

³¹ Produto Interno Bruto

Variáveis endógenas	Variáveis exógenas	Variáveis excluídas
18	Previsão de demanda de cana (t cana/ano)	
19	Produtividade da terra (t cana/ha)	
20	Produtividade cana → etanol (m^3 etanol/t cana)	
21	Produtividade cana → açúcar (t açúcar/t cana)	
22	Preço do açúcar ao produtor (US\$/ t açúcar)	
23	Preço do açúcar ao consumidor (US\$/ t açúcar)	
24	Preço do etanol ao produtor (US\$/ m^3 etanol)	
25	Preço do etanol ao consumidor (US\$/ m^3 etanol)	

Fonte: Elaboração própria.

5.1.1 Variáveis exógenas

No modelo desenvolvido nesta tese, as onze variáveis exógenas podem ser divididas em quatro grupos: custos de produção; comércio internacional de etanol; importações de açúcar; e aquisição de veículos novos no Brasil.

A manutenção dos custos como uma variável exógena é uma importante limitação do modelo. Uma das hipóteses básicas desse trabalho é que os custos de produção afetam o preço, tanto do etanol quanto do açúcar. Em termos ideais esses custos deveriam ser endógenos ao modelo; entretanto, as informações sobre esses custos não estão disponíveis em períodos anteriores à safra 2006/2007.

A partir dessa safra, a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da USP, passou a publicar os custos de produção da indústria sucroalcooleira (CEPEA-ESALQ-USP, 2011). Andrade e Silva (2012) disponibilizou dados relativos aos custos de produção de cana-de-açúcar no período compreendido entre 1998 e 2011; embora sejam informações de valor, não foi possível ter-se uma informação de custos adequada somente com o preço da cana. Outras empresas também foram contatadas e informaram que possuem tais dados, mas que por questões contratuais ou políticas empresariais não poderiam fornecê-los.

A percepção do autor sobre o assunto é que a formação de custos da indústria pode ser representada por duas malhas de realimentação, representadas na Figura 42. A malha da esquerda, identificada como “Aprendizagem”, é uma malha de equilíbrio; a malha da direita, identificada como “Custo dos Insumos” é uma malha de reforço.

Considerando que outros fatores que influenciam no preço e não estão representados na figura permaneçam constantes, os *Custos de Produção* aumentarão se a malha da direita predominar, o que parece ter acontecido nas safras 2006/2007 a 2010/2011. Por outro lado, os *Custos de Produção* diminuirão se a malha da esquerda predominar. A predominância da malha da direita parece ter ocorrido de maneira significativa no período decorrido entre 1985 e 1999, como pode ser visto na Figura 43, copiada de Goldemberg et al. (2004).

Diante da limitação gerada por esse impasse, optou-se pela obtenção dos custos de maneira exógena, extrapolando-se dados recentes para o passado. Versões

futuras do modelo desenvolvido nessa tese podem focar nessa questão, melhorando o desempenho do modelo e expandindo sua aplicabilidade.

O segundo grupo de variáveis exógenas é o referente às importações e exportações de etanol. A Figura 44 apresenta a evolução das exportações e importações de etanol hidratado, no período de 1989 a 2009, tendo como fonte o Anuário Estatístico da Bioenergia (MAPA, 2011). Os dados mostram que a exportação de etanol combustível cresceu de maneira significativa no período decorrido entre 2003 e 2008, chegando a atingir valor acima de 5,1 milhões de m³ em 2009, contra uma produção brasileira de 25,7 milhões de m³ no mesmo ano.

A questão central é que o mercado externo do etanol sofre uma série de efeitos políticos, como por exemplo, as barreiras de importação dos Estados Unidos, que foram derrubadas no início de 2012. Pela relevância da influência de fatores que fogem ao interesse de estudo desta tese, e pela evolução incerta do mercado, onde o Brasil importou 74.000 m³ em 2010 e 1,1 milhões de m³ em 2011, optou-se por manter o mercado externo do etanol como uma variável exógena.

Figura 44 – Exportações e importações de etanol (1989 – 2009)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de MAPA (2011)

Se a expectativa otimista de crescimento das exportações demonstrada pelo setor (UNICA, 2011) se confirmar, essa poderia ser uma área de pesquisa adicional, podendo ser incluída em versões futuras do modelo.

O terceiro grupo de variáveis exógenas trata da importação de açúcar. A Figura 45 apresenta a evolução histórica das exportações e importações de cana-de-açúcar no período decorrido entre 1989 e 2009, tendo como fonte MAPA (2011). Observe-se que os dados foram mantidos no mesmo eixo para enfatizar que as exportações de açúcar predominam sobre as importações. Observando a questão sob a ótica das exportações líquidas de açúcar, e respeitando o princípio básico de que um modelo deve ser tão simples quanto possível, pode-se afirmar que é possível ter-se um bom entendimento da dinâmica da indústria mantendo-se as exportações de açúcar como variável endógena ao modelo e deixando-se as importações de açúcar como variável exógena.

Figura 45 – Exportações e importações de açúcar (1989 – 2009)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de MAPA (2011).

O quarto grupo de variáveis exógenas se refere aquisição de veículos novos no Brasil, composto por três variáveis: vendas de carro a gasolina; vendas de carro a etanol (E-100); e vendas de carros flex. A dinâmica da substituição dos carros a gasolina pelos carros a etanol; o retorno da preferência dos carros à gasolina; e a entrada no mercado do carro flex é rica e interessante. Entretanto, tal dinâmica está além do foco desse estudo, para o qual a demanda de cada tipo de combustível gerada por esses carros é suficiente.

Por essa razão e também respeitando o princípio da simplicidade do modelo, optou-se por manter a dinâmica de substituição das frotas (gasolina, etanol e flexfuel) fora do modelo, adotando as vendas de carros como variáveis exógenas. Para o leitor interessado na dinâmica da substituição da frota no Brasil, sugere-se a leitura de Santos et al. (2009) e de Santos e Martins (2011).

5.1.2 Variáveis excluídas.

As variáveis excluídas representam as fronteiras do modelo de simulação, delimitam os aspectos nos quais o modelo pode ser usado, e são de especial importância, pois sugerem caminhos de pesquisa posteriores (Sterman, 1981).

Taxa de variação do PIB mundial. A variação do PIB mundial não foi incluída no modelo uma vez que a demanda internacional de açúcar responde de maneira muito comportada à variação de população e a variação do consumo per capita de açúcar, modelado como um aumento anual percentual a taxa constante de variação. Resultados de simulações realizadas apresentaram diferença entre os Modos de Referência adotados e o comportamento das variáveis do modelo inferiores a 2%.

Taxa de variação do PIB do Brasil (%/ano). Como será visto posteriormente, a demanda interna de açúcar foi modelada da mesma forma que a demanda internacional. A demanda nacional também responde de forma comportada à variação da população e do consumo per capita, embora resultados de simulações realizadas apresentem diferenças máximas maiores entre os Modos de Referência usados e o comportamento das variáveis do modelo; tal variação atingiu um limite máximo de 10%.

Limitações de uso da terra. Limitações no uso da terra é tema muito controverso e tem sido amplamente discutida entre governos, órgãos internacionais e a comunidade científica. O foco deste trabalho não engloba o uso da terra, mas o autor julga que trabalhos nessa área possam ser de interesse dessas e outras comunidades, bem como de tomadores de decisão na área de políticas públicas.

Conflito alimentos versus energia. Esse é outro tema que tem sido amplamente discutido e parece ser ainda menos entendido. No Brasil, as plantações de cana-de-açúcar chegaram a ocupar pouco menos de 9,1 milhões de hectares, representando aproximadamente 14,85% da área total plantada do país (IBGE, 2011),

o que pode ser considerado como uma extensão apreciável. O Brasil, entretanto, ainda parece longe de atingir sua fronteira agrícola, não se tendo notícias de restrições de expansão do setor sucroalcooleiro devido à escassez de terra; por essa razão deixa-se o tratamento dessa questão para pesquisas posteriores.

Aspectos ambientais. Além do uso da terra e do possível conflito entre combustíveis e alimentos, há outros aspectos ambientais interessantes a serem discutidos; entre eles a redução na emissão de CO₂ que a substituição do combustível fóssil acarreta e como isso pode ser explorado expandindo os conceitos apresentados nesta tese e usando a estrutura de níveis e vazões para disparar emissões de CO₂, permitindo comparações dinâmicas de vários cenários.

Outras opções de combustível. O modelo não inclui considerações sobre uso de fontes alternativas de combustível, tais como, o gás natural ou hidrogênio, e mesmo a inserção no país do carro elétrico. Sem dúvida uma política pública que estimulasse o uso de qualquer outra opção de combustível teria um importante impacto na dinâmica da indústria sucroalcooleira.

5.2 Diagrama de Subsistemas

Para tornar mais fácil a compreensão da estrutura do sistema, primeiro será apresentada sua estrutura em grandes blocos, que serão chamados de setores, onde estão incluídos os diversos módulos do modelo. A Figura 46 apresenta o diagrama de setores do modelo, e a Tabela 10 apresenta a definição de cada um deles.

Tabela 10 – Definições dos setores.

Nome do setor	Definição
Setor agrícola	Inclui as fazendas envolvidas na parte agrícola do processamento da cana-de-açúcar. Esse setor é responsável pela produção de cana-de-açúcar, oferecendo essa matéria-prima ao setor industrial quando estiver disponível e for demandada. Não se faz distinção no modelo se a origem da cana produzida é própria ou de terceiros.

Nome do setor	Definição
	Inclui as indústrias envolvidas no processamento da cana-de-açúcar, sendo responsável pela produção de açúcar ou etanol. Esse setor toma as decisões de expandir ou não sua capacidade de produção, a taxa em que tal capacidade deverá ser utilizada, e também qual o mix de produtos, açúcar ou etanol, deverá ser produzido no período.
	Com o Setor Agrícola, ele demanda cana-de-açúcar como matéria-prima. Os custos de aquisição de cana são embutidos nos custos de produção do etanol e do açúcar, ficando implícitos no modelo.
Setor industrial	Com o Setor População e Indústrias Brasileiras, esse setor fornece açúcar ao mercado interno, recebendo como retribuição recursos financeiros.
	Com o Setor dos donos de veículos automotores de Ciclo Otto, o Setor Industrial oferece etanol anidro e hidratado, recebendo em troca recursos financeiros.
	Com o Setor Internacional, o Industrial exporta e importa etanol e exporta e importa açúcar, neste último caso recebendo recursos financeiros.
Setor População e Indústrias Brasileiras	Esse setor representa todos os segmentos da sociedade brasileira que demandam açúcar, sejam eles pessoas físicas ou indústrias de transformação.
Setor dos donos de veículos automotores de Ciclo Otto	Inclui os donos de veículos automotores leves, sejam eles a gasolina, etanol ou <i>flexfuel</i> . Esse setor é responsável pela decisão de usar gasolina ou etanol, tomando por critério de decisão os preços relativos desses combustíveis.
Setor Internacional	Inclui todos os negócios internacionais feitos com o Setor Industrial.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 47 apresenta o Diagrama de Subsistemas; o modelo de simulação contém vinte e três módulos relativos à dinâmica do sistema em estudo; entretanto, por ênfase na expressividade do modelo, optou-se que o Diagrama de Subsistemas tenha apenas dezesseis módulos, representadas por retângulos. As variáveis exógenas relevantes são apresentadas sem contorno e contém a expressão exógena entre parêntesis abaixo do nome da variável. As setas representam relação entre módulos sendo que a origem indica o módulo que contém a variável (eis) que afeta (m) o (s) módulo (s) de destino.

A variável exógena *Custos Totais de Produção* é representada duas vezes no diagrama, com o propósito de reduzir o congestionamento e facilitar a compreensão; para destacar tal exceção, em uma das representações a variável é apresentada entre sinais de “< >” e é representada na cor cinza.

Os setores apresentados anteriormente são compostos por módulos, e cada um desses módulos é chamado nesta tese de subsistema. A Tabela 11 relaciona os módulos aos setores a que pertencem.

Tabela 11 – Relação dos módulos aos setores do modelo

Setor	Módulos
Agrícola	Produção e Estoque de Cana Previsão de Demanda de Cana
Industrial	Produção e Estoque de Açúcar Produção e Estoque de Etanol Custos de Produção Utilização de Capacidade Capacidade Industrial de Produção Capacidade Desejada de Moagem Decisão Etanol ou Gasolina Demanda Total de Cana Encomendas de Açúcar Preço do Açúcar Preço do Etanol
População e Indústrias Brasileiras	Demanda Doméstica de Açúcar (Mercado Interno)
Donos de veículos automotores de Ciclo Otto	Frota Carros Gasolina Frota Carros Flex Frota Carros Etanol Demanda Natural de Etanol Anidro Demanda Natural de Etanol Hidratado Decisão de uso de Combustível
Internacional	Demanda Açúcar Externo Consumo Mundial de Açúcar

Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 – Diagrama de subsistemas do modelo

Fonte: Elaboração própria.

5.3 Diagrama Causal

A Figura 48 apresenta o Diagrama Causal do Sistema, no qual se destacam quatro linhas de suprimento e sete malhas de realimentação principais, identificadas nominalmente no diagrama. As linhas de suprimento são: capacidade industrial³²; linha de suprimento de cana-de-açúcar; linha de suprimento do açúcar; e linha de suprimento do etanol. As sete malhas de realimentação são: “Utilização Capacidade Açúcar”; “Utilização Capacidade Etanol”; “Nova Capacidade Industrial Açúcar”; “Nova Capacidade Industrial Etanol”; “Atratividade Produção Açúcar”; “Atratividade Produção Etanol”; e “Substituição”.

5.3.1 Linha de suprimento da capacidade industrial

É composta pela *Nova Capacidade Industrial*, *Capacidade Industrial*, e *Perda de Capacidade Industrial*. A *Nova Capacidade Industrial* é afetada, com atraso de percepção, decisão e ação, pela *Expectativa de Lucro de Capacidade Industrial Adicional do Açúcar* e pela *Expectativa de Lucro de Capacidade Industrial Adicional do Etanol*. Os atrasos grifados acima são importantes, pois geram efeitos dinâmicos.

Uma situação ocorrida em um instante $[t]$ será percebida depois de algum tempo $[t+DT1]$; há um processo de tomada de decisão de investimento, que consome certo tempo, sendo que a decisão final é tomada no instante de tempo $[t+DT1+DT2]$; após a tomada de decisão são tomadas as ações necessárias para a encomenda de Nova Capacidade Industrial, que finalmente tem efeito em um instante de tempo $[t+DT+DT2+DT3]$, que ocorre muito depois do instante $[t]$ original. Mais ainda, a construção de capacidade leva tempo para ocorrer, pois a construção de capacidade industrial para processamento de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol leva meses ou anos para acontecer. Desta forma, uma realidade de mercado, altamente dinâmica que acontece no instante $[t]$ só terá uma resposta, em termos de capacidade industrial, anos depois, quando a situação de mercado pode ser diferente.

³² Por capacidade industrial entende-se a capacidade de moagem e a produção de açúcar e etanol.

Figura 48 – Diagrama Causal

Fonte: Elaboração própria

A variável Capacidade Industrial representa o acúmulo da diferença entre a Nova Capacidade Industrial e a Perda de Capacidade Industrial, representando quanto de cana-de-açúcar pode ser processado em determinado ano. A variável Perda de

Capacidade Industrial representa as perdas de capacidade de produção por obsolescência, uma vez que as usinas perdem produtividade ao longo do tempo.

5.3.2 Linha de suprimento da cana-de-açúcar

é composta pela Plantação de Cana, Estoque de Cana Madura, e Colheita de Cana. A Plantação de Cana é função de três variáveis: Previsão de Demanda de Cana, que é calculada a partir de valores passados de demanda total de cana-de-açúcar; Capacidade Industrial, que será discutida a seguir; e Utilização de Capacidade Industrial, calculada a partir da média ponderada da Utilização de Capacidade Industrial Açúcar e Utilização de Capacidade Industrial Etanol, usando como pesos de ponderação a fração histórica de utilização de cada uma desses produtos. Pode ser observado que o Estoque de Cana Madura, impõe uma restrição à produção de etanol e açúcar, como indicado pela variável Limites de Produção de Açúcar e Etanol.

5.3.3 Linha de suprimento do açúcar

Essa linha inclui a *Produção de Açúcar*, o *Estoque de Açúcar* e as *Entregas de Açúcar*. A *Produção de Açúcar* é uma função do *Limite a Produção de Açúcar e Etanol*, imposto pela *Capacidade Industrial* e pelo *Estoque de Cana Madura* que está pronta para ser colhida; é também função da *Utilização de Capacidade Industrial Açúcar*; da *Produtividade Cana para Açúcar*, expressa pela quantidade de açúcar que é produzido a partir de uma tonelada de cana, adotado como constante no modelo; e da razão entre a *Atratividade para Produzir Açúcar* e *Atratividade Total dos Produtos*, razão essa que define o percentual de cana que será transformado em açúcar.

A variável *Estoque de Açúcar* acumula a diferença entre a *Produção de Açúcar* e as *Entregas de Açúcar* representando os estoques físicos do produto ao longo do tempo. A variável *Entregas de Açúcar* representa o açúcar que é embarcado para os consumidores, sejam eles nacionais ou internacionais. Essa variável é função da *Demanda Total de Açúcar*, sendo limitada pela disponibilidade de estoque físico.

5.3.4 Linha de suprimento do etanol

Essa linha de suprimento tem comportamento similar à do açúcar e inclui a *Produção de Etanol*, o *Estoque de Etanol* e as *Entregas de Etanol*. A *Produção de Etanol* é uma função do *Limite a Produção de Etanol e Açúcar*, imposto pela *Capacidade*

Industrial e pelo *Estoque de Cana Madura* que está pronta para ser colhida; é também função da *Utilização de Capacidade Industrial Etanol*; da *Produtividade Cana para Etanol*, expressa pela quantidade de etanol que é produzido a partir de uma tonelada de cana, adotado como constante no modelo; e da razão entre a *Atratividade para Produzir Etanol* e *Atratividade Total dos Produtos*, razão essa que define o percentual de cana que será transformado em etanol.

A variável *Estoque de Etanol* acumula a diferença entre a *Produção de Etanol* e as *Entregas de Etanol* representando os estoques físicos do produto ao longo do tempo. A variável *Entregas de Etanol* representa o etanol que é embarcado para os consumidores, sejam eles nacionais ou internacionais. Essa variável é função da *Demanda Doméstica de Etanol* somada às *Exportações Líquidas de Etanol* sendo limitada pela disponibilidade de estoque físico do produto.

Apresentadas as quatro estruturas de cadeia de suprimentos, serão detalhadas as sete malhas de realimentação apresentadas no Diagrama Causal.

5.3.5 Malha de Substituição.

A Figura 49 apresenta a malha de *Substituição* em destaque. Considerando um acréscimo no *Estoque de Etanol*, tem-se um aumento na *Cobertura de Estoque do Etanol*, o que leva a um decréscimo no *Preço do Etanol*, que aumenta o *Valor Relativo do Etanol* em relação a seu substituto (a gasolina) fazendo com que a *Demanda Doméstica de Etanol* cresça, incrementando as *Entregas de Etanol*, o que faz reduzir o *Estoque de Etanol*. Como visto em capítulo anterior, essa descrição remete a uma malha de equilíbrio, indicado na figura pela letra “B”.

Figura 49 – Detalhe da malha de Substituição

Fonte: Elaboração própria.

5.3.6 Malha de Utilização de Capacidade Industrial do Açúcar.

A Figura 50 apresenta a malha *Utilização Capacidade Açúcar*. Considerando inicialmente um aumento no *Estoque de Açúcar* tem-se um acréscimo na *Cobertura de Estoque de Açúcar*, que leva a um decréscimo do *Preço do Açúcar*, com atraso³³. A redução no *Preço do Açúcar* reduz, com atraso, a *Expectativa de Lucro Operações Correntes do Açúcar*. Com o decréscimo da *Utilização de Capacidade Industrial Açúcar*, a redução da *Produção de Açúcar* e, finalmente, com uma queda no *Estoque de Açúcar*, contrapondo o crescimento inicial. Essa descrição leva à conclusão que essa é uma malha de equilíbrio, identificada na figura com a letra “B”.

Figura 50 – Malha *Utilização Capacidade Açúcar*

Fonte: Elaboração própria.

³³ Para facilitar a visualização, na Figura 50 foram destacadas as relações causais (setas) que contêm atrasos.

5.3.7 Malha de Utilização de Capacidade Industrial do Etanol.

A Figura 51 apresenta a malha *Utilização Capacidade Etanol* em detalhe. Considerando inicialmente um aumento no *Estoque de Etanol* tem-se um acréscimo na *Cobertura de Estoque do Etanol*, que leva a um decréscimo do *Preço do Etanol*. Esse decréscimo de preço reduz a *Expectativa de Lucro Operações Correntes do Etanol*, com atraso. A redução na expectativa de lucro das operações correntes leva à uma redução de *Utilização de Capacidade Industrial Etanol*, também com atraso. O efeito da redução da utilização de capacidade é o decréscimo da *Produção de Etanol* e, finalmente, uma queda no *Estoque de Etanol*, contrapondo o crescimento inicial. Essa descrição leva à conclusão que essa é uma malha de equilíbrio, identificada na figura com a letra “B”.

5.3.8 Malha de Nova Capacidade Industrial para Açúcar.

A Figura 52 apresenta a malha *Nova Capacidade Industrial para Açúcar*. Admitindo um acréscimo no *Estoque de Açúcar* haverá um aumento na *Cobertura de Estoque do Açúcar*, com a redução do *Preço Açúcar*, que diminui a *Expectativa de Lucro de Capacidade Industrial Adicional do Açúcar*, com atraso. A redução da expectativa de lucro da capacidade adicional acarreta no decréscimo da *Nova Capacidade Industrial* levando ao decréscimo da *Capacidade Industrial*, reduzindo os *Limites à Produção de Etanol e Açúcar*. A redução nos limites de produção diminui a *Produção Açúcar*, que reduz o *Estoque de Açúcar*, o que contrapõe ao aumento inicial. Essa descrição leva à conclusão que essa é uma malha de equilíbrio, identificada na figura com a letra “B”.

Figura 52 – Detalhe da malha *Nova Capacidade Industrial para Açúcar*.

5.3.9 Malha de Nova Capacidade Industrial para Etanol.

A Figura 53 apresenta um detalhe da malha *Nova Capacidade Industrial para Etanol*. Admitindo um acréscimo no *Estoque de Etanol* haverá um aumento na *Cobertura de Estoque de Etanol*, com a consequente redução do *Preço Etanol*. A redução de preço diminui a *Expectativa de Lucro de Capacidade Industrial Adicional do Etanol*, com atraso. A redução na expectativa de lucro de nova capacidade diminui a atratividade do negócio o que leva a um decréscimo nas encomendas de *Nova Capacidade Industrial* levando ao decréscimo da *Capacidade Industrial*, reduzindo os *Limites à Produção de Etanol e Etanol*, que diminui a *Produção Etanol*, que reduz o *Estoque de Etanol*, o que contrapõe ao aumento inicial. Essa descrição leva à conclusão que essa é uma malha de equilíbrio, identificada na figura com a letra “B”.

5.3.10 Malha de Atratividade Produção Açúcar.

A Figura 54 apresenta as duas malhas de *Atratividade Produção Açúcar*. Na primeira delas um aumento no *Estoque de Açúcar* acarreta aumento na *Cobertura de Estoque do Açúcar*, que reduz a *Atratividade para Produzir Açúcar*, que diminui a *Produção de Açúcar*, que resulta em contraposição ao aumento inicial do *Estoque de Açúcar*. Esse ciclo fecha a malha *Atratividade de Produção de Açúcar por Estoque*.

Na outra malha destacada tem-se que partindo de um aumento do *Estoque de Açúcar* há um acréscimo na *Cobertura de Estoque do Açúcar*, que reduz o *Preço do Açúcar*, diminuindo a *Expectativa de Lucro Operações Correntes do Açúcar*, o que decresce a *Atratividade para Produzir Açúcar*. A partir daí essa malha segue o mesmo percurso da malha anterior, fechando-se uma malha de realimentação negativa denominada *Atratividade para Produzir Açúcar por Preço*.

5.3.11 Malha de Atratividade Produção Etanol.

A Figura 55 apresenta as duas malhas de *Atratividade Produção de Etanol*. Na primeira delas um aumento no *Estoque de Etanol* acarreta aumento na *Cobertura de Estoque de Etanol*, que reduz a *Atratividade para Produzir Etanol*, que diminui a *Produção de Etanol*, que resulta em contraposição ao aumento inicial do *Estoque de Etanol*. Esse ciclo fecha a malha *Atratividade de Produção de Etanol por Estoque*.

Na outra malha destacada tem-se que partindo de um aumento do *Estoque de Etanol* há um acréscimo na *Cobertura de Estoque do Etanol*, que reduz o *Preço do Etanol*, diminuindo a *Expectativa de Lucro Operações Correntes do Etanol*, com atraso. Essa redução da expectativa de lucro leva a um decréscimo da *Atratividade para Produzir Etanol*. A partir daí essa malha segue o mesmo percurso da malha anterior, fechando-se uma malha de realimentação negativa denominada *Atratividade para Produzir Etanol por Preço*.

A lógica de incluir tanto a cobertura de estoque, quanto a margem de contribuição para definir a atratividade do açúcar e do etanol não é unânime. Nassar

(2011)³⁴, que é o líder do grupo que fez o Brazilian Land Use Model (BLUM), pontuou que o BLUM modela essa decisão usando apenas a informação de preço tanto do açúcar quanto do etanol, e que o mercado se ajusta, procurando o equilíbrio. Apesar dessa informação relevante, optou-se usar as duas variáveis que normalmente tem forte relação causal, para manter o modelo robusto em situações atípicas, como por exemplo, aumentos desproporcionais de preços, causados por decisões políticas.

³⁴ Informação pessoa recebida de André Nassar, do Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais (ICONE) durante o 1º Brazilian Bioenergy Science and Technology Conference, realizado em Campos do Jordão no período de 14 a 18 de agosto de 2011.

6 Modelo de simulação

O propósito deste capítulo é apresentar o modelo de simulação desenvolvido para estudar a indústria da cana-de-açúcar. Para atingir tal propósito são apresentadas três seções: apresentação do modelo; apresentação dos resultados; e testes do modelo.

Na apresentação do modelo é feita uma introdução a seus módulos, aos parâmetros principais, e ao software de simulação; em seguida é apresentado um exemplo de descrição de um dos módulos. O Apêndice A contém os Diagramas de Forrester e as respectivas equações de todos os módulos do modelo. Para garantir a consistência do texto dessa tese com o modelo e facilitar o entendimento do leitor, as equações apresentadas neste capítulo seguem o número próprio definido pelo software de simulação e tal número não foi alterado. Para destacar tal fato essas equações são referenciadas por números entre parênteses.

Na apresentação dos resultados foram escolhidas oito variáveis consideradas as mais relevantes. Para cada uma delas são apresentados: os gráficos de comportamento ao longo do tempo, as curvas de erro percentual; e os coeficientes de desigualdade de Theil. Entende-se que desta forma é possível conduzir uma avaliação completa do comportamento do modelo frente aos dados utilizados como Modos de Referência.

Na apresentação dos testes do modelo são feitas considerações sobre as características do modelo quanto ao seu potencial de estimular a reflexão, e são apresentadas discussões sobre os testes proposto no Capítulo 2 desta tese.

6.1 Apresentação do modelo.

O modelo de simulação contém 329 equações, divididas em 25 módulos, de forma a permitir seu gerenciamento e melhor visualização. Do total de módulos, vinte e três deles são dedicados aos Diagramas de Forrester e suas equações, um deles é composto de uma interface de calibração, e um deles tem o propósito de apresentar as variáveis de controle. A relação de módulos está apresentada na Tabela 12.

Os critérios usados para a divisão dos módulos foram os consagrados na área de Análise de Sistemas: baixo acoplamento e alta coesão. O primeiro critério

estabelece que um módulo deva ter a capacidade de fazer uma tarefa de forma completa; e o segundo estabelece que os módulos devam ser separados de forma a minimizar o número de dependências externas.

O modelo foi desenvolvido com o software de simulação VENSIM DSS for Windows Version 5.11A, da Ventana Systems, Inc., projetado para desenvolver modelos de Dinâmica de Sistemas.

Tabela 12 – Relação de módulos do modelo.

Código	Nome do módulo
M00000	Parâmetros de Controle
M00100	Produção e estoque de Cana.
M00200	Previsão de Demanda de Cana.
M00300	Produção e Estoque de Açúcar.
M00400	Produção e Estoque de Etanol.
M00500	Custos de Produção.
M00600	Utilização de Capacidade Industrial.
M00700	Capacidade de Produção Industrial.
M00800	Capacidade Desejada de Produção Industrial.
M00900	Decisão de Produção - Açúcar ou Etanol.
M01000	Demanda Total de Cana, Açúcar e Etanol.
M01100	Encomendas de Açúcar no Mercado Interno.
M01200	Demanda Natural de Açúcar no Mercado Interno.
M01300	Demanda de Açúcar Brasileiro no Mercado Externo.
M01400	Consumo Mundial de Açúcar.
M01500	Preço do Açúcar.
M01600	Frota de Carros a Gasolina.
M01700	Frota de Carros Flex.
M01800	Frota de Carros Etanol.
M01900	Demanda Natural de Etanol Anidro.
M02000	Demanda Natural de Etanol Hidratado.
M02100	Preço do Etanol.
M02200	Decisão de Uso de Etanol em Carros Flex.
M23000	Preço do Açúcar para Decisão.
M02400	Interface de Calibração.

Fonte: Elaboração própria.

6.1.1 Módulo M00000 – Variáveis de Controle

O módulo de variáveis de controle tem o propósito de explicitar os parâmetros de controle escolhidos para a execução das simulações. A Figura 56 apresenta uma visão desse módulo onde é possível identificar os valores das variáveis de controle, que também são apresentados na Tabela 13, nas equações numeradas de (001) a (004).

Figura 56 – Visão das Variáveis de Controle com seus Valores.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 13 – Equações do Módulo M00000 – Variáveis de Controle

.Control	
Simulation Control Parameters	
(001)	<p>FINAL TIME = 2010</p> <p>Units: Year</p> <p>The final time for the simulation.</p>
(002)	<p>INITIAL TIME = 1980</p> <p>Units: Year</p> <p>The initial time for the simulation.</p>
(003)	<p>SAVEPER = TIME STEP</p> <p>Units: Year [0,?]</p> <p>The frequency with which output is stored.</p>
(004)	<p>TIME STEP = 0.0078125</p> <p>Units: Year [0,?]</p> <p>The time step for the simulation.</p>

Fonte: Elaboração própria.

6.1.2 Módulo M00100 – Produção e Estoque de Cana

A Figura 57 apresenta o Diagrama de Forrester do módulo M00100 – Produção e Estoque de Cana. As equações referentes a esse módulo são apresentadas na Tabela 14.

O processo real se inicia pela plantação da cana-de-açúcar no campo; essa dinâmica é capturada pela variável *Plantação de Cana* [Equação (019)], que representa o ato do plantio. A plantação de cana é definida pela multiplicação da *Capacidade Industrial em Operação* multiplicada pela *Utilização de Capacidade*, tendo como seu limite inferior o valor “0” e seu limite superior a *Previsão de Demanda Total de Cana* [Equação (019)]. O limite inferior garante a robustez do modelo, impondo que não haverá solicitações de plantio negativo. O limite superior é imposto pelo fato que não há sentido em se plantar cana que não poderá ser processada.

As variáveis *MR Plantação de Cana* [Equação (018)] e *Erro % Plantação de Cana* [Equação (018)] são variáveis suplementares; e forma incluídas no modelo para permitir a comparação entre o MR e a *Plantação de Cana*.

Durante o período de tempo em que a cana amadurece no campo fica caracterizado um estado no processo produtivo. Essa dinâmica é capturada pela variável *Cana em Maturação* [Equação (006)], que integra a diferença entre a plantação de cana e a cana que fica madura, e deverá ser colhida; o valor inicial desta variável de estado é definido pela [Equação (007)] *Cana em Maturação (1980)*.

Após o período de amadurecimento, a cana deve ser colhida. Essa dinâmica é capturada pela variável *Maturação de Cana* [Equação (016)], que representa o fluxo de cana que passa do estado de em maturação para o estado de madura. Como esse processo é suave na natureza ele também é representado de forma suave no modelo, que usa um atraso de terceira ordem na equação; esse atraso tem como parâmetro o *Tempo Médio de Maturação de Cana* [Equação (021)]. A maturação de cana é limitada pela quantidade de cana em maturação no campo, garantindo que nunca haverá a situação de um valor negativo para a variável *Cana em Maturação*, impossível de ocorrer fisicamente.

Prosseguindo-se na linha de suprimentos, encontra-se a variável *Cana Madura* [Equação (008)]. Esta é outra variável de estado que integra a diferença entre a *Maturação de Cana* e a *Colheita de Cana*, e captura a cana que está pronta no campo para ser colhida. Tem seu valor inicial definido por *Cana Madura (1980)* [Equação (009)].

A seguir, tem-se a variável *Colheita de Cana* [Equação (011)] que representa a fluxo de cana-de-açúcar que deixa os canaviais e é enviado para as usinas. A colheita é definida pela menor de duas variáveis: *Colheita Max de Cana* [Equação (013)] e a *Colheita de Cana Desejada* [Equação (012)] que representa o quanto de cana que se deseja colher em um determinado período de tempo. A colheita máxima representa o fluxo máximo de cana; ela é calculada pela divisão entre a quantidade de cana madura existente no campo e o *Tempo Min Entrega de Cana* [Equação (023)].

A variável *MR Colheita de Cana* [Equação (017)] representa o Modo de Referência para a colheita de cana e captura dados em uma planilha externa. A

variável *Erro % Colheita de Cana* [Equação (014)] é usada para calcular o erro percentual entre o comportamento do modelo e os dados coletados.

A variável *Colheita de Cana Desejada* expressa quanto de cana as usinas desejam receber em um determinado instante de tempo, sendo igual à *Demanda Total de Cana*, que é calculada em outro módulo e será apresentada posteriormente.

A variável *Ajuste de Cana Desejado* [Equação (005)] representa a quantidade de cana que deve ser adicionada para que os canaviais existentes possam atender adequadamente à demanda. Ela é calculada pelo produto da *Colheita de Cana Desejada* pela *Cobertura de Estoque Desejada Cana*; desse produto é subtraída a quantidade de cana madura existente; essa diferença é dividida pelo *Tempo de Ajuste de Estoque de Cana* [Equação (020)] uma vez que não é possível anular essa discrepância de forma instantânea.

A variável *Cobertura de Estoque Desejado* [Equação (010)] representa o tempo que a indústria deseja poder atender à demanda, mesmo que a produção pare. Quanto maior for esse intervalo de tempo, maior deverá ser a cobertura de estoque, e vice-versa. Raciocínio similar pode ser aplicado à demanda, pois quanto maior o fluxo de cana que deixa as fazendas, maior quantidade de cana deverá haver no campo, de forma a garantir o fornecimento por um intervalo de tempo pré-determinado.

Tabela 14 – Equações do módulo M00100 – Produção e Estoque de Cana

.M00100	
(005)	$\text{Ajuste de Estoque de Cana} = \frac{(\text{Colheita de Cana Desejada} * \text{Cobertura de Estoque Desejado Cana-Cana Madura})}{\text{Tempo de Ajuste de Estoque de Cana}}$ <p>Units: Ton Cana/Ano</p>
(006)	$\text{Cana em Maturacao} = \text{INTEG} (\text{Plantacao de Cana-Maturacao de Cana, "Cana em Maturacao (1980)"})$ <p>Units: Ton Cana</p>
(007)	$\text{"Cana em Maturacao (1980)"} = 1.23681e+008$ <p>Units: Ton Cana</p>

- (008) Cana Madura= INTEG (
Maturacao de Cana-Colheita de Cana, "Cana Madura (1980)")
Units: Ton Cana
- (009) "Cana Madura (1980)"=1e+008
Units: Ton Cana [?,1e+009,1e+008]
Valor Base Calibrado = 1e+008
- (010) Cobertura de Estoque Desejado Cana=1
Units: Ano
- (011) Colheita de Cana=
MIN(Colheita Max de Cana, Colheita de Cana Desejada)
Units: Ton Cana/Ano
- (012) Colheita de Cana Desejada= Demanda Total de Cana
Units: Ton Cana/Ano
- (013) Colheita Max de Cana=
Cana Madura/Tempo Min Entrega de Cana
Units: Ton Cana/Ano
- (014) "Erro % Colheita de Cana"=
(Colheita de Cana-MR Colheita de Cana)/MR Colheita de Cana
Units: Dmnl
- (015) "Erro % Plantacao de Cana"=
(Plantacao de Cana-MR Plantacao de Cana)/MR Plantacao de Cana
Units: Dmnl
- (016) Maturacao de Cana=
MIN(Cana em Maturacao/Tempo Min de Maturacao da Cana,
DELAY3(Plantacao de Cana, Tempo Medio de Maturacao da Cana))
Units: Ton Cana/Ano
- (017) MR Colheita de Cana:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Producao_Cana' , 'A' , 'E2')
Units: Ton Cana/Ano
- (018) MR Plantacao de Cana:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Producao_Cana' , 'A' , 'E2')
Units: Ton Cana/Ano

.M00100	
(019)	Plantacao de Cana= $\text{MAX}(0, \text{MIN}(\text{Previsao de Demanda Total de Cana}, \text{Capacidade Industrial em Operacao} * \text{Utilizacao de Capacidade}) + \text{Ajuste de Estoque de Cana})$ Units: Ton Cana/Ano
(020)	Tempo de Ajuste de Estoque de Cana=2 Units: Ano
(021)	Tempo Medio de Maturacao da Cana=0.5 Units: Ano
(022)	Tempo Min de Maturacao da Cana= 0.25 Units: Ano
(023)	Tempo Min Entrega de Cana= 0.2 Units: Ano

Fonte: Elaboração própria.

6.1.3 Módulo M02400 – Interface de Calibração

A Figura 58 – Visão da Tela do Módulo M02400 – Interface de Calibração. apresenta uma visualização do módulo M02400 – Interface de Calibração capturada diretamente da tela do software de simulação. Como pode ser observado, esse módulo não contém nenhuma variável própria, mas apenas parâmetros selecionados de outros módulos e que foram utilizados para calibrar o modelo. Os gráficos mostrados na figura representam os resultados das variáveis consideradas mais relevantes do sistema, e seus comportamentos ao longo do tempo serão discutidos posteriormente na próxima seção deste capítulo.

6.2 Apresentação e discussão dos resultados do modelo

Para apresentação e discussão dos resultados do modelo foram escolhidas oito variáveis consideradas de maior interesse, são elas:

- Colheita de cana-de-açúcar;
- Entregas de Açúcar;
- Preço do açúcar;
- Encomendas de açúcar no mercado interno;
- Exportações de açúcar;
- Entregas de Etanol;
- Preço do etanol ao consumidor; e
- Percentual de uso de etanol em carros bicompostíveis.

Para cada uma dessas variáveis serão apresentados três gráficos: o primeiro com os dados relativos ao Modo de Referência e ao comportamento apresentado pelo

modelo; o segundo com o erro percentual médio entre as duas variáveis, tomando como valor de referência o MR; e o terceiro apresenta os coeficientes de Theil, obtidos por métodos econométricos, por meio de planilha externa. Para cada variável são apresentados comentários com relação aos resultados.

O gráfico com o comportamento contém duas curvas; a que representa o MR é contínua e indicada pelo número 1; a curva que representa o comportamento do modelo é tracejada e indicada pelo número 2. Os gráficos em tons de cinza representam os erros percentuais e os coeficientes de Theil, que são oferecidos como uma forma adicional de se verificar a qualidade do comportamento do modelo com relação a erros sistemáticos.

6.2.1 Colheita de cana-de-açúcar

A Figura 59 apresenta o comportamento da variável Colheita de cana-de-açúcar; a curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2011), adotado como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

Pode ser observado que o resultado do modelo fica consistentemente abaixo do Modo de Referência. Há duas razões que justificam tal diferença entre as duas variáveis.

A primeira se deve à adoção de valores constantes de produtividade³⁵ nos processos de transformação de cana-de-açúcar para açúcar e para etanol, quando na verdade, a produtividade dos processos de transformação, tanto de cana-de-açúcar para etanol, quanto de cana-de-açúcar para açúcar, aumentaram ao longo do tempo (Goldemberg, 2002). Tal raciocínio parece consistente com a evolução dos erros percentuais do modelo, apresentados na Figura 60.

Como o desenrolar da simulação o comportamento do modelo se aproxima do MR, ficando com desempenho situando-se aproximadamente no intervalo [-25%, +5%], a partir do ano 2000.

A segunda razão dessa diferença é a qualidade dos dados usados na simulação, que melhoram quando o período de tempo simulado se aproxima dos dias atuais.

Para analisar as causas que geram as diferenças sistemáticas observadas no comportamento dessa variável serão usados os coeficientes de desigualdade de Theil, parâmetro usado para decompor o erro de simulação em suas fontes características

³⁵ Segundo MAPA(2011), para o ano de 2010 esses valores são 83 litros de etanol/tonelada de cana, e 138 kg de açúcar/ tonelada de cana.

(PINDYCK e RUBINFELD, 2004). O uso desses coeficientes é recomendado para a análise de modelos de Dinâmica de Sistemas, com o propósito de se tomar consciência das fontes dos erros gerados na simulação e de sua validação estatística (STERMAN, 1984). OLIVA (1985) sugere que os coeficientes de desigualdade também podem ser usados para a calibração de modelos de Dinâmica de Sistemas.

Os coeficientes de Theil decompõe o erro médio quadrático (EMQ) em três tipos: U_m que representa a contribuição da média para o EMQ; U_s que representa a contribuição da variância para o EMQ; e U_c representa a contribuição da covariância para o EMQ. No modelo ideal tem-se $U_m=U_s=0$ e $U_c=1$. Para maiores detalhes sugere-se a leitura de Pindyck e Rubinfeld (2004).

O valor elevado de U_m indica que o modelo tem um erro sistemático já identificado, e sugere que sejam feitas alterações na estrutura do modelo, em versões futuras. A alteração que parece ser a mais adequada é a de incluir a variação da produtividade ao longo do tempo. Entende-se que a inclusão dessa dinâmica resultará em um comportamento melhor para o modelo.

6.2.2 Entregas de Açúcar

A Figura 62 apresenta o comportamento da variável *Entregas de açúcar*; a curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2011), adotado como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

O modelo apresenta um bom comportamento, deixando de capturar a brusca queda de entregas reais de açúcar, ocorrida no ano 2000, que foi comentada no Capítulo 3. Essa conclusão é consistente com a evolução dos erros percentuais apresentados na Figura 63.

Para capturar a brusca variação ocorrida em torno do ano 2000, o modelo deverá ser alterado e incluir o trato da cultura de cana-de-açúcar. Como foi visto no item 3.2.2, no ano de 1999 a renovação dos canaviais ficou apreciavelmente abaixo da média histórica, fato esse que combinado com outros fatores acarretou uma perda de produtividade da terra nos canaviais no ano 2000 (PAES, 2011). Para incorporar essa dinâmica que se revela importante, deve-se adicionar ao modelo um módulo relativo ao trato da terra.

As conclusões anteriores são consistentes com os valores de U_m , U_s e U_c apresentados na Figura 64, onde se vê ótimo comportamento de U_m , com U_s atingindo valor pouco superior a 0,2 ao final da simulação.

6.2.3 Preço do açúcar

A Figura 65 apresenta o comportamento da variável *Preço de açúcar*; a curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2011), adotado como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

O modelo apresenta comportamento qualitativo razoável. Lembrando que as informações sobre os custos de produção do açúcar usados no período inicial da simulação não são confiáveis, pode-se observar que mesmo sem boas referências iniciais o modelo consegue se aproximar do Modo de Referência, seguindo seu comportamento observado de forma suavizada, ou seja, sem variações bruscas.

Figura 65 – Preço do açúcar ao consumidor

Como foi dito no Capítulo 4 a área de custos, juntamente com a demanda, afeta os preços sensivelmente, e o detalhamento posterior desses custos e seus efeitos representam oportunidades de melhoria.

Os valores de U_m , U_s e U_c apontam que os resultados da simulação melhoram com o passar do tempo, o valor de U_m que inicia elevado cai até atingir 0,4 ao final da simulação.

6.2.4 Encomendas de açúcar no mercado interno

A Figura 68 apresenta o comportamento da variável *Encomendas Açúcar Interno*, que retrata as encomendas de açúcar no mercado nacional, atendido quase que exclusivamente pela indústria sucroalcooleira nacional. A curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2011), adotados como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

Por inspeção da Figura 68 pode-se afirmar que o comportamento modelo para essa variável está adequado. Essa conclusão parece ser confirmada pela Figura 69, que mostra que o erro percentual do modelo fica sempre abaixo de 6%, com relação aos dados usados no Modo de Referência.

A Figura 70 mostra que U_c predomina como principal fonte de erro e a partir de 1995 predomina sobre de U_m e U_s . Esse conjunto de informações indica que o modelo tem boa agregação ao MR.

6.2.5 Exportações de açúcar

A Figura 71 apresenta o comportamento da variável *Demanda de Açúcar para Exportação*, que retrata as encomendas de açúcar no mercado internacional. A curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2011), adotado como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

Uma inspeção visual da figura pode levar à conclusão que o modelo acompanha a média do MR, com bom desempenho, principalmente depois do ano 2000. A Figura 72 apresenta o comportamento ao longo o tempo do erro percentual dessa variável, em relação aos dados utilizados. Pode-se observar que após o ano 2000 os resultados do modelo são bons. Os coeficientes de Theil (Figura 73) confirmam a análise, pois após o ano 2003 o erro predominante passa a ser o de covariância, e ao final do período simulado tanto U_m quanto U_s se aproximam de zero.

6.2.6 Entregas de Etanol

A Figura 74 apresenta o comportamento da variável *Entregas de Etanol*, que retrata as entregas de etanol, tanto no mercado nacional quanto no internacional. A curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2011), adotado como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

Por inspeção visual pode-se dizer que o comportamento do modelo está razoável, exceto no período entre 1992 e 1998, quando o Modo de Referência apresenta concavidade para baixo e o comportamento do modelo apresenta uma curva com concavidade para cima.

A análise da Figura 75 permite concluir que o modelo apresenta um bom comportamento, após 1982. No ano de 2006, onde há uma diferença pontual entre as duas curvas, que é causada por uma queda brusca no MR, não capturada pelo modelo.

Os valores de U_m , U_s e U_c apresentados na Figura 76 mostram que após o ano 2000 o modelo converge adequadamente praticamente deixa de apresentar tendência.

6.2.7 Preço do etanol ao consumidor

A Figura 74 apresenta o comportamento da variável *Preço do Etanol ao Consumidor*, que retrata as entregas de etanol, tanto no mercado nacional quanto no internacional. A curva contínua, indicada pelo número 1, reproduz dados informados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2011), adotados como Modo de Referência, e a curva tracejada, indicada pelo número 2 retrata o comportamento do modelo.

Como no caso do preço do açúcar, a comparação com o MR é restrita a um pequeno período de apenas sete anos, de 2003 a 2010. Embora um pouco defasadas no tempo, as duas curvas apresentam comportamento qualitativo similar. Em termos de erros percentuais, o modelo apresenta um comportamento adequado, sempre abaixo de 25%, embora o curto espaço de tempo da comparação não permita uma conclusão definitiva.

Considerando a importância do comportamento dessa variável no desempenho do modelo, cabe uma análise adicional. No período entre 1980 e 1983 a cobertura de estoque aumenta e os custos diminuem; o preço responde caindo de maneira vigorosa (Figura 77). No período entre 1983 e 1989, a cobertura de estoque cai, e os preços apresentam tendência de queda, mas com algumas oscilações em 1985 e 1987; o preço sobe até 1987 e depois cai com uma tendência mais suave que no

período entre 1980 e 1983. No período entre 2003 e 2010, quando os custos sobem e a cobertura de estoque cai, os preços sobem vigorosamente. A Tabela 15 apresenta um resumo da análise, que permite concluir que o comportamento do preço ocorre dentro do esperado no modelo.

Tabela 15 – Avaliação do comportamento dos custos do etanol

	Cobertura de estoque aumenta	Cobertura de Estoque diminui
Custos aumentam	Preço diminui de forma mais suave	Preço aumenta de forma drástica
Custos diminuem	Preço diminui de forma drástica	Depende da intensidade de cada estímulo.

Fonte: Elaboração própria.

6.2.8 Percentagem de uso de etanol em carros flex

A Figura 80 apresenta o comportamento do modelo com relação à variável *Percentagem de Uso de Etanol em Carros Flex*, que retrata a decisão do proprietário do veículo automotivo ao abastecer seu carro. A curva contínua, indicada pelo número 1, o comportamento que seria observado quando os usuários seguissem o padrão apresentado por Goldemberg, Nigro e Coelho (2008), adotado como Modo de Referência. A curva tracejada, indicada pelo número 2, retrata o comportamento do modelo.

Como pode ser visto na Figura 80 o comportamento do modelo parece acompanhar de forma suavizada os dados usados no MR. O erro percentual dessa variável em relação ao MR oscila entre -30% e 30%. Considerando-se as incertezas envolvidas nos cálculos, o resultado pode ser concluído como adequado, mas considerando o curto espaço de tempo de observação essa conclusão deve ser considerada apenas um indício, e não um resultado definitivo.

Figura 81 – Erro percentual da variável *Preço do Etanol ao Consumidor*

Fonte: Elaboração própria.

O valor de U_m indica que a curva não é tendenciosa; entretanto, embora U_c domine o resultado a partir de 2005, U_s apresenta valor elevado.

Figura 82 – Valores de U_m , U_s e U_c para *Percentual de Uso de Etanol em Carros Flex*

Fonte: Elaboração própria.

6.3 Testes do modelo

No Capítulo 2 foi apresentado um conjunto de testes a serem aplicados em modelos de Dinâmica de Sistemas. O primeiro ponto a se discutir são os aspectos destacados na Tabela 1 que apresenta as características dos modelos defensivos e dos reflexivos. Com relação aos aspectos listados naquela tabela, o autor entende que o modelo tem as seguintes características:

- Promove discussões;
- Apresenta suas hipóteses;
- Usou os dados da maneira mais clara e abrangente possível, mostrando com clareza os resultados obtidos;
- O próprio desenvolvimento de um modelo de DS, em si, já é um desafio a preconceitos, uma vez que o método é pouco difundido no país e não se encontrou até o momento nenhum trabalho similar para a indústria da cana-de-açúcar no Brasil.
- O conjunto de potenciais interessados no modelo foi envolvido de forma muito limitada; e
- Procura-se estimular o desenvolvimento, transmitindo-se os conceitos obtidos.

Os aspectos destacados anteriormente permitem concluir que embora ainda haja oportunidades de melhoria, o modelo estimula a crítica e a reflexão.

A

Tabela 16 apresenta os testes realizados no modelo. Para facilitar a comparação com a sequência de testes sugerida por Stermán (2000), apresentada no Capítulo 2, a tabela segue a mesma ordem proposta naquele capítulo.

Tabela 16 – Testes Realizados no Modelo

Teste	Propósito (Garantir que ...)
Adequabilidade dos limites do modelo	<ul style="list-style-type: none"> • A maioria dos conceitos relevantes foram tornados endógenos, sugerindo-se que futuros trabalhos tornem endógenos tanto aspectos relativos ao ganhos de produtividade dos processos de transformação ao longo do tempo quanto o mercado internacional de açúcar, trazendo para dentro do modelo o <i>Preço Internacional de Açúcar</i>; • Foram feitos testes de alteração dos limites do modelo, por meio de uso de variáveis exógenas. O modelo mostrou-se robusto a essas variações; e • Só será possível afirmar que as políticas não se alterem quando os limites do modelo são alterados, quando os fatores já citados forem incorporados ao modelo.
Avaliação da Estrutura	<ul style="list-style-type: none"> • A estrutura do modelo está consistente com o conhecimento descritivo do sistema.
Consistência dimensional	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os parâmetros de todas as equações são dimensionalmente consistentes, sem o uso de parâmetros sem significado no mundo real.
Avaliação dos Parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> • Os valores dos parâmetros parecem ser consistentes com o conhecimento quantitativo ou qualitativo do sistema; e • Todos os parâmetros tem significado no mundo real.
Condições extremas	<ul style="list-style-type: none"> • Cada equação tem significado, sendo os testes de valores extremos foram feitos de maneira limitada. • Não foram conduzidos testes de políticas externas, nem choques. Os testes de parâmetros limites tiveram resultado satisfatório.
Erro de integração	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados não são sensíveis às variações do intervalo de integração.
Reprodução de comportamento	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo reproduz razoavelmente o comportamento de interesse do sistema; • Gera endogenamente os sintomas e dificuldades que motivaram o estudo; e • O modelo gera razoavelmente os oito modos de comportamento observados no sistema real, apresentados no item 6.2.
Anomalia de comportamento	<ul style="list-style-type: none"> • Não foram conduzidos testes de alterações ou exclusões nas hipóteses adotadas.

Teste	Propósito (Garantir que ...)
Tipo	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo gera o comportamento observado em outras instâncias do mesmo sistema.
Comportamento surpreendente	<ul style="list-style-type: none"> • Os estudos de políticas só foram conduzidos preliminarmente, e não se pode afirmar que o modelo gere comportamentos não observados previamente, quando isso for coerente, nem que ele possa antecipar a resposta do sistema a condições ainda não ocorridas.
Análise de sensibilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Várias análises de sensibilidade foram conduzidos durante a elaboração do modelo e sua calibração. Os resultados numéricos variam de forma plausível com os resultados numéricos, apresentando elevada sensibilidade em relação aos parâmetros apresentados na interface de calibração. • Foi percebido que as alterações de estrutura ocorridas ao longo do processo de modelagem tornaram o modelo mais estável e menos sensível à variação de parâmetros. • A verificação da sensibilidade do modelo a políticas teve um caráter limitado e poderá ser expandida em futuras versões.
Melhorias do sistema	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo contribui para a mudança do sistema para uma melhor condição.

Fonte: Elaboração própria.

7 Projeto e análise de políticas

O propósito deste capítulo é apresentar um exemplo de verificação de uma política para intervir no problema. Como está fora do escopo desta tese, discutir profundamente as políticas do setor e como elas afetam todos os interessados, será escolhida uma política simples, mas que atende ao propósito com clareza.

Primeiro é apresentado o problema do setor sucroalcooleiro, sob a visão de um estudo conduzido na CONAB (BRESSAN FILHO, 2009). Após a apresentação do problema é especificada a política a ser implementada no modelo, definindo as alterações necessárias em sua estrutura, de forma a refletir a política proposta. Finalmente, é apresentada a análise dos efeitos da política, usando para isso as mesmas variáveis que foram analisadas para comparar o comportamento do modelo aos dados usados como Modo de Referência.

7.1 Uma visão dos problemas da indústria sucroalcooleira

Pelo que se pode depreender das informações contidas na palestra do Presidente da ÚNICA, realizada em dezembro de 2011 (JANK, 2011), o setor sucroalcooleiro passa por uma crise no setor do etanol.

A conclusão acima já era assinalada por Bressan Filho (2009), que na introdução de sua análise do setor sucroalcooleiro afirma que:

“O setor sucroalcooleiro está atravessando uma crise econômica de grande intensidade e, certamente a mais persistente e duradoura desde o final do processo de liberalização desse setor no fim dos anos 90. A circunstância dessa crise ser muito mais intensa na produção alcooleira que na açucareira (cujos preços são bastante remuneradores) não reduz sua importância e não pode ser ignorada.”

Bressan Filho (2009) destaca como causas principais da crise:

- Com o aumento da demanda, houve necessidade de aumento dos estoques médios, o que resulta da necessidade de maior capital para manter estoques;
- Baixa taxa de remuneração da atividade nas últimas safras; e
- Postura passiva do setor produtivo, que não dispõe de mecanismos comerciais para interferir na margem de comercialização, o que limita a competitividade do etanol frente à gasolina.

Bressan Filho (2009) afirma ainda que:

“ ... o ambiente de otimismo e confiança no futuro criado com a transformação do etanol combustível em produto de elevado prestígio induziu muitos grupos a tomarem decisões que superavam suas capacidades de expansão”.

Entende-se que Bressan Filho se refere ao clima de otimismo que dominou o setor após a constatação do sucesso da introdução do carro bicombustível no Brasil, ocorrido em 2003.

A Figura 83 mostra o comportamento do modelo com relação a três variáveis: *Capacidade Industrial em Operação Desejada* (curva contínua, identificada com o nº 1); *Capacidade Industrial em Operação* (curva tracejada, identificada com o nº 2); e *Utilização de Capacidade* (curva traços longos, identificada com o nº 3).

Pode ser observado que o comportamento do modelo desenvolvido no trabalho captura toda a impressão de Bressan Filho; após um período de estagnação, de queda da capacidade de produção desejada, e de estagnação da capacidade de produção no período imediatamente anterior ao lançamento do carro bicombustível, o setor melhora suas expectativas para o aumento da capacidade industrial desejada; seguida, com atraso de aproximadamente dois anos do aumento de produção.

Bressan Filho (2009) prossegue apontando quatro desafios para o setor:

- Desafio da produção, que se concentra em ter a capacidade de aumentar a produção de etanol, de forma a atender ao crescimento potencial da demanda que é representado pela substituição da frota a gasolina pela frota de bicomcombustíveis;
- Desafio da comercialização, que se concentra ajustar o ganho de cada elo da cadeia produtiva de acordo com o esforço realizado;
- Desafio do consumidor, alterando seus hábitos de forma a quando os preços da gasolina e do etanol estiverem equivalentes, ele optar pelo etanol, o que não parece acontecer nos dias atuais; e
- Desafio da gestão, que trata da reorganização do setor de energia e que foge ao escopo deste trabalho.

Aspecto relevante da comercialização é a incidência de impostos federais e estaduais sobre o etanol. Para cada m^3 de etanol incidem R\$ 120,00 de impostos federais, além dos impostos estaduais, que variam de 12 a 30% da receita líquida, com a maioria dos estados taxando o etanol a 25% (BREISSAN FILHO, 2009).

7.2 Uma política de incentivo à produção de etanol (PIPE)

Uma política de estímulo para o setor seria a redução da carga tributária. O custo de produção do etanol em 2010 foi de R\$ 930,66/ m^3 . Se a taxa federal (R\$ 120/ m^3) fosse aplicada para incentivar os produtores, seus custos finais ficariam em torno de R\$ 810/ m^3 , aproximadamente 87% do valor original. Naturalmente tal incentivo poderia ser atrelado a metas de ganhos de produtividade ou outra forma de compensação, de forma a não acomodar o setor.

A política a ser adotada para exemplo no modelo será chamada de “Política de Incentivo a Produção de Etanol” (PIPE) e consistirá em uma redução de custos que terá início a partir de 2010, com todos os demais parâmetros mantidos constantes na simulação. As variáveis exógenas apresentarão o mesmo comportamento no PIPE e no Caso Base, que será o de referência, com a extensão do período de simulação para 2030.

Para se aplicar essa política ao modelo de simulação, serão feitas alterações no módulo M00500 – Custos de Produção e no módulo M00800 – Capacidade Desejada de Produção Industrial. No primeiro é criada a variável Custos Totais

Unitários Etanol (Com Incentivo), que reflete a implementação da política, após o ano 2010. No segundo há uma mudança na variável que gera a expectativa de custos no longo prazo, de forma a refletir a política adotada. As alterações do Diagrama de Forrester para o módulo M00500 e módulo M00800 são apresentadas na Figura 84 e na Figura 85, respectivamente.

7.3.1 Efeitos do PIPE na cana-de-açúcar

A Figura 86 apresenta o efeito do PIPE na colheita de cana-de-açúcar. Observa-se que há um aumento da colheita de cana-de-açúcar em relação ao Caso Base. Esse resultado é previsível, pois com a redução de impostos (de R\$120/m³), há uma redução no preço final do etanol, causada pela sensibilidade dos preços aos custos, aumentando o valor relativo do etanol em detrimento da gasolina, o que aumenta sua demanda. Esse aumento de demanda de etanol gera maior necessidade de matéria-prima, que resulta na maior necessidade de cana-de-açúcar.

7.3.2 Efeitos do PIPE no etanol

Neste item são apresentados os efeitos do PIPE no etanol. A Figura 87 permite analisar o comportamento dos usuários de carros flex, uma vez que um aumento no uso de etanol hidratado em relação ao caso base indica que houve aumento no consumo de etanol. Nota-se que há apreciável aumento no consumo de etanol hidratado, indicando que o PIPE obteve sucesso em atrair usuários de carros flex para o uso de etanol, em detrimento do uso da gasolina.

A Figura 88 mostra o comportamento do modelo para as *Entregas de Etanol*. De maneira consistente com a opção dos usuários de carros flex, observa-se que há um aumento nas entregas de etanol.

A Figura 89 mostra o efeito do PIPE no *Preço do Etanol*. Analogamente, houve uma sensível redução no preço do etanol ao consumidor, razão de sua maior atratividade frente à gasolina.

A Figura 90 mostra as alterações causadas pelo PIPE na decisão dos usuários de carros flex a usar ou o etanol ou a gasolina; a figura mostra que o percentual de uso de etanol cresceu, chegando a 10,1% em relação ao Caso Base, de forma consistente com a Figura 88. Observe-se que o preço da gasolina permaneceu constante, a partir de 2010.

Os quatro gráficos analisados confirmam que o PIPE é eficaz em aumentar o consumo de etanol hidratado, fazendo com que mais usuários de carros flex optem por usar etanol hidratado ao invés de gasolina C.

7.3.3 Efeitos do PIPE no açúcar.

Neste item serão apresentados os efeitos do PIPE no açúcar. A Figura 91 apresenta o efeito do PIPE nas *Entregas de Açúcar* mostrando pequenas embora perceptíveis reduções nas entregas. Esse efeito se pode classificar como indesejável, porque o estímulo à produção de etanol não tinha como objetivo reduzir as entregas de açúcar; entretanto, essa redução era previsível, uma vez que o aumento no lucro com as vendas de etanol tornou o etanol com PIPE mais atrativo que o etanol sem PIPE, e sua atratividade quando comparada com a do açúcar também aumentou, o que altera a decisão de produção considerando a relação etanol/açúcar.

O crescimento total da indústria parece não ter sido suficiente para atender plenamente os dois mercados e com isso parte do crescimento da produção de etanol ocorreu com sacrifício da produção de açúcar.

A

Figura 92 mostra o efeito do PIPE na *Exportação Brasileira de Açúcar*, que de maneira consistente com as Entregas de Açúcar também foi reduzida, embora marginalmente.

A Figura 93 mostra o aumento no *Preço do Açúcar ao Consumidor*, que embora pequeno³⁶, pode ser considerado um efeito indesejável.

A análise das três figuras indica que o PIPE não teve efeito favorável para a indústria do açúcar, resultando em aumento de preços ao consumidor, menor consumo de açúcar e redução de exportações.

A Figura 94 apresenta a comparação da evolução da *Capacidade Industrial* nas duas situações. Pode ser observado que não há alteração da capacidade industrial. Isso permite concluir que o efeito causado pela redução de impostos para a indústria como um todo foi de substituição, e não de aumento de atratividade para a indústria como um todo.

Neste ponto é importante destacar que é possível que esses efeitos negativos que o PIPE impôs ao mercado do açúcar não tivessem sido pensados a priori, e que ao ser implementada a política poderia ter seus resultados globais prejudicados pela “compensação” que o sistema impôs ao aumento na produção de etanol, ou seja, a redução de atuação no mercado de açúcar.

³⁶

A máxima diferença percentual entre os dois valores é de 2,1% e ocorre no ano de 2020.

Para concluir a análise, a Tabela 17 apresenta um resumo dos efeitos observados do PIPE, que foi favorável ao mercado de etanol e desfavorável ao mercado de açúcar.

Tabela 17 – Resumo das observações dos efeitos do PIPE

Variável	Efeito Observado
<i>Colheita de Cana-de-Açúcar</i>	Cresce marginalmente.
<i>Entrega de Açúcar</i>	Decresce marginalmente
<i>Entrega de Etanol</i>	Cresce significativamente.
<i>Capacidade Industrial</i>	Não se altera.
<i>Preço Açúcar Consumidor</i>	Cresce marginalmente.
<i>Preço Etanol Consumidor</i>	Decresce significativamente.
<i>% de Uso de Etanol no Flex</i>	Cresce significativamente.
<i>Exportações de Açúcar</i>	Decresce marginalmente.

Fonte: Elaboração própria.

8 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

8.1 Conclusões

Como foi visto ao longo desta tese, a indústria da cana-de-açúcar passa por uma crise, especialmente no setor do etanol, que de acordo com o Presidente da ÚNICA tem sistematicamente obtido preços de etanol ao produtor inferiores aos custos totais da indústria (JANK, 2011). Acrescente-se a isso o crescimento recente nos custos de produção da indústria, que forçaram os preços se elevarem, reduzindo a competitividade do etanol hidratado frente à gasolina, o que diminui a demanda.

Sem esquecer os fatores externos, o modelo desenvolvido nesta tese concentrou-se em demonstrar a importância da dinâmica das interações entre os diversos setores da indústria para a determinação do seu comportamento. Os resultados obtidos nas simulações permitem concluir que o comportamento endógeno da indústria interfere de forma decisiva no comportamento observado da indústria. Tal comportamento é regido pelos diversos atrasos de percepção, decisão e ação, e pelas várias malhas de realimentação que foram explicitadas em todo modelo.

O modelo desenvolvido mostra que a indústria da cana-de-açúcar contém parcela importante dos componentes descritos na seção 2.1.5, que descreve as características de sistemas complexos, uma vez que:

- As análises mostram que os estados do sistema variam a todo tempo, o que permite concluir que ele está em constante mudança;
- Alterações em uma parte do sistema levam a efeitos remotos em outras partes, o que mostra que há forte acoplamento entre seus componentes;
- Como foi mostrado na Hipótese Dinâmica, a indústria contém várias malhas de realimentação que se afetam mutuamente;
- Várias das relações mostradas entre os componentes do sistema são não lineares;
- Embora o modelo se mostre pouco sensível às condições iniciais tanto no estoque de etanol quanto no estoque de cana-de-açúcar, uma variação de 100% na condição inicial do estoque de açúcar mostra que o modelo se comporta de forma bem diferente;

- O comportamento do sistema reagindo endogenamente à Política de Incentivo à Produção de Etanol (PIPE) mostrou que o sistema tem as seguintes características:
- Autoorganização – a reação ao estímulo emergiu endogenamente ao sistema;
- Solução de compromisso – com a melhoria do etanol, houve a piora do açúcar;
- Comportamento não intuitivo – é razoável afirmar que uma pessoa pouco acostumada à dinâmica da indústria sucroalcooleira, teria dificuldade em prever que um estímulo fiscal ao etanol poderia resultar em redução das exportações de açúcar; e
- Resistência à políticas adotadas – depois de certo tempo, mesmo com o estímulo a trajetória do etanol com PIPE seguiu a mesma trajetória do etanol sem PIPE.

A indústria da cana-de-açúcar é um sistema complexo, e pode-se concluir que este trabalho, e seus eventuais aperfeiçoamentos e extensões, poderão servir de base para melhorar a compreensão de sua estrutura endógena e como ela pode ser alterada para melhorar seu desempenho, sem que isso inclua a capacidade de previsão do comportamento futuro da indústria.

As discussões conduzidas ao longo do trabalho permitem algumas conclusões pontuais de interesse. Tais conclusões são destacadas nos itens a seguir.

8.1.1 Ocorrência de comportamentos não previstos

O exemplo sobre projeto e implementação de políticas, apresentado no Capítulo 6, demonstrou que mesmo a aplicação de uma política simples e direta pode conduzir a resultados não previstos e não desejados, como foi o caso da política de redução de impostos do etanol, que se por um lado estimulou a produção e consumo de etanol, por outro lado causou elevação dos preços do açúcar e redução na sua produção e exportação.

8.1.2 Acoplamento da indústria sucroalcooleira

A existência de acoplamento entre as indústrias do açúcar e do etanol é conhecida pelos agentes da indústria, assim como suas potenciais consequências. A crise de desabastecimento de etanol, ocorrida na entressafra de 1988/1989 é um exemplo importante dos efeitos desse acoplamento; o aumento importante no preço do açúcar no mercado internacional, combinado com o desestímulo interno à produção de etanol levaram ao desabastecimento. Esse fato teve importante consequência, uma vez que foi um marco no desaquecimento das vendas dos carros a álcool, que teve queda de vendas acentuada e não mais recuperou sua fatia de mercado.

Abordando a questão pela ótica do pensamento sistêmico, também é possível identificar-se o acoplamento entre essas indústrias com uma análise detalhada do Diagrama Causal do sistema, análise essa que prescinde da elaboração de modelo matemático.

Entretanto, o modelo matemático mostra como e porque esse acoplamento acontece, e como seus efeitos surgem dentro do sistema, o que contribui para melhor entendimento da dinâmica deste processo.

O modelo mostra o acoplamento de forma clara em três módulos de tomada de decisão:

- No módulo *M00900 – Decisão de Produção – Açúcar ou Etanol*, onde se define que dois fatores afetam essa escolha, o primeiro deles a margem de contribuição, e o segundo, a cobertura de estoque;
- No módulo *M00600 – Utilização de Capacidade Industrial*, onde se define que cada um dos produtos contribui parcialmente para a *Utilização da Capacidade Industrial*;
- No módulo *M00800 – Capacidade Desejada de Produção Industrial*, onde fica explícita a contribuição de cada um dos produtos no desejo de se aumentar, ou não, a capacidade de produção industrial.

A análise detalhada dos módulos permite identificar alguns aspectos adicionais do acoplamento. Como há inércia na variação da decisão de produção, a

A mesma inércia da decisão de produção também afeta a capacidade de produção industrial, permitindo concluir que um eventual desempenho insatisfatório de uma commodity pode retardar o crescimento da capacidade industrial para atender à necessidade da outra.

8.1.3 Sensibilidade da Demanda ao Preço do Açúcar

Demanda de Açúcar no Mercado Internacional

Time (Year)

MR Demanda Natural Internacional de Acucar : Current
Demanda Natural Internacional de Acucar : Current
"Erro % Demanda Natural Internacional de Acucar" : Current

Ton Acucar/Ano
Ton Acucar/Ano
Dmnl

Figura 95 – Demanda Natural Internacional de Açúcar

Fonte: Elaboração própria.

No caso do consumo brasileiro de açúcar, abordagem similar mostrou erros variando na faixa de +20% a -5%, diferença essa que foi corrigida considerando-se que o preço do açúcar influencia a demanda. Neste caso, pode-se dizer que a demanda brasileira por açúcar é sensível ao preço, embora moderadamente.

Destaca-se que essa é uma conclusão de caráter qualitativo, não se pretendendo neste trabalho chegar a nenhuma curva de elasticidade-preço da demanda por açúcar no mercado nacional.

8.1.4 Reação do sistema à política.

O modelo mostra que a indústria da cana-de-açúcar reagiu ao PIPE e o sistema retornou à trajetória do Caso Base depois de aproximadamente vinte anos, como pode ser constatado observando-se a Figura 96. O gráfico mostra que a expectativa de *markup* do etanol cresce, com atraso, quando da implementação do PIPE; entretanto, aproximadamente em 2013, ano em que atinge seu valor máximo, a diferença entre as expectativas de *markup* do Caso PIPE e do Caso Base se aproximam até que as duas praticamente se igualem perto do ano 2030.

A razão dessa reação do sistema à política pode ser explicada endogenamente. De acordo com a teoria do preço natural (SMITH, 2000), quando as pressões exercidas pelos desequilíbrios da oferta e da demanda cessam, o preço de um

produto tende a voltar ao seu preço natural que é suficiente para pagar seus custos totais, inclusive os custos econômicos.

O modelo considera que três variáveis definem o preço do etanol ao produtor: a expectativa de preço ao produtor, que funciona como uma âncora de preço; o efeito dos custos no preço, que força o preço retornar ao seu “preço natural”; e o efeito da cobertura de estoque no preço, que captura a pressão da demanda nos preços. A Figura 97 mostra a evolução das duas últimas variáveis.

Como pode ser visto, a partir de 2010 o efeito da cobertura de estoque afeta de maneira importante o preço do etanol, sobrepujando o efeito dos custos. A diferença entre o Caso PIPE e o Caso Base atinge seu valor máximo em 2014, aproximadamente, pouco depois da *Expectativa de Markup do Etanol* ter atingido seu valor máximo. Após esse período, a pressão dos estoques do Caso PIPE diminui chegando a se igualar ao Caso Base.

Como o modelo admite que o efeito da queda nos custos causado pelo PIPE seja repassado ao consumidor, o que é observado pela queda nos preços, depois que a pressão do aumento de demanda pelo etanol é atendida pela oferta, o *markup* se estabiliza no mesmo valor do Caso Base, levando o sistema a se comportar da mesma forma a partir daí.

8.1.5 A demora na reação da indústria

Um aspecto importante na dinâmica deste sistema é o intervalo de tempo decorrido entre instante em que se encomenda nova capacidade de produção e o instante em que essa capacidade entra em operação. Como no mundo real, o sistema simula os atrasos de aquisição de capacidade, que são da ordem de anos.

Montgomery (1995) apresenta um estudo econométrico para determinar o tempo de construção de prédios não residenciais nos EUA, no período de 1961 a 1991. Chegou à conclusão que o período médio se encontrava entre 15 e 18 meses. O modelo desenvolvido nesta pesquisa admitiu o tempo de atraso para aquisição de capacidade como sendo de dois anos, conseguindo resultados adequados.

O fato relevante é que esse atraso existe e o intervalo de tempo decorrido entre a necessidade de maior capacidade de produção ser identificada e essa capacidade estar de fato disponível é da ordem de 2 anos. Como se sabe, no período de dois anos as condições de mercado podem se alterar substancialmente. O que ocorre algumas vezes, é que ao ser entregue para produção, a capacidade adicional não é mais desejada, pois as condições de mercado se alteraram. Além disso, sistemas com atrasos dessa natureza são lentos em suas respostas à variação de demanda, quando essa variação excede a capacidade de produção.

8.1.6 Contribuição a Campos (2010)

Como foi visto no Capítulo 4, Campos (2010) apresenta um estudo sobre os fatores que interferem na determinação dos preços do açúcar e do etanol no mercado interno e do açúcar no mercado externo. Os preços das duas commodities no mercado externo foram calculados de forma exógena, sendo influenciados pelos macrofatores (preço do açúcar no mercado externo, taxa de juros, taxa de câmbio, liquidez e renda) e pelos efeitos idiossincráticos (produtividade e clima).

Neste trabalho os preços do açúcar e do etanol no mercado interno foram calculados de forma endógena, tendo como fatores de causalidade a expectativa desses preços, formada pelo mercado ao longo do tempo, os custos de produção e as pressões da demanda, representadas pela cobertura de estoque de cada produto.

Comparando-se as duas abordagens, pode-se dizer que os custos de produção são afetados pelos macrofatores (taxa de juros, taxa de câmbio, liquidez e renda) e

pelos efeitos idiossincráticos (produtividade e clima). Admitindo-se que a indústria da cana-de-açúcar tem efeito pequeno nos macrofatores, parece razoável mantê-los exógenos; entretanto, as discussões conduzidas nessa tese permitem concluir que as decisões dentro da própria indústria afetam a produtividade, que é um fator relevante adicional na determinação dos custos de produção.

A inclusão da demanda, calculada endogenamente, como elemento que interfere nos preços do açúcar e do etanol no mercado interno, e o forte indício, obtido a partir de análises dos resultados do modelo, de que as decisões da indústria afetam sua produtividade, permite considerar que esta tese contribui para o melhor entendimento da questão de formação de preços no setor sucroalcooleiro.

8.2 Limitações do modelo

As mais importantes limitações do modelo podem ser divididas em duas categorias: a primeira delas se refere às regras de decisão que devem passar por ampla discussão com setores da indústria, de forma a garantir que descrevem de forma acurada o processo decisório; e a segunda categoria se refere aos limites do modelo, que, apesar de amplos, ainda devem ser expandidos, de forma a permitir melhor compreensão da dinâmica da indústria.

8.2.1 Regras de Decisão

Como foi apresentado no Capítulo 2, a modelagem das regras de decisão é um dos pontos mais importantes e difíceis em um modelo de Dinâmica de Sistemas (FORRESTER, 1961); (FORRESTER, 1991), e (STERMAN, 2001). Para que as regras de decisão sejam aperfeiçoadas e se aproximem ainda mais das decisões reais que são tomadas no dia-a-dia da indústria, há a necessidade de engajamento dos tomadores de decisão das usinas.

A necessidade dessa interação entre academia e indústria pode ser feita por meio de uma pesquisa tipo *Survey*, onde várias perguntas poderiam ser feitas a uma ampla gama de pessoas e instituições, sendo depois analisadas estatisticamente no âmbito da academia. Uma importante referência sobre como conduzir uma pesquisa tipo *Survey* pode ser encontrada em Forza (2002) e Miguel e Ho (2010).

8.2.2 Extensões dos limites do modelo

Apesar de o modelo desenvolvido nesta tese ter um espectro relativamente amplo, ele está longe de cobrir o que seria desejável da indústria da cana-de-açúcar. As próximas seções apresentam sugestões tanto de melhorias do modelo, quanto propostas de expansão dos seus limites.

8.2.2.1 *Análise matemática do modelo*

Em seu estado atual o modelo contém 329 equações, sendo que 27 dessas equações representam variáveis de estado. O modelo também contém variáveis que descrevem atrasos, gerando dinâmica; sabe-se também que o tratamento dessas variáveis é complexo. Em adição a isso, várias relações entre variáveis, como foi mostrado no Capítulo 5 e no Apêndice A, são não lineares. Todos esses aspectos tornam a análise matemática do modelo muito difícil.

Uma alternativa de interesse seria a análise matemática das principais malhas que compõe o sistema separadamente. Desta forma, uma malha específica do modelo pode ser estudada aplicando-se as técnicas consagradas na teoria de controle.

A análise matemática de pequenas partes do modelo, linearizadas em torno do ponto de equilíbrio, poderia dar um melhor sentimento do seu comportamento, de sua condição de estabilidade, das constantes de tempo, e dos ganhos da malha, elementos essenciais para a análise dinâmica (OGATA, 2003).

8.2.2.2 *Produtividade e custos de produção.*

A primeira variável que se sugere incluir é a variação da produtividade, que foi excluída do modelo, uma vez que a produtividade foi admitida constante. Essa hipótese teve impacto restrito nos resultados do modelo, principalmente nas variáveis relativas à produção e estoque de cana-de-açúcar.

A inclusão da produtividade da terra será um pré-requisito para tornar endógenos os custos de produção. A Figura 98 mostra a evolução histórica das estimativas dos custos de produção do etanol e do açúcar, que foram obtidas a partir da extrapolação de dados de várias fontes. Como foi dito no Capítulo 4, a evolução dos custos parece indicar a presença de duas malhas competindo entre si (vide Figura 42). Por inspeção, tanto da Figura 42, quanto do gráfico apresentado na Figura 98, pode-se concluir que a malha dos ganhos de produtividade parece prevalecer entre 1980 e

1999, enquanto a malha do aumento dos insumos parece prevalecer de 2000 para frente.

Se for confirmado em estudos futuros que o crescimento da indústria afeta os seus custos de produção e, por consequência, seus preços, e admitindo como correto que tais parâmetros afetam tanto a dinâmica da indústria quanto seu desempenho, seria conveniente a inclusão dessa dinâmica ao modelo, pois tal inclusão poderia gerar percepções relevantes para os tomadores de decisão.

8.2.2.3 Impactos ambientais – Emissão de Gases de Efeito Estufa

Emissão de gases de efeito estufa.

O 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotres Rodoviários, publicado em janeiro de 2011 (MMA, 2011), contém importantes informações sobre as emissões veiculares. Acoplar os dois modelos poderia gerar *insights* interessantes sobre como as políticas da indústria sucroalcooleira afetam as emissões veiculares, aumentando ou reduzindo as emissões de gases do efeito estufa.

Juntar esses estudos poderia ser útil a cidades com problemas importantes de qualidade do ar, como por exemplo: São Paulo e Rio de Janeiro.

Uso da terra.

As questões relativas ao uso da terra foram excluídas do modelo; entretanto, sabe-se que a terra é uma restrição ao crescimento da agricultura, tanto para produção de alimentos quanto para produção de biocombustíveis.

O presidente da ÚNICA afirma que a safra 2020/2021 deverá produzir 1.2 bilhões de toneladas de cana-de-açúcar³⁷ para atender a expectativa de demanda, um fator de crescimento de 216% em relação à produção da safra 2011/2012. Mesmo com ganhos de produtividade da terra nos próximos anos, pode-se inferir que haverá um crescimento na demanda por terra nesse período, expandindo a fronteira da cana-de-açúcar em uma proporção da mesma ordem de grandeza da expansão da produção.

A terra poderá ser uma restrição à expansão da indústria, uma vez que esse crescimento poderá ocorrer em regiões com terras menos produtivas, com índices pluviométricos menos favoráveis ou fatores climáticos adversos. O plantio em terras menos propícias é um fator que tende a reduzir a produtividade média da indústria.

Adicionalmente, a pressão sobre a terra como recurso de produção poderia aumentar os custos de arrendamento, fazendo crescer ainda mais os custos de produção; a área de expansão é composta pelos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, estados mais distantes dos principais centros consumidores, o que pode levar ao crescimento dos custos médios de produção e dos custos logísticos de comercialização.

Comida versus Energia.

Parece haver uma concordância que o Brasil ainda está longe de atingir sua fronteira agrícola; entretanto, os efeitos do uso da agricultura para a produção de combustíveis sobre a produção de alimentos se farão sentir muito antes dos limites da fronteira agrícola serem atingidos.

Além do fato de não ser possível se precisar em que ponto exato da ocupação será possível perceber o efeito da expansão excessiva da fronteira agrícola, deve-se adicionar que o ser humano parece ter limitações para perceber o comportamento exponencial, por ter a tendência natural de extrapolar linearmente (STERMAN, 2000). Adicione-se a esse cenário que o comportamento exponencial parece ser

³⁷ Sem ser objetivo fazer previsões, a previsão de consumo de cana-de-açúcar em 2010 é de 1,227 bilhões de toneladas de cana.

predominante na indústria da cana-de-açúcar, como já foi mostrado em vários pontos desta tese.

Diante dos aspectos apresentados anteriormente, ficam as perguntas: consideradas as taxas atuais de crescimento, em quanto tempo a proximidade da fronteira agrícola se fará sentir? Quais serão esses efeitos? Quanto tempo será necessário para uma reação eficaz?

Respostas adequadas a essas questões não são facilmente elaboráveis, mais ainda pela concorrência por outros fatores de produção e pelos grandes atrasos de percepção, decisão e ação, característicos dos sistemas sociais (FORRESTER, 1971), (STERMAN, 2000).

8.2.2.4 Geração de bioeletricidade

Elevado percentual do bagaço da cana-de-açúcar já é usado como fonte de energia para a geração de energia elétrica dentro das próprias usinas, garantindo autossuficiência e até vendendo o excedente para as empresas concessionárias. Naturalmente, essa redução de custos no consumo de energia elétrica e até eventuais ganhos, tornam a indústria ainda mais atrativa como um todo.

A inclusão dessa fonte adicional de receita ao modelo provavelmente afetaria toda a distribuição de custos e receitas, melhorando o resultado do negócio como um todo. Seabra (2008) contém muitas das informações necessárias à expansão com a inclusão do aproveitamento da biomassa.

8.2.2.5 Preço internacional do açúcar.

O modelo tornou endógena a demanda de açúcar brasileiro para exportação, mas manteve os preços internacionais do açúcar como exógenos. Considerando a importância da produção de açúcar brasileiro para o mercado internacional é razoável considerar que a produção brasileira afeta os preços internacionais, e que os preços internacionais do açúcar afetam o comportamento da indústria sucroalcooleira nacional. Essa é uma grande extensão ao modelo, mas que permitirá entender melhor a influência mútua entre os dois mercados.

8.2.2.6 Outras opções de combustível

Embora não se possa vislumbrar a inserção instantânea de outro tipo de combustível alternativo no curto prazo, é possível que isso ocorra no médio e longo prazo. Sem dúvida, essa inserção afetará a indústria da cana-de-açúcar de maneira significativa. A expansão do modelo para capturar a dinâmica relativa a esse novo entrante pode gerar *insights* importantes para o setor sucroalcooleiro.

9 Bibliografia

ANDRADE SILVA, Geraldo Majela. **Custos Médios de Produção - 1998 a 2011.**

[Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <jrsantos@usp.br>, em dez/2011.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotres. **Estatísticas.**

Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>. Acesso em: 15/12/2011

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Sistema de

Levantamento de Preços. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/>. - Acesso em: 29/12/2011.

BACEN - Banco Central do Brasil. - Banco Central do Brasil. Disponível em:

<http://www.bcb.gov.br>. Acesso em 15/12/2011

BRESSAN FILHO, Angelo. **Os fundamentos da Crise do Setor Sucroalcooleiro no Brasil,**

2ª edição. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), 2009. Disponível em:

http://www.conab.gov.br/conabweb/download/nupin/estudo_crise_cana.pdf

Acesso em: 29 Out. 2011.

CAMPOS, Silvia Kanadani. **Fundamentos econômicos da formação do preço**

internacional de açúcar e dos preços domésticos de açúcar e do etanol. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo - ESALQ – Piracicaba, 2010.

CEPEA-ESALQ-USP Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível

em: <http://www.cepea.esalq.usp.br>. Acesso em 15/12/2011.

- CHEAVEGATTI-GIANOTTO. Adriana. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology** . Ed. York Springer New. - 01 de 03 de 2011. - 1 : Vol. 4. - pp. 62-89. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3075403/>. - Doi: 10.1007/s12042-011-9068-3.
- CRONIN Matthew A.; GONZALEZ, Cleotilde; STERMAN, John D. Why don't well educated adults understande accumulation? A challenge to researchers, educators and citizes. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**. Elsevier Inc., 2008. - DOI:10.1016/j.obhdp.2008.03.003.
- DOLNIKOFF Fabio; GONÇALVES Leandro; PETHO Sandra. **Determinantes da flexibilidade açúcar e etanol**: uma análise do processo decisório dos usineiros. Relatório de Pesquisa. Faculdade de Economia e Administração – USP. São Paulo, 2011.
- EHRlich Pierre J. e MORAES Edmilson A. **Engenharia Econômica**: Avaliação e Seleção de Projetos de Investimentos. - São Paulo : Atlas S.A., 2005. - 6ª.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Árvore do Conhecimento da Cana-de-Açúcar**. 2003. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/cana_de_acucar.html. Acesso em: 15/11/2011.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Dicionário Aurélio**, versão 5.0 [eletrônica]. Curitiba: Positivo Informática Ltda., 2004.
- FERRES, Diego Henrique Souza. **Fluxograma de Processo Açúcar e Alcool**. Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, 2011. - Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <jrsantos@usp.br> em 16 dez 2012.
- FONTES TORRES Osvaldo Fadigas. **Fundamentos da Engenharia Econômica**. - São Paulo : Thomsom Learning, 2006.

FORRESTER Jay W. Counterintuitive Behavior of Social Systems. **Constitution Society**, 1971. Disponível em: <http://www.constitution.org/ps/cbss.pdf>. Acesso em: - 01 mai 2011.

_____. **Industrial Dynamics**. Cambridge: MIT Press, 1961.

_____, Information Sources for Modeling the National Economy [Periódico] // Journal of the American Statistical Association. - 1980. - 75 : Vol. 371.

_____, System Dynamics and K-12 Teachers. Cambridge: (Memorandum D-4665-5), . [Online]. - Massachusetts Institute of Technology, 1996. - 31 de 07 de 2011. - <http://mitsloan.mit.edu/alumni/convocation2008/pdf/D-4665-6.SD&K-12Teachers.pdf>.

_____, System Dynamics and the Lessons of 35 Years [Online] // Creative Learning Exchange. - Creative Learning Exchange, 30 de 05 de 1991. - 30 de 12 de 2011. - <http://clexchange.org/ftp/documents/system-dynamics/SD1991-04SDandLessonsof35Years.pdf>. - Memorandum D4224-4.

FORZA Cipriano. Survey research in operations management: a process-based perspective. **International Journal of Operations & Production Management**. 2002-2: Vol. 22. - pp. 152-194. - Disponível em: <http://www.emeraldinsight.com/0144-3577.htm>.

GOLDEMBERG José; COELHO, Suani Teixeira; NASTARIO, Plinio Mário; LUCON, Oswaldo. Ethanol learnign curve - the Brazilian experience. **Biomass and energy**. Elsevier, 26, 2004. pp. 301-304.

GOLDEMBERG José; GUARDABASSI Patricia. Are biofuels a feasible option? **Energy Police**. - 2009. - Vol. 37. - pp. 10 -14.

GOLDEMBERG, José e LUCON, Oswaldo. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo : Editora da Universidade de São Paulo, 2008. - 3ª.

GOLDEMBERG José. **Ethanol for a sustainable energy future**. Science Magazine, 2007. 315. - p. 808.

GOLDEMBERG, José. NIGRO, Francisco E. B.; e COELHO, Suani T. **Bioenergia no Estado de São Paulo**: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008.

HARDIN, Garret. The Tragedy of the Commons. **Science**, 1968. - Vol. 162. - pp. 1243 - 1248.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 2011.

_____. Projeção da População do Brasil por sexo e idade: 1980-2050 - Revisão 2008. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2008/default.shtm. Acesso em: 2011.

ICONE - Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais. Modelagem e Projeções da Agricultura e Uso da Terra. Disponível em: <http://www.iconebrasil.org.br/pt/?actA=1&areaID=33&secaoID=100&conteudoID=29>. Acesso em: 18 jul. 2010.

JANK, Marcos S. **Retomada do Crescimento e Conscientização sobre o Etanol**: Prioridades do Setor Sucroenergético para 2012 e além. UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar, 2011. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia>. Acesso em: 01 jan. 2012.

KALDOR, N. A Classificatory Note on the Determination of Equilibrium. **Review of Economic Studies**. N. 2 de 1934. - Vol. I. - pp. 122-136.

_____. The Cobweb Theorem. **Quarterly Journal of Economics**. 1938. - Vol. 52. - pp. 255-280.

KEENEY, Ralph L. Making Better Decision Makers. **Decision Analysis**. 2004. - Vol. 1. - pp. 193-204.

_____. **Value-Focused Thinking: a Path to Creative Decisionmaking.** Cambridge : Harvard University Press, 1992. - p. 400.

LAMOUNIER, Wagner M.; CAMPOS Filho, Mario F.; BRESSAN, Aureliano A. Análise do trade-off na produção de açúcar e álcool nas usinas da região centro-sul do Brasil. In: XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. - Fortaleza : [s.n.], 2006. - p. 21. - Disponível em: <http://www.sober.org.br/palestra/5/513.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2011.

LEITE, Antonio D. **A Energia no Brasil.** Rio de Janeiro : Elsevier Editora, Ltda., 2007.

MACEDO Isaiás Carvalho. The sugar cane agro-industry: Its contribution to reducing CO2 emissions in Brazil. **Biomass and Bioenergy.** ScienceDirect, 1992. - Vol. 3. - pp. 77-80. - , ISSN 0961-9534, 10.1016/0961-9534(92)90043-P.

MACEDO Isaiás Carvalho; VERDE LEAL, Manoel Régis Lima; RAMOS DA SILVA, José Eduardo Azevedo. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil.** São Paulo - Secretaria de Meio Ambiente. - São Paulo : [s.n.], 2004. - p. 32.

MANZATTO, Celso Varnier [org.] **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.** Embrapa Solos. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2009. - p. 55. - ISSN 1517-2627.

MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico da Agroenergia.** 2011. pp. 223.

MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Comparativo Etanol Hidratado x Gasolina no estado de São Paulo 1999 à 2011.** (2011b) Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arg_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/precos/NOVEMBRO_2011/Paridade%20T%C3%A9cnica%20Etanol%20-%20Gasolina%20SP.pdf. Acesso em: 19 dez. 2011.

- MARTIN GARCIA Juan. **Theory and Practical Exercises of System Dynamics**. Barcelona : Autor, 2006.
- MARTINS Eliseu. **Contabilidade de Custos**, 9ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- MEADOWS Dennis L. **Dynamics of Commodities Production Cycles**. Waltham: Pegasus Communications, 1970.
- MENDES, Judas Tadeu Grassi; PADILHA Jr., João Batista. **Agronegócio: uma abordagem econômica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick; HOO, Linda Lee. Levantamento Tipo Survey. MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick [org.]. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro : Elsevier, 2010.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**: Relatório Final. 2011.
- MONTGOMERY M. “Time-to-built” completion patterns for nonresidential structures, 1961-1991. **Economics Letters**. May, 1995 - Vol. 48. - pp. 155-163.
- MORECROFT, John D. W. **Strategic Modelling and Business Dynamics**. Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- _____. System Dynamics and Microworlds for Policy Makers. **European Journal of Operational Research**. - 1988. - Vol. 35.
- MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, José. The alcohol program. **Energy Policy**. 1999 - Vol. 27. - p. 229–245.
- MUTH, J. F. Rational Expectations and Theory of Price Movements. **Econometrica**, 1961, Vol. 29, pp. 315-335.
- NERLOVE, M. Adaptive Expectations and CobWeb Phenomena. **Quarterly Journal of Economics**, 1958, Vol. lxxii, pp. 227-240.

- NETAFIM, CSA. **Gerenciamento da Colheita**, 2011. Disponível em: http://www.sugarcane crops.com/p/agronomic_practices/harvesting_management/. Acesso em: 01 dez. 2012.
- NEVES, Marcos Fava; CONEJERO, Antonio. **Estratégias para a Cana no Brasil**. São Paulo: Editora Atlas, 2010.
- NEVES, Marcos F. Sugar-Energy Sector: Market Analysis of Brazil. In: **20th Annual World Symposium**. - Boston: 2010.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**, 4ª; trad. Maya Paulo Alvaro. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.
- OLIVA, Rogelio. **A Vensim Module to Calculate Summary Statistics for Historical Fit**. Cambridge, MA : System Dynamics Group, 1985. - Memo D-4584.
- ONU – Organização das Nações Unidas. **World Population Prospects**. Department of Economic and Social Affairs Population Division: 2011. Disponível em <http://www.un.org/esa/population/>. Acesso em: 30 dez. 2011.
- PAES, Luiz Antonio Dias. **Análise da safra 2011/ 2012 e perspectivas - 13/12/2011**. Apresentação na UNICA. - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.asp?mmdCode=4D469CE1-3CDF-4039-891D-1096FAA78F68>. Acesso em: 26 dez. 2012.
- PECEGE-ESALQ-USP. **Custos de Produção de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol no Brasil**. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo. Piracicaba: 2011. - p. 144. - ISSN 2177-4358.
- PETROBRÁS – Petrobrás, S.A. – Site institucional da empresa. 2011. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em: 15 dez. 2011.
- PINDYCK, Robert S. e RUBINFELD, Daniel L. **Econometria: Modelos & Previsões**, Tradução da 4ª edição americana. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

PINTO Jr., Helder Queiroz [organizador]. **Economia da Energia:** Fundamentos Econômicos, Evolução Histórica e Organização Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

RIGNANESE, Luigi. Altvista. Disponível em: http://luirig.altvista.org/photos/s/saccharum_officinarum.htm. Acesso em: 15 nov. 2011.

ROBERTS, Nancy; ANDERSEN, David; DEAL, Ralph; SHAFFER, Willian. **Introduction to Computer Simulation:** A System Dynamics Modeling Approach. EUA: Addison-Wesley Publishing, 1983.

ROSSETO, Rafaela. **Colheita.** Agência de Informação EMBRAPA. - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2007a. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_12_711200516716.html. Acesso em: 2011.

ROSSETO, Raffaella; SANTIAGO, Antonio Dias. **Plantio.** Agência de Informação EMBRAPA. - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2007. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html. Acesso em: 01 jan. 2012.

ROSSETTO Raffaella. **Maturação.** Agência de Informação EMBRAPA. - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2007b. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_90_22122006154841.html. Acesso em: 01 jan. 2012.

SANDVIK, S.; MOXNES, E. Peak oil, biofuels, and long-term food security. In: 27th International Conference of the System Dynamics Society. New Mexico, 2009.

SANDVIK, S. **Impacts of peak oil and food based biofuel production on longterm food security.** Bergen: University of Bergen, Department of Geography, 2008.

SANTIAGO, Antonio Dias; ROSSETTO, Raffaella. **Rotação e Reforma**. Agência de Informação EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2007. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_75_22122006154841.html. Acesso em: 01 jan. 2012.

SANTOS, Joaquim R.; MARTINS, Marcelo R.; YU, Abraham S. O.; NASCIMENTO, Paulo T. Renewable Energy: a Framework to model a Brazilian Case of Success (Part I). In: 27th International Conference of the System Dynamics Society. - Albuquerque, NM, 2009.

SANTOS, Joaquim R.; MARTINS, Marcelo R. A Indústria Marítima Mundial: Uma Análise sob a Perspectiva da Dinâmica de Sistemas. In: XX Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval, Transporte Marítimo e Engenharia Portuária. - São Paulo : [s.n.], 2007.

SANTOS, Joaquim R.; MARTINS, Marcelo R. From Fossil Fuels to Renewable Energy: the dynamics of replacement in Brazil. In: Proceedings of the 29th International Conference of the System Dynamics Society. - Washington : [s.n.], 2011.

SANTOS, Joaquim R.; MARTINS, Marcelo R.; SZAJNBOK, Moysés. A Decisão de Aquisição e Descarte de Capital na Indústria Marítima Mundial: Uma Abordagem sob a Ótica da Análise de Decisão. In: XXII Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore – SOBENA 2008. - Rio de Janeiro : [s.n.], 2008.

SÃO PAULO (Estado). Lei 11241/02. São Paulo : [s.n.], 19 de 09 de 2002.

SEMA-SP – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Etanol Verde**. 2011. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/index.php#>. Acesso em 05 jan. 2012.

SCHARLEMANN, Jorn P. W.; LAURANCE, Willian F. How Green Are Biofuels. **Science**, Jan. de 2008. - 5859 : Vol. 319. - pp. 43 - 44. - DOI: 10.1126/science.1153103.

SEABRA, Joaquim E. A. **Avaliação técnico-econômica para opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas: [s.n.], 2008.

SENGE, Peter. **A Quinta Disciplina: Arte e Prática da Organização que Aprende**. Rio de Janeiro: Best Seller Ltda., 2005.

SILBIGER Steven Alan. **The ten day MBA**, 3rd edition. New York: HapperCollins Publications, 2005.

SMITH Adam. **The Wealth of Nations**. New York: Random House, Inc., 2000.

STERMAN John D. Appropriate Summary for Evaluating the Historical Fit of System Dynamics Models. **Dinamica**, 1984. - 10 (Winter). - pp. 51-66.

_____. **Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World**. New York: Irwin McGraw-Hill, 2000.

_____. Risk Communication on Climate: Mental Models and Mass Balance. **Science**. - [s.l.] : Science AAAS, 24 de 10 de 2008. - Vol. 322. - pp. 532-533. - DOI: 10.1126/science.1162574.

_____. System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. **California Management Review**. - 2001. - 4 : Vol. 43.

_____. The Energy Transition and the Economy: a System Dynamics Approach Tese de Doutorado em Management. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA : [s.n.], 1981.

STOGRATZ Steven H. **Nonlinear Dynamics And Chaos: With Applications To Physics, Biology, Chemistry and Engineering**. New York: Westview Press, 2001.

SZAJNBOK Moyses Publicação eletrônica. - 2012. - [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <jrsantos@usp.br> em 22 jan. 2012..

UNICA - Multimidia União da Indústria de Cana-de-Açúcar - Multimedia [Online]. - União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2011. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia/>. Acesso em dez. 2011.

USDA – United States Department of Agriculture. PSD Production, Supply and Distribution Online - **Sugar Statistics** = PSD Production, Supply and Distribution Online. - [s.l.] : United States Department of Agriculture, 2011. - Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdquery.aspx>. Acesso em: 2011.

WIKIPEDIA. **Cobweb.** Disponível em: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=469533145>. Acesso em: jan. 2012.

ZAH Rainer [org.]. **Life Cycle Assessment of Energy Products: Enviromental Impact Assessment of Biofuels** - Executive Summary. St Gallen, Swtzerland : [s.n.], 2007.

ZIEGLER J. **Draft reports on the special rapporteur on the Right to Food to the General Assembly**, 62/2007T. United Nations Organization, 2007.

APÊNDICE A – Fluxograma de Processo – Açúcar e Álcool.

Figura 99 – Fluxograma de Processo do Açúcar e Álcool.

APÊNDICE B

MÓDULOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Módulo 00100 – Produção e Estoque de Cana

Já descrito no corpo da tese.

Módulo 00200 – Previsão de Demanda de Cana.

Figura 100 – Diagrama de Forrester do Módulo M00200 – Previsão de Demanda de Cana.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 18 – Equações do módulo M00200 – Previsão de Demanda de Cana

.M00200	
(024)	<p>Alteracao de TVPD Cana=</p> <p>(Taxa de Variacao Indicada para a Demanda de Cana-Taxa de Variacao Percebida para a Demanda de Cana)/TPT Cana</p> <p>Units: 1/(Ano*Ano)</p>
(025)	<p>Demanda de Cana de Referencia= INTEG (</p> <p>Variacao de Demanda de Cana de Referencia,</p> <p>"Demanda de Cana de Referencia (1980)")</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p> <p>Valor Base = 22.4110.096</p> <p>Média de dez anos (1985 a 1994) da cana colhida no Brasil</p> <p>Fonte: Anuario Estatístico da Agroenergia (2011)</p>
(026)	<p>"Demanda de Cana de Referencia (1980)"=9.6e+007</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p> <p>Valor Base = 6.000.000 Demanda relativa ao ano de 1980.</p> <p>Fonte: Anuario Estatístico da Agroenergia (2011)</p>
(027)	<p>Demanda Total de Cana Percebida= INTEG (</p> <p>Variacao de Demanta Total de Cana Percebida, 2.49877e+008)</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p> <p>Valor inicial: adotado o valor de cana moída em 1980.</p>
(028)	<p>Prazo de Previsao Cana=2</p> <p>Units: Ano</p> <p>[1,5,0.1]</p>
(029)	<p>Previsao de Demanda Total de Cana=</p> <p>Demanda Total de Cana Percebida*(1+Taxa de Variacao Percebida para a Demanda de Cana*TPPC Cana)*exp(Taxa de Variacao Percebida para a Demanda de Cana*Prazo de Previsao Cana)</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p>
(030)	<p>Taxa de Variacao Indicada para a Demanda de Cana=</p> <p>(Demanda Total de Cana Percebida-Demanda de Cana de Referencia)/</p> <p>Demanda de Cana de Referencia/THRC Cana</p> <p>Units: 1/Ano</p>

- (031) Taxa de Variacao Percebida para a Demanda de Cana= INTEG (Alteracao de TVPD Cana, 0.0344)
Units: 1/Ano
Condição Inicial Base = 0.0584, que é a constante de tempo da curva de regressão exponencial para a moagem de cana, no período de 1950 a 2010.
Fonte: Anuário Estatístico da Agroenergia (2011).
- (032) "Taxa de Variacao Percebida para a Demanda de Cana (1980)"=0.0344
Units: 1/Ano
Condição Inicial Base = 0.0584, que é a constante de tempo da curva de regressão exponencial para a moagem de cana, no período de 1950 a 2010.
Fonte: Anuário Estatístico da Agroenergia (2011).
- (033) THRC Cana=6
Units: Ano
THRC = Horizonte de Tempo da Condição de Referência
THRC Base = 6 Fonte:
Sterman (2000, p.644)
- (034) TPPC Cana=0.6
Units: Ano
TPPC = Tempo de Percepção da Condição Presente
TPPC Base = 0.6.
Fonte: Sterman (2000, p.644)
- (035) TPT Cana=0.56
Units: Ano
TPT = Tempo para Perceber a Tendência.
TPPC Base = 0.56. Fonte:
Sterman (2000, p.644)
- (036) Variacao de Demanda de Cana de Referencia=
(Demanda Total de Cana Percebida-Demanda de Cana de Referencia)/
THRC Cana
Units: Ton Cana/(Ano*Ano)

.M00200

(037) Variacao de Demanta Total de Cana Percebida=

(Demanda Total de Cana-Demanda Total de Cana Percebida)/TPPC Cana

Units: Ton Cana/(Ano*Ano)

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M00300 – Produção e Estoque de Açúcar.

Figura 101 – Diagrama de Forrester o Módulo M00300 – Produção e Estoque de Açúcar.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 19 – Equações do módulo M00300 – Produção e Estoque de Açúcar.

.M00300	
(038)	$\text{Ajuste de Estoque Acucar} = \frac{(\text{Cobertura de Estoque Desejada para o Acucar} * \text{Entregas Desejadas de Acucar} - \text{Estoque de Acucar})}{\text{Tempo de Ajuste de Estoque de Acucar}}$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(039)	$\text{Cobertura de Estoque do Acucar} = \frac{\text{Estoque de Acucar}}{\text{Entregas de Acucar}}$ <p>Units: Ano</p>
(040)	$\text{Entrega Max Acucar} = \frac{\text{Estoque de Acucar}}{\text{Tempo Min Entrega Acucar}}$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(041)	$\text{Entregas de Acucar} = \text{MIN}(\text{Entrega Max Acucar}, \text{Entregas Desejadas de Acucar})$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(042)	$\text{Entregas Desejadas de Acucar} = \text{Demanda Total de Acucar}$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(043)	$\text{"Erro \% Entregas de Acucar"} = \frac{(\text{Entregas de Acucar} - \text{MR Entregas de Acucar})}{\text{MR Entregas de Acucar}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(044)	$\text{"Erro \% Producao de Acucar"} = \frac{(\text{Producao de Acucar} - \text{MR Producao de Acucar})}{\text{MR Producao de Acucar}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(045)	$\text{Estoque de Acucar} = \text{INTEG}(\text{Producao de Acucar} - \text{Entregas de Acucar}, \text{"Estoque de Acucar (1980)"})$ <p>Units: Ton Acucar</p>
(046)	$\text{"Estoque de Acucar (1980)"} = 1.7e+007$ <p>Units: Ton Acucar [?, ?, 1e+006]</p> <p>Valor Base Calibrado = 17M</p>
(047)	$\text{MR Entregas de Acucar} = \text{GET XLS DATA}(\text{'MR Modelo Tese.xlsx'}, \text{'Consumo Total Acucar'}, \text{'A'}, \text{'D2'})$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>

- (048) MR Producao de Acucar:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Producao_Bras_Acucar' , 'A' , 'C2')
Units: Ton Acucar/Ano
- (049) Producao de Acucar=
MAX(0,
Producao Max Acucar* Fracao de Cana para Producao de Acucar*
Utilizacao de Capacidade Indicada pelo Acucar +
Ajuste de Estoque Acucar)
Units: Ton Acucar/Ano
- (050) Producao Max Acucar=
MIN(Producao Max de Acucar por Cana,
Producao Max de Acucar por Moagem)
Units: Ton Acucar/Ano
- (051) Producao Max de Acucar por Cana=
Colheita Max de Cana*
Fracao de Cana para Producao de Acucar*
Produtividade Media da Conversao de Cana para Acucar
Units: Ton Acucar/Ano
- (052) Producao Max de Acucar por Moagem=
Capacidade Industrial em Operacao*
Fracao de Cana para Producao de Acucar*
Produtividade Media da Conversao de Cana para Acucar
Units: Ton Acucar/Ano
- (053) Produtividade Media da Conversao de Cana para Acucar=0.138
Units: Ton Acucar/Ton Cana
- (054) Tempo de Ajuste de Estoque de Acucar=2
Units: Ano [0.5,5,0.1]
- (055) Tempo Min Entrega Acucar=0.1
Units: Ano
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M00400 - Produção e Estoque de Etanol.

Tabela 20 – Equações do módulo M00400 – Produção e Estoque de Etanol

.M00400	
(056)	<p>Ajuste de Estoque de Etanol=</p> $\frac{(\text{Cobertura de Estoque Desejada para o Etanol} * \text{Entregas Desejadas de Etanol} - \text{Estoque de Etanol})}{\text{Prazo de Previsão Etanol}}$ <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(057)	<p>Cobertura de Estoque do Etanol=</p> $\frac{\text{Estoque de Etanol}}{\text{Entregas de Etanol}}$ <p>Units: Ano</p>
(058)	<p>Entrega Max Etanol=</p> $\frac{\text{Estoque de Etanol}}{\text{Tempo Min Entrega Etanol}}$ <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>

- (059) Entregas de Etanol=
 MIN(Entrega Max Etanol,Entregas Desejadas de Etanol)
 Units: M3 Etanol/Ano
- (060) Entregas Desejadas de Etanol=Demanda Total de Etanol
 Units: M3 Etanol/Ano
- (061) "Erro % Entregas de Etanol"=
 (Entregas de Etanol-MR Entregas de Etanol)/MR Entregas de Etanol
 Units: Dmnl
- (062) "Erro % Producao de Etanol"=
 (Producao de Etanol-MR Producao de Etanol)/MR Producao de Etanol
 Units: Dmnl
- (063) Estoque de Etanol= INTEG (
 Producao de Etanol-Entregas de Etanol,"Estoque de Etanol (1980)")
 Units: M3 Etanol
- (064) "Estoque de Etanol (1980)"=2e+006
 Units: M3 Etanol
 Valor Base Calibrado = 2M
- (065) MR Entregas de Etanol:=
 GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'ConsumoInternoEtanol' , 'A' , 'D2')
 Units: M3 Etanol/Ano
- (066) MR Producao de Etanol:=
 GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Producao Etanol' , 'A' , 'E2')
 Units: M3 Etanol/Ano
- (067) Prazo de Previsao Etanol=2
 Units: Ano [0.5,5,0.1]
- (068) Produca Max Etanol por Cana=
 Colheita Max de Cana*
 Fracao de Cana para Producao de Etanol*
 Produtividade Media da Conversao de Cana para Etanol
 Units: M3 Etanol/Ano

.M00400	
(069)	<p>Producao de Etanol= $\text{MAX}(0,$</p> <p style="padding-left: 40px;">Producao Max Etanol*</p> <p style="padding-left: 40px;">Fracao de Cana para Producao de Etanol*</p> <p style="padding-left: 40px;">Utilizacao de Capacidade Indicada pelo Etanol +</p> <p style="padding-left: 40px;">Ajuste de Estoque de Etanol)</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(070)	<p>Producao Max Etanol=</p> <p style="padding-left: 40px;">$\text{MIN}(\text{Produca Max Etanol por Cana}, \text{Producao Max Etanol por Moagem})$</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(071)	<p>Producao Max Etanol por Moagem=</p> <p style="padding-left: 40px;">Capacidade Industrial em Operacao*</p> <p style="padding-left: 40px;">Fracao de Cana para Producao de Etanol*</p> <p style="padding-left: 40px;">Produtividade Media da Conversao de Cana para Etanol</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(072)	<p>Produtividade Media da Conversao de Cana para Etanol=0.082</p> <p>Units: M3 Etanol/Ton Cana</p>
(073)	<p>Tempo Min Entrega Etanol=0.1</p> <p>Units: Ano</p>
Fonte: Elaboração própria.	

Módulo M00500 – Custos de Produção.

Tabela 21 – Equações do módulo M00500 – Custos de Produção

.M00500	
(074)	$\text{Custos Fixos Unitários Açúcar} = \text{Custos Totais Unitários Açúcar} * \text{Fracão de Custos Fixos do Açúcar}$ <p>Units: US\$/Ton Açúcar</p>
(075)	$\text{"Custos Fixos Unitários Açúcar (2006)"} = 220.22$ <p>Units: US\$/Ton Açúcar</p>
(076)	$\text{Custos Fixos Unitários Etanol} = \text{Custos Totais Unitários Etanol} * \text{Fracão de Custos Fixos do Etanol}$ <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>

- (077) "Custos Fixos Unitarios Etanol (2006)"=345.85
Units: US\$/M3 Etanol
- (078) Custos Totais Unitarios Acucar:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'MR Custos', 'A', 'B2')
Units: US\$/Ton Acucar
- (079) Custos Totais Unitarios Etanol:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'MR Custos', 'A', 'C2')
Units: US\$/M3 Etanol
- (080) Custos Variaveis Unitarios Acucar=
Custos Totais Unitarios Acucar*Fracao de Custos Variaveis do Acucar
Units: US\$/Ton Acucar
- (081) "Custos Variaveis Unitarios Acucar (2006)"=293.12
Units: US\$/Ton Acucar
- (082) Custos Variaveis Unitarios Etanol=
Custos Totais Unitarios Etanol*Fracao de Custos Variaveis do Etanol
Units: US\$/M3 Etanol
- (083) "Custos Variaveis Unitarios Etanol (2006)"=483.78
Units: US\$/M3 Etanol
- (084) Fracao de Custos Fixos do Acucar=
"Custos Fixos Unitarios Acucar (2006)"/
("Custos Fixos Unitarios Acucar (2006)" +
"Custos Variaveis Unitarios Acucar (2006)")
Units: Dmnl
Fonte:Seabra (2008)
- (085) Fracao de Custos Fixos do Etanol=
"Custos Fixos Unitarios Etanol (2006)"/
("Custos Fixos Unitarios Etanol (2006)" +
"Custos Variaveis Unitarios Etanol (2006)")
Units: Dmnl
Fonte: Seabra (2008)

(086) Fracao de Custos Variaveis do Acucar=
"Custos Variaveis Unitarios Acucar (2006)"/
("Custos Fixos Unitarios Acucar (2006)" +
"Custos Variaveis Unitarios Acucar (2006)")

Units: Dmnl

Fonte: Seabra (2008)

(087) Fracao de Custos Variaveis do Etanol=
"Custos Variaveis Unitarios Etanol (2006)"/
("Custos Fixos Unitarios Etanol (2006)" +
"Custos Variaveis Unitarios Etanol (2006)")

Units: Dmnl

Fonte: Seabra (2008)

Fonte: Elaboração própria.

Módulo 00600 – Utilização de Capacidade Industrial.

Tabela 22 – Equações do módulo M00600 – Utilização de Capacidade Industrial.

.M00600	
(088)	<p>Expectativa de Custos Variaveis do Acucar no Curto Prazo=</p> <p>SMOOTH(Custos Variaveis Unitarios Acucar, Tempo de Ajuste de Expectativas no Curto Prazo)</p> <p>Units: US\$/Ton Acucar</p>
(089)	<p>Expectativa de Custos Variaveis do Etanol no Curto Prazo=</p> <p>SMOOTH(Custos Variaveis Unitarios Etanol, Tempo de Ajuste de Expectativas no Curto Prazo)</p> <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>
(090)	<p>Expectativa de Markup do Acucar=</p> <p>Expectativa de Preco do Acucar no Curto Prazo/ Expectativa de Custos Variaveis do Acucar no Curto Prazo</p> <p>Units: Dmnl</p>
(091)	<p>Expectativa de Markup do Etanol=</p> <p>Expectativa de Preco do Etanol no Curto Prazo/ Expectativa de Custos Variaveis do Etanol no Curto Prazo</p> <p>Units: Dmnl</p>
(092)	<p>Expectativa de Preco do Acucar no Curto Prazo=</p> <p>SMOOTH(Preco do Acucar para Decisao, Tempo de Ajuste de Expectativas no Curto Prazo)</p> <p>Units: US\$/Ton Acucar</p>
(093)	<p>Expectativa de Preco do Etanol no Curto Prazo=</p> <p>SMOOTH(Preco do Etanol ao Produtor, Tempo de Ajuste de Expectativas no Curto Prazo)</p> <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>
(094)	<p>Tabela de Efeito do Markup na Utilizacao(</p> <p>[(0,0)-(4,1)],(0,0),(0.5,0),(0.8,0.04),(1,0.5),(1.2,0.68),(2,1),(3,1),(4,1))</p> <p>Units: Dmnl</p>
(095)	<p>Tempo de Ajuste da Utilizacao de Capacidade=0.5</p> <p>Units: Ano</p>
(096)	<p>Tempo de Ajuste de Expectativas no Curto Prazo=1</p> <p>Units: Ano</p>

- (097) Utilizacao de Capacidade=
(SMOOTH(Utilizacao de Capacidade Indicada,
Tempo de Ajuste da Utilizacao de Capacidade))^0.5
Units: Dmnl
- (098) Utilizacao de Capacidade Indicada=
Fracao de Cana para Producao de Acucar*
Utilizacao de Capacidade Indicada pelo Acucar +
Fracao de Cana para Producao de Etanol*
Utilizacao de Capacidade Indicada pelo Etanol
Units: Dmnl
- (099) Utilizacao de Capacidade Indicada pelo Acucar=
Tabela de Efeito do Markup na Utilizacao(Expectativa de Markup do Acucar)
Units: Dmnl
- (100) Utilizacao de Capacidade Indicada pelo Etanol=
Tabela de Efeito do Markup na Utilizacao(Expectativa de Markup do Etanol)
Units: Dmnl
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M00700 – Capacidade de Produção Industrial

Figura 105 – Diagrama de Forrester do Módulo M00700 – Capacidade de Produção Industrial.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23 – Equações do módulo M00700 – Capacidade de Produção Industrial.

.M00700	
(101)	<p>Ajuste para Capacidade Industrial em Aquisicao=</p> $\frac{(\text{Capacidade Capacidade Industrial em Aquisicao Desejada} - \text{Capacidade Industrial em Aquisicao})}{\text{Tempo de Ajuste da Capacidade Industrial em Aquisicao}}$ <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(102)	<p>Ajuste por Capacidade de Moagem em Operacao=</p> $\frac{(\text{Capacidade Industrial em Operacao Desejada} - \text{Capacidade Industrial em Operacao})}{\text{Tempo de Ajuste da Capacidade Industrial em Operacao}}$ <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(103)	<p>Aquisicao de Capacidade Industrial Desejada=</p> $\text{Ajuste por Capacidade de Moagem em Operacao} + \text{Expectativa de Obsolescencia de Capacidade Industrial em Operacao}$ <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(104)	<p>Capacidade Capacidade Industrial em Aquisicao Desejada=</p> $\frac{\text{Aquisicao de Capacidade Industrial Desejada} * \text{Tempo Medio de Aquisicao de Capacidade de Operacao}}{\text{Units: Ton Cana/Ano}}$
(105)	<p>Capacidade Industrial em Aquisicao= INTEG (</p> $\text{Encomenda de Nova Capacidade Industrial} - \text{Nova Capacidade Industrial em Operacao}, \text{Obsolescencia de Capacidade Industrial} * \text{Tempo Medio de Aquisicao de Capacidade de Operacao})$ <p>Units: Ton Cana/Ano</p>
(106)	<p>Capacidade Industrial em Operacao= INTEG (</p> $\text{Nova Capacidade Industrial em Operacao} - \text{Obsolescencia de Capacidade Industrial}, \text{"Capacidade Industrial em Operacao (1980)"})$ <p>Units: Ton Cana/Ano</p>
(107)	<p>"Capacidade Industrial em Operacao (1980)"=2.8e+008</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p>

.M00700	
(108)	<p>Encomenda de Nova Capacidade Industrial=</p> <p>MAX(0,Encomenda Indicada de Nova Capacidade Industrial)</p> <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(109)	<p>Encomenda Indicada de Nova Capacidade Industrial=</p> <p>Ajuste para Capacidade Industrial em Aquisicao+</p> <p>Aquisicao de Capacidade Industrial Desejada</p> <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(110)	<p>Expectativa de Obsolescencia de Capacidade Industrial em Operacao=</p> <p>Obsolescencia de Capacidade Industrial</p> <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(111)	<p>Nova Capacidade Industrial em Operacao=</p> <p>MIN(Capacidade Industrial em Aquisicao/</p> <p>Tempo Min de Aquisicao de Capacidade Industrial,</p> <p>DELAY3(Encomenda de Nova Capacidade Industrial,</p> <p>Tempo Medio de Aquisicao de Capacidade de Operacao))</p> <p>Units: Ton Cana/Ano/Ano</p>
(112)	<p>Obsolescencia de Capacidade Industrial=</p> <p>Capacidade Industrial em Operacao*</p> <p>"Taxa % de Obsolescencia da Capacidade Industrial"</p> <p>Units: Ton Cana/(Ano*Ano)</p>
(113)	<p>"Taxa % de Obsolescencia da Capacidade Industrial"= 0.03</p> <p>Units: Dmnl/Ano</p>
(114)	<p>Tempo de Ajuste da Capacidade Industrial em Aquisicao=1</p> <p>Units: Ano</p>
(115)	<p>Tempo de Ajuste da Capacidade Industrial em Operacao=2</p> <p>Units: Ano</p>
(116)	<p>Tempo Medio de Aquisicao de Capacidade de Operacao=2</p> <p>Units: Ano</p>
(117)	<p>Tempo Min de Aquisicao de Capacidade Industrial=0.5</p> <p>Units: Ano</p>

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M00800 – Capacidade Desejada de Produção Industrial.

Tabela 24 – Equações do módulo M00800 – Capacidade Desejada de Produção Industrial.

.M00800	
(118)	<p>Capacidade Industrial em Operacao Desejada=</p> <p>Capacidade Industrial em Operacao*</p> <p>Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na</p> <p>Capacidade Industrial Desejada</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p>
(119)	<p>Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na Capacidade Industrial Desejada=</p> <p>"Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na</p> <p>Capacidade Industrial Desejada - Acucar"*</p> <p>Fracao de Cana para Producao de Acucar+</p> <p>"Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na</p> <p>Capacidade Industrial Desejada - Etanol"*</p> <p>Fracao de Cana para Producao de Etanol</p> <p>Units: Dmnl [0,2]</p>
(120)	<p>"Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na</p> <p>Capacidade Industrial Desejada - Acucar"=</p> <p>"Tabela de Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura da</p> <p>Capacidade Industrial Desejada - Acucar"(</p> <p>Expectativa de Rentabilidade Futura de Novos Investimentos para o</p> <p>Acucar)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(121)	<p>"Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na</p> <p>Capacidade Industrial Desejada - Etanol"=</p> <p>"Tabela de Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura da</p> <p>Capacidade Industrial Desejada - Etanol"(</p> <p>Expectativa de Rentabilidade Futura de Novos Investimentos</p> <p>para o Etanol)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(122)	<p>Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na Plantacao de Cana=</p> <p>Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura na</p> <p>Capacidade Industrial Desejada ^0.5</p> <p>Units: Dmnl [0,2]</p>

- (123) Expectativa de Custos Totais Unitarios do Acucar no Longo Prazo=SMOOTH(
Custos Totais Unitarios Acucar,
Tempo de Ajuste de Expectativas no Longo Prazo)
Units: US\$/Ton Acucar
- (124) Expectativa de Custos Totais Unitarios do Etanol no Longo Prazo=SMOOTH(
Custos Totais Unitarios Etanol,
Tempo de Ajuste de Expectativas no Longo Prazo)
Units: US\$/M3 Etanol
- (125) Expectativa de Preco do Acucar no Longo Prazo=SMOOTH(
Preco do Acucar para Decisao,
Tempo de Ajuste de Expectativas no Longo Prazo)
Units: US\$/Ton Acucar
- (126) Expectativa de Preco do Etanol no Longo Prazo=SMOOTH(
Preco do Etanol ao Produtor,
Tempo de Ajuste de Expectativas no Longo Prazo)
Units: US\$/M3 Etanol
- (127) Expectativa de Rentabilidade Futura de Novos Investimentos para o Acucar=
(Expectativa de Preco do Acucar no Longo Prazo-
Expectativa de Custos Totais Unitarios do Acucar no Longo Prazo)/
Expectativa de Preco do Acucar no Longo Prazo
Units: Dmnl
- (128) Expectativa de Rentabilidade Futura de Novos Investimentos para o Etanol=
(Expectativa de Preco do Etanol no Longo Prazo-
Expectativa de Custos Totais Unitarios do Etanol no Longo Prazo)/
Expectativa de Preco do Etanol no Longo Prazo
Units: Dmnl
- (129) MR Capacidade Industrial em Operacao Desejada:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Producao_Cana' , 'A' , 'E2')
Units: Ton Cana/Ano
- (130) "Tabela de Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura da
Capacidade Industrial Desejada - Acucar"([(-1,0)-(1,2)],
(-1,0),(-0.75,0.1),(-0.5,0.3),(-.25,0.7),(0,1),(0.3,1.3),(0.5,1.5),(0.75,1.65),(1,1.7))
Units: Dmnl

.M00800

- (131) "Tabela de Efeito da Expectativa de Rentabilidade Futura da
Capacidade Industrial Desejada - Etanol" $([(-1,0)-(1,2)],(-1,0),(0,1),(1,1.2))$
Units: Dmnl
- (132) Tempo de Ajuste de Expectativas no Longo Prazo=2
Units: Ano
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M00900 – Decisão de Produção: Açúcar ou Etanol

Figura 107 – Diagrama de Forrester do Módulo M00900 – Decisão de Produção Açúcar ou Etanol.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 25 – Equações do módulo M00900 – Decisão de Produção Açúcar ou Etanol.

.M00900	
(133)	<p>Atratividade do Acucar=</p> <p>Efeito da Expectativa de Markup na Atratividade do Acucar*</p> <p>Efeito da Cobertura de Estoque na Atratividade do Acucar</p> <p>Units: Dmnl</p>
(134)	<p>Atratividade do Etanol=</p> <p>Efeito da Expectativa de Markup na Atratividade do Etanol*</p> <p>Efeito da Cobertura de Estoque na Atratividade do Etanol</p> <p>Units: Dmnl</p>
(135)	<p>Atratividade Total dos Produtos=Atratividade do Acucar+Atratividade do Etanol</p> <p>Units: Dmnl</p>
(136)	<p>Cobertura de Estoque Desejada para o Acucar=1</p> <p>Units: Ano [?,?,0.1]</p>
(137)	<p>Cobertura de Estoque Desejada para o Etanol=0.5</p> <p>Units: Ano [?,?,0.01]</p>
(138)	<p>Efeito da Cobertura de Estoque na Atratividade do Acucar=</p> <p>(Cobertura de Estoque Desejada para o Acucar/ Expectativa da Cobertura de Estoque do Acucar)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(139)	<p>Efeito da Cobertura de Estoque na Atratividade do Etanol=</p> <p>(Cobertura de Estoque Desejada para o Etanol/ Expectativa da Cobertura de Estoque do Etanol)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(140)	<p>Efeito da Expectativa de Markup na Atratividade do Acucar=</p> <p>Expectativa de Markup do Acucar</p> <p>Units: Dmnl</p>
(141)	<p>Efeito da Expectativa de Markup na Atratividade do Etanol=</p> <p>Expectativa de Markup do Etanol</p> <p>Units: Dmnl</p>

- (142) "Erro % Fracao de Cana para Producao de Acucar"=(
Fracao de Cana para Producao de Acucar-
MR Fracao de Cana para Producao de Acucar)/
MR Fracao de Cana para Producao de Acucar
Units: Dmnl
- (143) "Erro% Fracao de Cana para Producao de Etanol"=
(Fracao de Cana para Producao de Etanol-
MR Fracao de Cana para Producao de Etanol)/
MR Fracao de Cana para Producao de Etanol
Units: Dmnl
- (144) Expectativa da Cobertura de Estoque do Acucar=SMOOTH(
Cobertura de Estoque do Acucar,
Tempo de Ajuste de Percepcao dos Tempos de Cobertura,
Cobertura de Estoque Desejada para o Acucar)
Units: Ano
- (145) Expectativa da Cobertura de Estoque do Etanol=SMOOTH(
Cobertura de Estoque do Etanol,
Tempo de Ajuste de Percepcao dos Tempos de Cobertura,
Cobertura de Estoque Desejada para o Etanol)
Units: Ano
- (146) Fracao de Cana para Producao de Acucar= INTEG (
Variacao na Fracao de Cana para Producao de Acucar, 0.56)
Units: Dmnl
- (147) Fracao de Cana para Producao de Etanol=
1-Fracao de Cana para Producao de Acucar
Units: Dmnl
- (148) Fracao Indicada de Cana para Producao de Acucar=
Atratividade do Acucar/Atratividade Total dos Produtos
Units: Dmnl
- (149) MR Fracao de Cana para Producao de Acucar:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Decisao Acucar Etanol' , 'A' , 'G2')
Units: Dmnl

- (150) MR Fracao de Cana para Producao de Etanol:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Decisao Acucar Etanol' , 'A' , 'H2')
Units: Dmnl
- (151) Tempo de Ajuste de Percepcao dos Tempos de Cobertura=0.5
Units: Ano
- (152) Tempo de Ajustes de Fracao de Producao=10
Units: Ano
- (153) Variacao na Fracao de Cana para Producao de Acucar=
(Fracao Indicada de Cana para Producao de Acucar-
Fracao de Cana para Producao de Acucar)/
Tempo de Ajustes de Fracao de Producao
Units: Dmnl/Ano
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01000 – Demanda Total de Cana, Açúcar e Etanol.

Figura 108 – Diagrama de Forrester do Módulo M01000 – Demanda Total de Cana, Açúcar e Etanol.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 26 – Equações do módulo M01000 – Demanda Total de Cana, Açúcar e Etanol.

.M01000	
(154)	<p>Demanda Total de Acucar=</p> <p>Encomendas de Acucar no Mercado Interno+</p> <p>Exportacoes de Acucar-</p> <p>Importacoes de Acucar</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(155)	<p>Demanda Total de Cana=</p> <p>Demanda Total de Acucar/</p> <p>Produtividade Media da Conversao de Cana para Acucar+</p> <p>Demanda Total de Etanol/</p> <p>Produtividade Media da Conversao de Cana para Etanol</p> <p>Units: Ton Cana/Ano</p>
(156)	<p>Demanda Total de Etanol=</p> <p>Demanda Total de Etanol no Mercado Interno+</p> <p>Exportacoes de Etanol-Importacoes de Etanol</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(157)	<p>Demanda Total de Etanol no Mercado Interno=</p> <p>Demanda Natural de Etanol Anidro+Demanda Natural de Etanol Hidratado</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(158)	<p>Exportacoes de Acucar=</p> <p>Demanda de Acucar Brasileiro para Exportacao</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(159)	<p>Exportacoes de Etanol:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Export_Import_Etanol', 'A' , 'C3')</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(160)	<p>Importacoes de Acucar:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Export_Import_Acucar', 'A' , 'F3')</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(161)	<p>Importacoes de Etanol:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Export_Import_Etanol', 'A' , 'G3')</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01100 – Encomendas de Açúcar no Mercado Interno

Figura 109 – Diagrama de Forrester do Módulo M01100 – Encomendas de Açúcar no Mercado Interno.

Elaboração própria.

Tabela 27 – Equações do módulo M01100 – Encomendas de Açúcar no Mercado Interno.

.M01100	
(162)	<p>Demanda de Acucar no Mercado Interno=</p> <p>SMOOTH(Demanda Indicada de Acucar, Tempo de Ajuste da Demanda)</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(163)	<p>Demanda Indicada de Acucar=</p> <p>Demanda Natural de Acucar no Mercado Interno*</p> <p>MAX(0, 1+Inclinacao da Curva de Demanda do Acucar * (Preco do Acucar ao Consumidor- Preco de Referencia do Acucar ao Consumidor)/ Demanda Natural de Acucar no Mercado Interno)</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(164)	<p>Encomendas de Acucar no Mercado Interno=</p> <p>Demanda de Acucar no Mercado Interno*</p> <p>Outros fatores que afetam as Encomendas de Acucar</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(165)	<p>"Erro % Demanda de Acucar no Mercado Interno"=</p> <p>(Encomendas de Acucar no Mercado Interno- MR Demanda de Acucar no Mercado Interno)/ MR Demanda de Acucar no Mercado Interno</p> <p>Units: Dmnl</p>
(166)	<p>Horizonte de Tempo de Referencia do Preco do Acucar=13.5</p> <p>Units: Ano</p>
(167)	<p>Inclinacao da Curva de Demanda do Acucar= -565</p> <p>Units: (Ton Acucar*Ton Acucar)/(US\$*Ano)</p>
(168)	<p>MR Demanda de Acucar no Mercado Interno:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'ConsInternoAcucar' , 'A', 'C2')</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(169)	<p>Outros fatores que afetam as Encomendas de Acucar=1</p> <p>Units: Dmnl</p>
(170)	<p>Preco de Referencia do Acucar ao Consumidor= INTEG (</p> <p>Variacao do Preco de Referencia do Acucar ao Consumidor,</p> <p>"Preco de Referencia do Acucar ao Consumidor (1980)")</p> <p>Units: US\$/Ton Acucar</p>

(171) "Preço de Referência do Açúcar ao Consumidor (1980)"=100

Units: US\$/Ton Açúcar

(172) Preço Percebido do Açúcar ao Consumidor=

Preço Percebido do Açúcar ao Produtor*

Margem de Comercialização Açúcar

Units: US\$/Ton Açúcar

(173) Tempo de Ajuste da Demanda=5

Units: Ano

(174) Variação do Preço de Referência do Açúcar ao Consumidor=

(Preço Percebido do Açúcar ao Consumidor-

Preço de Referência do Açúcar ao Consumidor)/

Horizonte de Tempo de Referência do Preço do Açúcar

Units: US\$/(Ano*Ton Açúcar)

Fonte: Elaboração própria.

Demanda Natural de Açúcar no Mercado Interno

Tabela 28 – Equações do módulo M01200 – Demanda Natural de Açúcar no Mercado Interno

.M01200	
(175)	<p>"Consumo Acucar no Brasil (1980)"= 6.107e+006</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(176)	<p>"Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil"= INTEG (</p> <p style="padding-left: 40px;">"Taxa de Variacao do Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil",</p> <p style="padding-left: 40px;">"Consumo Medio de Acucar por Pessoa Brasil (1980)")</p> <p>Units: Ton Acucar/(Ano*Pessoa)</p>
(177)	<p>"Consumo Medio de Acucar por Pessoa Brasil (1980)"=</p> <p style="padding-left: 40px;">"Consumo Acucar no Brasil (1980)"/"Populacao Brasileira (1980)"</p> <p>Units: Ton Acucar/(Ano*Pessoa)</p>
(178)	<p>Demanda Natural de Acucar no Mercado Interno=</p> <p style="padding-left: 40px;">"Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil" * Populacao Brasileira</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(179)	<p>"Erro % Populacao Brasileira"=</p> <p style="padding-left: 40px;">(Populacao Brasileira-MR Populacao Brasileira)/MR Populacao Brasileira</p> <p>Units: Dmnl</p>
(180)	<p>MR Populacao Brasileira:=</p> <p style="padding-left: 40px;">GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'PopBrasil' , 'A' , 'B2')</p> <p>Units: Pessoas</p>
(181)	<p>Populacao Brasileira= INTEG (</p> <p style="padding-left: 40px;">Taxa de Variacao da Populacao Brasileira,</p> <p style="padding-left: 40px;">"Populacao Brasileira (1980)")</p> <p>Units: Pessoas</p>
(182)	<p>"Populacao Brasileira (1980)"=1.18563e+008</p> <p>Units: Pessoas</p>
(183)	<p>Populacao Brasileira Maxima Estimada=</p> <p style="padding-left: 40px;">2.19125e+008</p> <p>Units: Pessoas</p> <p>População em 2039, segundo estimativa do IBGE;</p> <p>Fonte: IBGE (2012);</p> <p>Disponível em:</p> <p>ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_Projecoes_Populacao/Revisao_2008_Projecoes_1980_2050/</p> <p>Revisao_2008_Projecoes_1980_2050/Projecoes_1980_2050_revisao_2008.zip</p>

- (184) "Razao PB / PBME"=
Populacao Brasileira/Populacao Brasileira Maxima Estimada
Units: Dmnl
- (185) "Taxa % de Variacao da Populacao Brasileira"=
"Taxa % Natural de Variacao da Populacao Brasileira"*
(1-"Razao PB / PBME")
Units: Dmnl/Ano
- (186) "Taxa % de Variacao do Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil"=
0.0075
Units: Dmnl/Ano
- (187) "Taxa % Natural de Variacao da Populacao Brasileira"=0.06
Units: Dmnl/Ano
- (188) Taxa de Variacao da Populacao Brasileira=
Populacao Brasileira*"Taxa % de Variacao da Populacao Brasileira"
Units: Pessoas/Ano
- (189) "Taxa de Variacao do Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil"=
"Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil"*
"Taxa % de Variacao do Consumo Medio de Acucar por Pessoa - Brasil"
Units: Ton Acucar/(Ano*Ano*Pessoa)
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01300 – Demanda de Açúcar Brasileiro no Mercado Externo.

Figura 111 – Diagrama de Forrester do Módulo M01300 – Demanda de Açúcar Brasileiro no Mercado Externo.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 29 – Equações do módulo M01300 – Demanda de Açúcar Brasileiro no Mercado Externo

.M01300	
(190)	<p>"Atratividade Percebida (1980)"=</p> $\frac{\text{MR Exportacao de Acucar Brasileiro/}}{\text{Consumo Mundial de Acucar/}} \cdot \frac{\text{Efeito da Razao Producao Consumo no Brasil/}}{\text{Efeito Preco Internacional do Acucar}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(191)	<p>Consumo Mundial de Acucar=</p> $\text{Demanda Natural Inernacional de Acucar}$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(192)	<p>Demanda de Acucar Brasileiro para Exportacao=</p> $\frac{\text{Consumo Mundial de Acucar}^*}{\text{Efeito da Razao Producao Consumo no Brasil}^*} \cdot \frac{\text{Efeito Preco Internacional do Acucar}^*}{\text{Expressao Percebida do Brasil no Mercado Internacional de Acucar}}$ <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(193)	<p>Efeito da Razao Producao Consumo no Brasil=IF THEN ELSE</p> <p>("Percepcao da Razao Producao/Consumo de Acucar no Brasil"</p> <p>^Sensibilidade da Razao Producao Consumo no Brasil >0.75 , 0.75 ,</p> <p>"Percepcao da Razao Producao/Consumo de Acucar no Brasil" ^</p> <p>Sensibilidade da Razao Producao Consumo no Brasil)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(194)	<p>Efeito Preco Internacional do Acucar=</p> $\text{"Razao PIA / MHPIA"}^{\text{^Sensibilidade PIA}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(195)	<p>"Erro % Exportacao de Acucar Brasileiro"=</p> $\frac{(\text{Demanda de Acucar Brasileiro para Exportacao-}}{\text{MR Exportacao de Acucar Brasileiro)/}} \cdot \frac{\text{MR Exportacao de Acucar Brasileiro}}{\text{MR Exportacao de Acucar Brasileiro}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(196)	<p>Expressao do Brasil no Mercado Internacional de Acucar=</p> $\frac{\text{Producao de Acucar/Consumo Mundial de Acucar}}{\text{Producao de Acucar/Consumo Mundial de Acucar}}$ <p>Units: Dmnl</p>

- (197) Expressao Percebida do Brasil no Mercado Internacional de Acucar= INTEG (Variacao da Expressao Percebido do Brasil no Mercado Internacional de Acucar, "Atratividade Percebida (1980)")
Units: Dmnl
- (198) Media Historica do Preco Internacional do Acucar= SMOOTHI(Preco Internacional do Acucar, Tempo de Ajuste de Media , 305.8)
Units: US\$/Ton Acucar
- (199) MR Consumo de Acucar:= GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'ConsInternoAcucar' , 'A' , 'C2')
Units: Ton Acucar/Ano
- (200) MR Exportacao de Acucar Brasileiro:= GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Export_Import_Acucar', 'A' , 'J3')
Units: Ton Acucar/Ano
- (201) "Percepcao da Razao Producao/Consumo de Acucar no Brasil"= SMOOTHI("Razao Producao / Consumo no Brasil", "Tempo de Percepcao da Razão Producao/Consumo no Brasil" , "Percepcao Estimada da Razao Producao/ Consumo de Acucar no Brasil (1980)")
Units: Dmnl
- (202) "Percepcao Estimada da Razao Producao/Consumo de Acucar no Brasil (1980)"= 0.073
Units: Dmnl
- (203) Preco Internacional do Acucar:= GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Preco_Int_Acucar' , 'A' , 'D7')
Units: US\$/Ton Acucar
- (204) "Razao PIA / MHPIA"= Preco Internacional do Acucar/
Media Historica do Preco Internacional do Acucar
Units: Dmnl

- (205) "Razao Producao / Consumo no Brasil"=
(Entregas de Acucar-
Encomendas de Acucar no Mercado Interno)/
Entregas de Acucar
Units: Dmnl
- (206) Sensibilidade da Razao Producao Consumo no Brasil= 0.89
Units: Dmnl
- (207) Sensibilidade PIA=0.2
Units: Dmnl
- (208) Tempo de Ajuste da Atratividade Percebida= 3
Units: Ano [1,5]
- (209) Tempo de Ajuste de Media=5
Units: Ano
- (210) "Tempo de Percepcao da Razão Producao/Consumo no Brasil"=0.5
Units: Ano
- (211) Variacao da Expressao Percebido do Brasil no Mercado Internacional de Acucar=
(Expressao do Brasil no Mercado Internacional de Acucar-
Expressao Percebida do Brasil no Mercado Internacional de Acucar)/
Tempo de Ajuste da Atratividade Percebida
Units: Dmnl/Ano
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01400 – Consumo Mundial de Açúcar.

Figura 112 – Diagrama de Forrester do módulo M01400 – Consumo Mundial de Açúcar.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 30 – Equações do módulo M01400 – Consumo Mundial de Açúcar.

.M01400	
(212)	<p>Capacidade Populacional da Terra Hipotética=1.19756e+010</p> <p>Units: Pessoas</p> <p>Valor obtido por calibração do modelo</p>
(213)	<p>"Consumo Internacional de Acucar (1980)"= 9.1826e+007</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(214)	<p>Consumo Natural de Acucar por Pessoa= INTEG (</p> <p>Variacao da Tendencia Internacional de Consumo de Acucar,</p> <p>"Consumo Internacional de Acucar (1980)"/"Populacao Mundial (1980)")</p> <p>Units: Ton Acucar/(Ano*Pessoa)</p>
(215)	<p>Demanda Natural Inernacional de Acucar=</p> <p>Consumo Natural de Acucar por Pessoa*Populacao Mundial</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(216)	<p>"Erro % Demanda Natural Inernacional de Acucar"=</p> <p>(Demanda Natural Inernacional de Acucar-</p> <p>MR Demanda Natural Inernacional de Acucar)/</p> <p>MR Demanda Natural Inernacional de Acucar</p> <p>Units: Dmnl</p>
(217)	<p>"Erro % Populacao Mundial"=</p> <p>(Populacao Mundial-MR Populacao Mundial)/MR Populacao Mundial</p> <p>Units: Dmnl</p>
(218)	<p>MR Demanda Natural Inernacional de Acucar:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'USDA - P_E_D' , 'B' , 'U2')</p> <p>Units: Ton Acucar/Ano</p>
(219)	<p>MR Populacao Mundial:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'Populacao_Mundial' , 'A' , 'B2')</p> <p>Units: Pessoas</p>
(220)	<p>"PM/CPTH"=</p> <p>Populacao Mundial/Capacidade Populacional da Terra Hipotética</p> <p>Units: Dmnl</p>
(221)	<p>Populacao Mundial= INTEG (</p> <p>Taxa de Variacao Liquida da Populacao Mundial,"Populacao Mundial (1980)")</p> <p>Units: Pessoas</p>

(222) "Populacao Mundial (1980)"=

4.45301e+009

Units: Pessoas

Fonte: UN, Dept. of Economic and Social Affairs, Population Division (2011). World Population Prospects: The 2010 Revision. note: 1950-2010 are estimates and from 2011-2100 are projected populations in the medium-fertility variant.

(223) "Taxa % da Variacao da Tendencia Internacional de Consumo de Acucar"=

0.0033

Units: Dmnl/Ano [?,?,0.0001]

(224) "Taxa % de Variacao da Populacao Mundial"=

"Taxa % Natural de Variacao da Populacao Mundial"*(1-"PM/CPTH")

Units: Dmnl/Ano

(225) "Taxa % Natural de Variacao da Populacao Mundial"= 0.0272772

Units: Dmnl/Ano

(226) Taxa de Variacao Liquida da Populacao Mundial=

Populacao Mundial*"Taxa % de Variacao da Populacao Mundial"

Units: Pessoas/Ano

(227) Variacao da Tendencia Internacional de Consumo de Acucar=

Consumo Natural de Acucar por Pessoa*

"Taxa % da Variacao da Tendencia Internacional de Consumo de Acucar"

Units: Ton Acucar/(Ano*Ano*Pessoa)

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M1500 – Preço do Açúcar

Figura 113 – Diagrama de Forrester do Módulo M01500 – Preço do Açúcar.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 31 – Equações do módulo M01500 – Preço do Açúcar

.M01500	
(228)	<p>Efeito da Cobertura de Estoque no Preço do Acucar ao Produtor=</p> $\frac{(\text{Cobertura de Estoque Desejada para o Acucar} / \text{Expectativa da Cobertura de Estoque do Acucar})^{\wedge}}{\text{Sensibilidade do Preço do Acucar ao Produtor a Cobertura de Estoque}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(229)	<p>Efeito dos Custos no Preço de Referencia do Acucar ao Produtor=</p> $\frac{1 + \text{Sensibilidade do Preço do Acucar ao Produtor aos Custos} * (\text{Expectativa de Custos Totais Unitarios do Acucar no Longo Prazo} / \text{Preço Percebido do Acucar ao Produtor} - 1)}{1}$ <p>Units: Dmnl</p>
(230)	<p>"Erro % Preço do Acucar ao Produtor"=</p> $\frac{(\text{Preço do Acucar ao Consumidor} - \text{MR Preço do Acucar ao Consumidor}) / \text{MR Preço do Acucar ao Consumidor}}{1}$ <p>Units: Dmnl</p>
(231)	<p>Margem de Comercializacao Acucar= 1.7</p> <p>Units: Dmnl [1,3,0.01]</p> <p>Valor Base Calibrado = 1.7</p>
(232)	<p>MR Preço do Acucar ao Consumidor:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Exportacoes Acucar' , 'A' , 'D2')</p> <p>Units: US\$/Ton Acucar</p>
(233)	<p>Preço do Acucar ao Consumidor=</p> $\text{Preço do Acucar ao Produtor} * \text{Margem de Comercializacao Acucar}$ <p>Units: US\$/Ton Acucar</p>
(234)	<p>"Preço do Acucar ao Consumidor (1980)"=360</p> <p>Units: US\$/Ton Acucar</p> <p>Preço Internacional do Açúcar em 1980 = 712;</p> <p>Fonte: USDA(2011)</p>

- (235) Preço do Acucar ao Produtor=
Preço Percebido do Acucar ao Produtor*
Efeito da Cobertura de Estoque no Preço do Acucar ao Produtor*
Efeito dos Custos no Preço de Referencia do Acucar ao Produtor
Units: US\$/Ton Acucar
- (236) Preço do Acucar ao Produtor Indicado=MAX(Preço do Acucar ao Produtor,
Expectativa de Custos Variaveis do Acucar no Curto Prazo)
Units: US\$/Ton Acucar
- (237) Preço Percebido do Acucar ao Produtor= INTEG (
Variacao do Preço Percebido do Acucar ao Produtor,
"Preço do Acucar ao Consumidor (1980)"/
Margem de Comercializacao Acucar)
Units: US\$/Ton Acucar
- (238) Sensibilidade do Preço do Acucar ao Produtor a Cobertura de Estoque=0.63
Units: Dmnl [0,5,0.01]
Valor Base Calibrado = 0.63
- (239) Sensibilidade do Preço do Acucar ao Produtor aos Custos=1.63
Units: Dmnl [0,5,0.01]
Valor Base Calibrado = 1.63
- (240) Tempo de Ajuste da Variacao do Preço Percebido do Acucar ao Produtor=2
Units: Ano
- (241) Variacao do Preço Percebido do Acucar ao Produtor=
(Preço do Acucar ao Produtor Indicado-
Preço Percebido do Acucar ao Produtor)/
Tempo de Ajuste da Variacao do Preço Percebido do Acucar ao Produtor
Units: US\$/Ton Acucar/Ano
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01600 – Frota Carros Gasolina

Tabela 32 – Equações do módulo M01600 – Frota de Carros a Gasolina

.M01600	
(242)	<p>"Erro % Frota Carros Gasolina"=</p> $\frac{(\text{Frota Carros Gasolina}-\text{MR Frota Carros Gasolina})}{\text{MR Frota Carros Gasolina}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(243)	<p>Frota Carros Gasolina=</p> $\text{Frota Gasolina Novos} + \text{"Frota Gasolina Semi-Novos"} + \text{Frota Gasolina Usados}$ <p>Units: Carros</p>
(244)	<p>Frota Gasolina Novos= INTEG (</p> $\begin{aligned} &\text{"Novos Carros Gasolina (Exogena)" -} \\ &\text{"Taxa Carros Gasolina Semi-Novos",} \\ &\text{"Frota Gasolina Novos (1980)"} \end{aligned}$ <p>Units: Carros</p>
(245)	<p>"Frota Gasolina Novos (1980)"=4e+006</p> <p>Units: Carros</p>
(246)	<p>"Frota Gasolina Semi-Novos (1980)"=2.56e+006</p> <p>Units: Carros</p>
(247)	<p>"Frota Gasolina Semi-Novos"= INTEG (</p> $\begin{aligned} &\text{"Taxa Carros Gasolina Semi-Novos" -} \\ &\text{Taxa Carros Gasolina Usados,} \\ &\text{"Frota Gasolina Semi-Novos (1980)"} \end{aligned}$ <p>Units: Carros</p>
(248)	<p>Frota Gasolina Usados= INTEG (</p> $\begin{aligned} &\text{Taxa Carros Gasolina Usados -} \\ &\text{Taxa Sucateamento Carros Gasolina,} \\ &\text{"Frota Gasolina Usados (1980)"} \end{aligned}$ <p>Units: Carros</p>
(249)	<p>"Frota Gasolina Usados (1980)"=</p> $\begin{aligned} &\text{"Frota Total Gasolina (1980)" -} \\ &\text{"Frota Gasolina Novos (1980)" -} \\ &\text{"Frota Gasolina Semi-Novos (1980)"} \end{aligned}$ <p>Units: Carros</p>

.M01600	
(250)	" Frota Total Gasolina (1980)" = 8.6789e+006 Units: Carros
(251)	MR Frota Carros Gasolina = GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'Frota Nacional' , 'A' , 'H6') Units: Carros
(252)	" Novos Carros Gasolina (Exogena)" = GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'Vendas Carros Brasil' , 'A' , 'B2') Units: Carros/Ano
(253)	" Taxa Carros Gasolina Semi-Novos" = Frota Gasolina Novos / Tempo Medio de Vida de Carros a Gasolina Units: Carros/Ano
(254)	Taxa Carros Gasolina Usados = " Frota Gasolina Semi-Novos" / Tempo Medio de Vida de Carros a Gasolina Units: Carros/Ano
(255)	Taxa Sucateamento Carros Gasolina = Frota Gasolina Usados / Tempo Medio de Vida de Carros a Gasolina Units: Carros/Ano
(256)	Tempo Medio de Vida de Carros a Gasolina = 5.8 Units: Ano [?, ?, 0.01]

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01700 – Frota de Carros Flex

Figura 115 – Diagrama de Forrester do Módulo M01700 – Frota de Carros Flex.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 33 – Equações do módulo M01700 – Frota de Carros Flex.

.M01700	
(257)	<p>"Erro % Frota Carros Flex"= $\text{ZIDZ}((\text{Frota Carros Flex}-\text{MR Frota Carros Flex}), \text{MR Frota Carros Flex})$ Units: Dmnl</p>
(258)	<p>Frota Carros Flex= $\text{Frota Flex Novos} + \text{"Frota Flex Semi-Novos"} + \text{Frota Flex Usados}$ Units: Carros</p>
(259)	<p>Frota Flex Novos= INTEG ($\text{"Novos Carros Flex (Exogena)" - "Taxa Carros Flex Semi-Novos",}$ $\text{"Frota Flex Novos (1980)"}$ Units: Carros</p>
(260)	<p>"Frota Flex Novos (1980)"=0 Units: Carros</p>
(261)	<p>"Frota Flex Semi-Novos (1980)"=0 Units: Carros</p>
(262)	<p>"Frota Flex Semi-Novos"= INTEG ($\text{"Taxa Carros Flex Semi-Novos"} - \text{Taxa Carros Flex Usados,}$ $\text{"Frota Flex Semi-Novos (1980)"}$ Units: Carros</p>
(263)	<p>Frota Flex Usados= INTEG ($\text{Taxa Carros Flex Usados} - \text{Taxa Sucateamento Carros Flex,}$ $\text{"Frota Flex Usados (1980)"}$ Units: Carros</p>
(264)	<p>"Frota Flex Usados (1980)"= $\text{"Frota Total Flex (1980)" -}$ $\text{"Frota Flex Novos (1980)" -}$ $\text{"Frota Flex Semi-Novos (1980)"}$ Units: Carros</p>
(265)	<p>"Frota Total Flex (1980)"=0 Units: Carros</p>
(266)	<p>MR Frota Carros Flex:= $\text{GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'FrotaNacional' , 'A' , 'J6')}$ Units: Carros</p>

(267) "Novos Carros Flex (Exogena)":=

GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'VendasCarrosBrasil' , 'A' , 'D2')

Units: Carros/Ano

(268) "Taxa Carros Flex Semi-Novos"=

Frota Flex Novos/Tempo Medio de Vida de Carros Flex

Units: Carros/Ano

(269) Taxa Carros Flex Usados=

"Frota Flex Semi-Novos"/Tempo Medio de Vida de Carros Flex

Units: Carros/Ano

(270) Taxa Sucateamento Carros Flex=

Frota Flex Usados/Tempo Medio de Vida de Carros Flex

Units: Carros/Ano

(271) Tempo Medio de Vida de Carros Flex=5.65

Units: Ano

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01800 – Frota de Carros Etanol

Tabela 34 – Equações do módulo M01800 – Frota de Carros a Etanol.

.M01800	
(272)	"Erro % Frota Carros Etanol"= (Frota Carros Etanol-MR Frota Carros Etanol)/MR Frota Carros Etanol Units: Dmnl
(273)	Frota Carros Etanol= Frota Etanol Novos+"Frota Etanol Semi-Novos"+Frota Etanol Usados Units: Carros
(274)	Frota Etanol Novos= INTEG ("Novos Carros Etanol (Exogena)"-"Taxa Carros Etanol Semi-Novos", "Frota Etanol Novos (1980)") Units: Carros
(275)	"Frota Etanol Novos (1980)"= 243102 Units: Carros
(276)	"Frota Etanol Semi-Novos (1980)"=0 Units: Carros
(277)	"Frota Etanol Semi-Novos"= INTEG ("Taxa Carros Etanol Semi-Novos"-Taxa Carros Etanol Usados, "Frota Etanol Semi-Novos (1980)") Units: Carros
(278)	Frota Etanol Usados= INTEG (Taxa Carros Etanol Usados-Taxa Sucateamento Carros Etanol, "Frota Etanol Usados (1980)") Units: Carros
(279)	"Frota Etanol Usados (1980)"=0 Units: Carros
(280)	MR Frota Carros Etanol:= GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'FrotaNacional' , 'A' , 'I6') Units: Carros
(281)	"Novos Carros Etanol (Exogena)" := GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'VendasCarrosBrasil' , 'A' , 'C2') Units: Carros/Ano

(282) "Taxa Carros Etanol Semi-Novos"=

Frota Etanol Novos/Tempo Medio de Vida de Carros a Etanol

Units: Carros/Ano

(283) Taxa Carros Etanol Usados=

"Frota Etanol Semi-Novos"/Tempo Medio de Vida de Carros a Etanol

Units: Carros/Ano

(284) Taxa Sucateamento Carros Etanol=

Frota Etanol Usados/Tempo Medio de Vida de Carros a Etanol

Units: Carros/Ano

(285) Tempo Medio de Vida de Carros a Etanol=5.7

Units: Ano

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M01900 – Demanda Natural de Etanol Anidro

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 35 – Equações do módulo M01900 – Demanda Natural de Etanol Anidro.

.M01900	
(286)	<p>Demanda Natural de Etanol Anidro=</p> <p>Demanda Natural de Etanol Anidro por Carros Flex+</p> <p>Demanda Natural de Etanol Anidro por Carros Gasolina</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(287)	<p>Demanda Natural de Etanol Anidro por Carros Flex=</p> <p>(Frota Flex Novos*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Novos)" +</p> <p>"Frota Flex Semi-Novos"*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Semi Novos)"</p> <p>+Frota Flex Usados*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Usados)") *</p> <p>(1-Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex)*</p> <p>Taxa de Etanol Anidro na Gasolina/</p> <p>Rendimento Medio Motor Flex Usando Gasolina</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(288)	<p>Demanda Natural de Etanol Anidro por Carros Gasolina=</p> <p>(Frota Gasolina Novos*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Novos)" +</p> <p>"Frota Gasolina Semi-Novos"*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Semi Novos)" +</p> <p>Frota Gasolina Usados*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Usados)")</p> <p>*Taxa de Etanol Anidro na Gasolina/</p> <p>Rendimento Medio Motor Gasolina</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(289)	<p>MR Demanda Natural de Etanol Anidro:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'ConsumoInternoEtanol' , 'A' , 'B2')</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(290)	<p>Rendimento Medio Motor Flex Usando Gasolina=11386</p> <p>Units: KM/M3 Gasolina</p> <p>MMA (2011) - Valor médio do Inventário de Emissões</p>

.M01900	
(291)	<p>Rendimento Medio Motor Gasolina= 10727</p> <p>Units: KM/M3 Gasolina</p> <p>MMA (2011), Valor Medio do Inventário de Emissões.</p>
(292)	<p>Taxa de Etanol Anidro na Gasolina=0.22</p> <p>Units: M3 Etanol/M3 Gasolina</p>
(293)	<p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Novos)"= 18000</p> <p>Units: KM/(Ano*Carros)</p>
(294)	<p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Semi Novos)"=16500</p> <p>Units: KM/(Ano*Carros)</p>
(295)	<p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Usados)"=15000</p> <p>Units: KM/(Ano*Carros)</p>
Fonte: Elaboração própria.	

Módulo M02000 – Demanda Natural de Etanol Hidratado.

Figura 118 – Diagrama de Forrester do Módulo M02000 – Demanda Natural de Etanol Hidratado.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 36 – M02000 – Demanda Natural de Etanol Hidratado.

.M02000	
(296)	<p>Demanda Natural de Etanol Hidratado=</p> <p>Demanda Natural de Etanol Hidratado por Carros Etanol+</p> <p>Demanda Natural de Etanol Hidratado por Carros Flex</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(297)	<p>Demanda Natural de Etanol Hidratado por Carros Etanol=</p> <p>(Frota Etanol Novos*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Novos)" +</p> <p>"Frota Etanol Semi-Novos"*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Semi Novos)"</p> <p>+Frota Etanol Usados*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Usados)"/</p> <p>Rendimento Medio Motor a Etanol</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(298)	<p>Demanda Natural de Etanol Hidratado por Carros Flex=</p> <p>(Frota Flex Novos*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Novos)" +</p> <p>"Frota Flex Semi-Novos"*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Semi Novos)"</p> <p>+Frota Flex Usados*</p> <p>"Taxa Media de Intensidade de Uso (Carros Usados)"/</p> <p>Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex/</p> <p>Rendimento Medio Motor Flex Usando Etanol</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(299)	<p>MR Demanda Natural de Etanol Hidratado:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'ConsumoInternoEtanol' , 'A' , 'C2')</p> <p>Units: M3 Etanol/Ano</p>
(300)	<p>Rendimento Medio Motor a Etanol=7744</p> <p>Units: KM/M3 Etanol</p> <p>MMA(2011) - Valor Médio dos valores no Inventário de Emissões</p>
(301)	<p>Rendimento Medio Motor Flex Usando Etanol=7554</p> <p>Units: KM/M3 Etanol</p> <p>Valor médio do inventário de emissões (MMA, 2011).</p>

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M02100 – Preço do Etanol.

Tabela 37 – Equações do módulo M02100 – Preço do Etanol

.M02100	
(302)	<p>Efeito da Cobertura de Estoque no Preço do Etanol ao Produtor=</p> $\frac{\text{(Cobertura de Estoque Desejada para o Acucar/ Expectativa da Cobertura de Estoque do Etanol)}^{\wedge}}{\text{Sensibilidade do Preço do Etanol ao Produtor a Cobertura de Estoque}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(303)	<p>Efeito dos Custos no Preço do Etanol ao Produtor=</p> $\frac{1+\text{Sensibilidade do Preço do Etanol ao Produtor aos Custos}^*}{\text{(Expectativa de Custos Totais Unitarios do Etanol no Longo Prazo/ Preço de Referencia do Etanol ao Produtor-1)}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(304)	<p>"Erro % Preço do Etanol ao Consumidor"=</p> $\frac{\text{(Preço do Etanol ao Consumidor- MR Preço do Etanol ao Consumidor)}/}{\text{MR Preço do Etanol ao Consumidor}}$ <p>Units: Dmnl</p>
(305)	<p>Margem de Comercializacao do Etanol=1.5</p> <p>Units: Dmnl</p> <p>Valor Base Calibrado = 1.56</p>
(306)	<p>MR Preço do Etanol ao Consumidor:=</p> $\text{GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx' , 'Combustiveis' , 'A' , 'J4')}$ <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>
(307)	<p>Preço de Referencia do Etanol ao Produtor=</p> $\text{INTEG (Variacao do Preço de Referencia do Etanol ao Produtor, Custos Totais Unitarios Etanol)}$ <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>
(308)	<p>Preço de Referencia do Etanol ao Produtor Indicado= MAX(</p> <p>Preço do Etanol ao Produtor,</p> <p>Expectativa de Custos Variaveis do Etanol no Curto Prazo)</p> <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>
(309)	<p>Preço do Etanol ao Consumidor=</p> $\text{Preço do Etanol ao Produtor}^* \text{Margem de Comercializacao do Etanol}$ <p>Units: US\$/M3 Etanol</p>

- (310) Preço do Etanol ao Produtor=
Preço de Referência do Etanol ao Produtor*
Efeito da Cobertura de Estoque no Preço do Etanol ao Produtor*
Efeito dos Custos no Preço do Etanol ao Produtor
Units: US\$/M3 Etanol
- (311) Sensibilidade do Preço do Etanol ao Produtor a Cobertura de Estoque=1.56
Units: Dmnl [0,5,0.01]
Valor Base Calibrado = 0.38
- (312) Sensibilidade do Preço do Etanol ao Produtor aos Custos=2.19
Units: Dmnl [0,5,0.01]
Valor Base Calibrado = 2.19
- (313) Tempo de Ajuste da Variação do Preço de Referência do Etanol ao Produtor= 1
Units: Ano
- (314) Variação do Preço de Referência do Etanol ao Produtor=
(Preço de Referência do Etanol ao Produtor Indicado-
Preço de Referência do Etanol ao Produtor)/
Tempo de Ajuste da Variação do Preço de Referência do Etanol ao Produtor
Units: US\$/M3 Etanol/Ano
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M02200 – Decisão de Uso de Etanol em Carros Flex

Figura 120 – Diagrama de Forrester do Módulo M02200 – Decisão de uso de Etanol em Carros Flex.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 38 – Equações do módulo M02200 – Decisão de uso de Etanol em Carros Flex.

.M02200	
(315)	<p>Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex=</p> <p>Decisao Media de Uso de Combustivel em Carros Flex*</p> <p>Efeito da Razao de Preco Etanol Gasolina na Decisao de Uso de Combustivel em Carros Flex</p> <p>Units: Dmnl</p>
(316)	<p>Decisao Media de Uso de Combustivel em Carros Flex=0.56</p> <p>Units: Dmnl</p> <p>Valor Base = 0.56, que representa a média das decisões de uso de combustível no período decorrido entre os anos de 2004 e 2009.</p> <p>Referência: Goldemberg (2008)</p>
(317)	<p>Efeito da Razao de Preco Etanol Gasolina na Decisao de Uso de Combustivel em Carros Flex=</p> <p>Tabela de Efeito da Razao de Preco Etanol Gasolina na Decisao de Uso de Combustivel em Carros Flex(</p> <p>Razao do Preco do Etanol sobre Gasolina Corrigido pela Taxa de Equivalencia Energetica)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(318)	<p>"Erro % Decisao de Uso de Combustivel em Carros Flex"=</p> <p>(Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex-</p> <p>MR Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex)/</p> <p>MR Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex</p> <p>Units: Dmnl</p>
(319)	<p>Fator de Conversao de Unidade=1</p> <p>Units: M3 Gasolina/M3 Etanol [1,1]</p>
(320)	<p>MR Decisao de Uso de Etanol em Carros Flex=</p> <p>Tabela de Efeito da Razao Preco Etanol sobre Preco Gasolina na Decisao de Uso de Combustiveis(Razao entre o Precos do Etanol e Gasolina)</p> <p>Units: Dmnl</p>
(321)	<p>MR Preco da Gasolina ao Consumidor:=</p> <p>GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Combustiveis', 'A', 'H4')</p> <p>Units: US\$/M3 Gasolina</p>

- (322) MR Preço do Litro de Etanol ao Consumidor:=
GET XLS DATA('MR Modelo Tese.xlsx', 'Combustiveis', 'A', 'J4')
Units: US\$/M3 Etanol
- (323) Razao do Preço do Etanol sobre Gasolina Corrigido pela Taxa de Equivalencia Energetica=
Preço do Etanol ao Consumidor/
(MR Preço da Gasolina ao Consumidor*
Taxa de equivalencia energética)
Units: Dmnl
- (324) Razao entre o Precos do Etanol e Gasolina=
MR Preço do Litro de Etanol ao Consumidor/
MR Preço da Gasolina ao Consumidor/
Fator de Conversao de Unidade
Units: Dmnl
- (325) Tabela de Efeito da Razao de Preço Etanol Gasolina na Decisao de Uso de Combustivel em Carros Flex([(0,0)-(2,2)],(0,1.5),(2,0))
Units: Dmnl
- (326) Tabela de Efeito da Razao Preço Etanol sobre Preço Gasolina na Decisao de Uso de Combustiveis([(0,0)-(1,1)],
(0,1),(0.4,1),(0.45,0.98),(0.5,0.95),(0.55,0.8),(0.6,0.55),
(0.65,0.35),(0.7,0.18),(0.75,0.1),(0.8,0.05),(0.9,0.02),(1,0))
Units: Dmnl
Fonte: Goldemberg et al. (2008)
- (327) Taxa de equivalencia energética=0.7
Units: M3 Gasolina/M3 Etanol
-

Fonte: Elaboração própria.

Módulo M02300 – Preço do Açúcar para Decisão

Tabela 39 – Equações do módulo M02300 – Preço do Açúcar para Decisão.

.M02300	
(328)	$\text{Exportacao Liquida de Acucar} = \frac{\text{Exportacoes de Acucar} - \text{Importacoes de Acucar}}{\text{Units: Ton Acucar/Ano}}$
(329)	$\text{Preco do Acucar para Decisao} = \frac{(\text{Preco do Acucar ao Produtor} * \text{Encomendas de Acucar no Mercado Interno} + \text{Preco Internacional do Acucar} * \text{Exportacao Liquida de Acucar})}{(\text{Encomendas de Acucar no Mercado Interno} + \text{Exportacao Liquida de Acucar})}$ Units: US\$/Ton Acucar

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE C
DADOS USADOS NO PROCESSO DE MODELAGEM

Relação de dados incluídos neste Apêndice

- Produção de cana-de-açúcar no Brasil (t de cana-de-açúcar/ano)
- Produção de açúcar no Brasil (t de açúcar/ano)
- Importações de açúcar para o Brasil (t de açúcar/ano)
- Exportações de açúcar do Brasil (t de açúcar/ano)
- Produção de etanol anidro, hidratado e total no Brasil (m³/ano)
- Importações de etanol para o Brasil (m³/ano)
- Exportações de Etanol do Brasil (m³/ano)
- Fração de cana-de-açúcar para a produção de açúcar (%)
- Fração de cana-de-açúcar para a produção de etanol (%)
- Demanda de açúcar no mercado interno (t de açúcar/ano)
- População do Brasil (Pessoas)
- População mundial (Pessoas)
- Consumo mundial de açúcar (t de açúcar/ano)
- Preço do açúcar ao consumidor no Brasil (US\$/t de açúcar)
- Preço do açúcar no mundo (US\$/t de açúcar)
- Vendas de carros a gasolina, etanol e flex (Carros/ano)
- Frota de carros a gasolina, etanol e flex (Carros)
- Preço do etanol ao consumidor no Brasil (US\$/m³ de etanol)
- Preço da gasolina ao consumidor (US\$/m³ de gasolina)
- Critério de decisão gasolina ou etanol (%)
- Taxa de Câmbio (R\$/US\$)
- Taxa de Inflação (%/ano)
- Custos de Produção da Cana-de-Açúcar (1998 – 2010)
- Custos de Produção do Etanol (1980 – 2002)
- Custos de Produção do Açúcar e do Etanol (2006 – 2010)
- Custos do Açúcar e do Etanol (1980 – 2010)

Produção de cana-de-açúcar no Brasil

Tabela 40 – Produção de cana-de-açúcar no Brasil

Safra	Cana Moída Própria	Cana Moída de Fornecedores	Cana Moída Total
1980/81	65.295.196	58.385.401	123.680.597
1981/82	65.114.308	67.772.034	132.886.342
1982/83	79.765.724	86.412.868	166.178.592
1983/84	96.404.041	100.338.900	196.742.941
1984/85	125.086.483	77.781.272	202.867.755
1985/86	139.979.016	83.227.251	223.206.267
1986/87	141.110.125	86.765.721	227.875.846
1987/88	143.171.908	81.325.642	224.497.550
1988/89	132.062.628	88.041.752	220.104.380
1989/90	133.741.406	89.160.937	222.902.343
1990/91	133.457.496	88.971.664	222.429.160
1991/92	137.533.346	91.688.897	229.222.243
1992/93	134.075.920	89.383.946	223.459.866
1993/94	123.921.310	82.614.206	206.535.516
1994/95	144.520.675	96.347.116	240.867.791
1995/96	144.697.685	105.178.890	249.876.575
1996/97	200.140.178	89.380.344	289.520.522
1997/98	206.717.827	95.480.689	302.198.516
1998/99	215.444.887	100.195.910	315.640.797
1999/00	211.352.494	98.770.290	310.122.784
2000/01	173.559.726	81.361.995	254.921.721
2001/02	191.936.935	100.392.206	292.329.141
2002/03	200.894.322	115.227.428	316.121.750
2003/04	228.428.646	128.682.237	357.110.883
2004/05	230.724.931	150.722.171	381.447.102
2005/06	232.462.389	150.019.613	382.482.002
2006/07	260.690.582	168.126.339	428.816.921
2007/08	284.567.712	211.275.480	495.843.192
2008/09	312.483.357	251.155.167	563.638.524
2009/10	343.077.671	259.176.496	602.254.167

Fonte: (MAPA, 2011)

Produção de açúcar no Brasil

Tabela 41 – Produção de açúcar no Brasil

Safra	Etanol anidro (m3)	Etanol hidratado (m3)	Etanol total (m3)
1980/81	2.105.289	1.601.086	3.706.375
1981/82	1.453.098	2.787.025	4.240.123
1982/83	3.549.405	2.273.634	5.823.039
1983/84	2.469.443	5.394.803	7.864.246
1984/85	2.102.585	7.089.744	9.192.329
1985/86	3.273.201	8.658.398	11.931.599
1986/87	2.163.469	8.343.243	10.506.712
1987/88	1.982.414	9.475.982	11.458.396
1988/89	1.716.490	9.928.392	11.644.882
1989/90	1.452.625	10.467.850	11.920.475
1990/91	1.286.568	10.228.583	11.515.151
1991/92	1.986.794	10.735.439	12.722.233
1992/93	2.216.385	9.513.106	11.729.491
1993/94	2.522.589	8.769.596	11.292.185
1994/95	2.873.470	9.892.440	12.765.910
1995/96	3.057.557	9.659.202	12.716.759
1996/97	4.629.340	9.801.109	14.430.449
1997/98	5.699.719	9.722.534	15.422.253
1998/99	5.679.998	8.246.823	13.926.821
1999/00	6.140.769	6.936.996	13.077.765
2000/01	5.584.730	4.932.805	10.517.535
2001/02	6.479.187	4.988.608	11.467.795
2002/03	7.009.063	5.476.363	12.485.426
2003/04	8.767.898	5.872.025	14.639.923
2004/05	8.172.488	7.035.421	15.207.909
2005/06	7.663.245	8.144.939	15.808.184
2006/07	8.078.306	9.861.122	17.939.428
2007/08	8.464.520	13.981.459	22.445.979
2008/09	9.623.020	17.959.717	27.582.737
2009/10	6.935.515	18.779.217	25.714.732
2010/11	7.220.200	17.540.400	24.760.600
2011/12	7.887.800	12.488.800	20.376.600

Fontes: (MAPA, 2011) para as safras 1980/1981 a 2009/2010; e
(UNICA - Multimidia, 2011) para as safras 2010/2011 e 2011/2012.

Importações de açúcar para o Brasil

Tabela 42 – Importações de açúcar para o Brasil

Ano	Quantidade (t/ano)	Valor (US\$)	Preço Médio (US\$/Tonelada)
1989	40	20.000,00	189,80
1990	0	10.000,00	500,00
1991	20	20.000,00	416,70
1992	100.440	18.090.000,00	1.090,60
1993	58.750	12.730.000,00	2.441,80
1994	52.980	13.230.000,00	6.309,00
1995	27.980	10.000.000,00	6.512,00
1996	50	680.000,00	5.239,60
1997	40	230.000,00	1.827,40
1998	40	50.000,00	1.200,20
1999	30	30.000,00	1.098,30
2000	20	30.000,00	1.445,00
2001	10	20.000,00	933,30
2002	20	20.000,00	2.097,20
2003	0	10.000,00	2.500,00
2004	10	90.000,00	5.625,00
2005	0	10.000,00	1.250,00
2006	20	40.000,00	1.645,20
2007	50	100.000,00	1.816,50
2008	10	60.000,00	7.262,90
2009	10	110.000,00	7.439,40

Fonte: (MAPA, 2011)

Exportações de açúcar do Brasil

Tabela 43 – Exportações de açúcar do Brasil

Ano	Quantidade (t/ano)	Valor (US\$)	Preço Médio (US\$/Tonelada)
1989	549.000	147.150.000,00	267,84
1990	926.000	325.700.000,00	351,68
1991	978.000	256.240.000,00	261,95
1992	1.344.000	329.820.000,00	245,42
1993	2.148.000	550.060.000,00	256,07
1994	2.743.000	787.860.000,00	287,23
1995	4.800.000	1.450.650.000,00	302,21
1996	5.378.000	1.608.740.000,00	299,14
1997	6.376.000	1.772.450.000,00	278,00
1998	8.371.000	1.943.440.000,00	232,15
1999	12.100.000	1.910.690.000,00	157,91
2000	6.502.000	1.199.110.000,00	184,41
2001	11.173.000	2.279.060.000,00	203,98
2002	13.354.000	2.093.640.000,00	156,78
2003	12.914.000	2.140.000.000,00	165,71
2004	15.764.000	2.640.230.000,00	167,49
2005	18.147.000	3.918.790.000,00	215,95
2006	18.870.000	6.166.000.000,00	326,76
2007	19.344.000	5.100.440.000,00	263,67
2008	19.472.000	5.482.970.000,00	290,69
2009	24.294.000	8.377.830.000,00	355,13

Fonte: (MAPA, 2011)

Produção de etanol anidro, hidratado e total no Brasil

Tabela 44 – Produção de etanol anidro, hidratado e total no Brasil.

Safra	Etanol anidro (m3)	Etanol hidratado (m3)	Etanol total (m3)
1980/81	2.105.289	1.601.086	3.706.375
1981/82	1.453.098	2.787.025	4.240.123
1982/83	3.549.405	2.273.634	5.823.039
1983/84	2.469.443	5.394.803	7.864.246
1984/85	2.102.585	7.089.744	9.192.329
1985/86	3.273.201	8.658.398	11.931.599
1986/87	2.163.469	8.343.243	10.506.712
1987/88	1.982.414	9.475.982	11.458.396
1988/89	1.716.490	9.928.392	11.644.882
1989/90	1.452.625	10.467.850	11.920.475
1990/91	1.286.568	10.228.583	11.515.151
1991/92	1.986.794	10.735.439	12.722.233
1992/93	2.216.385	9.513.106	11.729.491
1993/94	2.522.589	8.769.596	11.292.185
1994/95	2.873.470	9.892.440	12.765.910
1995/96	3.057.557	9.659.202	12.716.759
1996/97	4.629.340	9.801.109	14.430.449
1997/98	5.699.719	9.722.534	15.422.253
1998/99	5.679.998	8.246.823	13.926.821
1999/00	6.140.769	6.936.996	13.077.765
2000/01	5.584.730	4.932.805	10.517.535
2001/02	6.479.187	4.988.608	11.467.795
2002/03	7.009.063	5.476.363	12.485.426
2003/04	8.767.898	5.872.025	14.639.923
2004/05	8.172.488	7.035.421	15.207.909
2005/06	7.663.245	8.144.939	15.808.184
2006/07	8.078.306	9.861.122	17.939.428
2007/08	8.464.520	13.981.459	22.445.979
2008/09	9.623.020	17.959.717	27.582.737
2009/10	6.935.515	18.779.217	25.714.732
2010/11	7.220.200	17.540.400	24.760.600
2011/12	7.887.800	12.488.800	20.376.600

Fontes: (MAPA, 2011) para as safras 1980/1981 a 2009/2010; e
(UNICA - Multimidia, 2011) para as safras 2010/2011 e 2011/2012.

Importações de etanol para o Brasil

Tabela 45 – Importações de etanol para o Brasil

Ano	Volume (m3)	Valor (US\$)	Preço médio (US\$/m3)
1989	98.000	15.700.000	160,70
1990	847.400	205.500.000	242,50
1991	791.200	225.900.000	285,60
1992	238.900	60.100.000	251,70
1993	536.400	133.200.000	248,40
1994	1.254.600	380.100.000	303,00
1995	1.417.400	471.700.000	332,80
1996	926.700	327.400.000	353,30
1997	529.900	179.600.000	339,00
1998	12.500	4.300.000	343,30
1999	17.900	4.200.000	233,90
2000	64.000	11.900.000	186,60
2001	117.900	42.700.000	362,20
2002	1.700	900.000	502,10
2003	6.200	1.500.000	236,30
2004	400	300.000	836,30
2005	200	300.000	1.283,70
2006	100	200.000	2.546,60
2007	3.300	2.000.000	625,40
2008	900	1.500.000	1.637,90
2009	4.500	2.300.000	505,50

Fonte: (MAPA, 2011)

Exportações de Etanol do Brasil

Tabela 46 – Exportações de Etanol do Brasil

Ano	Volume (m3)	Valor (US\$)	Preço médio (US\$/m3)
1989	39.000	9.200.000	294,30
1990	37.000	7.400.000	248,80
1991	9.000	2.300.000	319,90
1992	208.000	55.900.000	335,40
1993	266.000	78.500.000	368,60
1994	293.000	88.300.000	376,40
1995	320.000	106.900.000	417,60
1996	261.000	95.400.000	456,50
1997	147.000	54.100.000	369,20
1998	118.000	35.500.000	301,20
1999	407.000	65.800.000	161,70
2000	227.000	34.800.000	153,10
2001	346.000	92.100.000	266,60
2002	759.000	169.200.000	222,90
2003	656.000	158.000.000	240,70
2004	2.321.000	497.700.000	214,40
2005	2.592.000	765.500.000	295,30
2006	3.429.000	1.605.000.000	468,10
2007	3.512.000	1.467.300.000	417,80
2008	5.124.000	2.390.100.000	466,50
2009	3.296.000	1.338.000.000	405,90

Fonte: (MAPA, 2011)

Fração de cana-de-açúcar para a produção de açúcar

Tabela 47 – Fração de cana-de-açúcar para a produção de açúcar

Ano	Safra	% Açúcar
1980	1980/81	56%
1981	1981/82	53%
1982	1982/83	47%
1983	1983/84	41%
1984	1984/85	36%
1985	1985/86	28%
1986	1986/87	32%
1987	1987/88	29%
1988	1988/89	29%
1989	1989/90	27%
1990	1990/91	28%
1991	1991/92	29%
1992	1992/93	32%
1993	1993/94	33%
1994	1994/95	35%
1995	1995/96	37%
1996	1996/97	36%
1997	1997/98	36%
1998	1998/99	43%
1999	1999/00	47%
2000	2000/01	47%
2001	2001/02	49%
2002	2002/03	51%
2003	2003/04	50%
2004	2004/05	51%
2005	2005/06	50%
2006	2006/07	50%
2007	2007/08	45%
2008	2008/09	39%
2009	2009/10	43%

Fonte: (MAPA, 2011)

Fração de cana-de-açúcar para a produção de etanol

Tabela 48 – Fração de cana-de-açúcar para a produção de etanol

Ano	Safra	% Etanol	% Anidro³⁸	% Hidratado³⁹
1980	1980/81	44%	58%	42%
1981	1981/82	47%	35%	65%
1982	1982/83	53%	62%	38%
1983	1983/84	59%	32%	68%
1984	1984/85	64%	24%	76%
1985	1985/86	72%	28%	72%
1986	1986/87	68%	21%	79%
1987	1987/88	71%	18%	82%
1988	1988/89	71%	15%	85%
1989	1989/90	73%	13%	87%
1990	1990/91	72%	12%	88%
1991	1991/92	71%	16%	84%
1992	1992/93	68%	20%	80%
1993	1993/94	67%	23%	77%
1994	1994/95	65%	23%	77%
1995	1995/96	63%	25%	75%
1996	1996/97	64%	33%	67%
1997	1997/98	64%	38%	62%
1998	1998/99	57%	42%	58%
1999	1999/00	53%	48%	52%
2000	2000/01	53%	54%	46%
2001	2001/02	51%	57%	43%
2002	2002/03	49%	57%	43%
2003	2003/04	50%	61%	39%
2004	2004/05	49%	55%	45%
2005	2005/06	50%	49%	51%
2006	2006/07	50%	46%	54%
2007	2007/08	55%	39%	61%
2008	2008/09	61%	36%	64%
2009	2009/10	57%	16%	41%

Fonte: (MAPA, 2011)

³⁸

Proporção da produção total de etanol usada para a produção de etanol anidro.

³⁹

Proporção da produção total de etanol usada para a produção de etanol hidratado.

Demanda de açúcar no mercado interno

Tabela 49 – Demanda de açúcar no mercado interno

Ano	Consumo de Açúcar no Mercado Interno (t de açúcar/ano)
1980	6.107.000
1981	5.832.000
1982	6.178.000
1983	6.300.000
1984	6.300.000
1985	6.300.000
1986	6.700.000
1987	6.400.000
1988	6.600.000
1989	6.800.000
1990	7.088.000
1991	7.400.000
1992	7.500.000
1993	7.500.000
1994	8.000.000
1995	8.100.000
1996	8.500.000
1997	8.800.000
1998	9.100.000
1999	9.100.000
2000	9.250.000
2001	9.450.000
2002	9.750.000
2003	10.400.000
2004	10.600.000
2005	10.630.000
2006	10.800.000
2007	11.400.000
2008	11.650.000
2009	11.800.000
2010	12.000.000

Fonte: (MAPA, 2011)

População do Brasil

Tabela 50 – População do Brasil

Ano	População	Taxa de Variação	Variação da População
1980	118.562.549		
1981	121.381.328	0,0235	2.818.779
1982	124.250.840	0,0234	2.869.512
1983	127.140.354	0,0230	2.889.514
1984	130.082.524	0,0229	2.942.170
1985	132.999.282	0,0222	2.916.758
1986	135.814.249	0,0209	2.814.967
1987	138.585.894	0,0202	2.771.645
1988	141.312.997	0,0195	2.727.103
1989	143.997.246	0,0188	2.684.249
1990	146.592.579	0,0179	2.595.333
1991	149.094.266	0,0169	2.501.687
1992	151.546.843	0,0163	2.452.577
1993	153.985.576	0,0160	2.438.733
1994	156.430.949	0,0158	2.445.373
1995	158.874.963	0,0155	2.444.014
1996	161.323.169	0,0153	2.448.206
1997	163.779.827	0,0151	2.456.658
1998	166.252.088	0,0150	2.472.261
1999	168.753.552	0,0149	2.501.464
2000	171.279.882	0,0149	2.526.330
2001	173.808.010	0,0147	2.528.128
2002	176.303.919	0,0143	2.495.909
2003	178.741.412	0,0137	2.437.493
2004	181.105.601	0,0131	2.364.189
2005	183.383.216	0,0125	2.277.615
2006	185.564.212	0,0118	2.180.996
2007	187.641.714	0,0111	2.077.502
2008	189.612.814	0,0105	1.971.100
2009	191.480.630	0,0098	1.867.816
2010	193.252.604	0,0092	1.771.974

Fonte: (IBGE, 2008) Dados em preto fornecidos pela fonte; dados em cinza calculados pelo autor.

População mundial

Tabela 51 – População mundial

Ano	População (Pessoas)	Taxa de Crescimento (%)	Taxa Líquida de Crescimento (Pessoas/Ano)
1980	4.453.007.478	1,77%	78.791.777
1981	4.531.799.255	1,77%	80.320.565
1982	4.612.119.820	1,78%	81.977.451
1983	4.694.097.271	1,78%	83.730.561
1984	4.777.827.832	1,79%	85.462.103
1985	4.863.289.935	1,80%	87.300.769
1986	4.950.590.704	1,80%	88.887.707
1987	5.039.478.411	1,78%	89.634.162
1988	5.129.112.573	1,74%	89.261.935
1989	5.218.374.508	1,69%	88.050.646
1990	5.306.425.154	1,63%	86.513.587
1991	5.392.938.741	1,58%	85.070.748
1992	5.478.009.489	1,53%	83.734.453
1993	5.561.743.942	1,49%	82.672.134
1994	5.644.416.076	1,45%	81.823.239
1995	5.726.239.315	1,41%	80.972.516
1996	5.807.211.831	1,38%	80.047.834
1997	5.887.259.665	1,35%	79.205.071
1998	5.966.464.736	1,32%	78.466.622
1999	6.044.931.358	1,29%	77.838.862
2000	6.122.770.220	1,26%	77.232.538
2001	6.200.002.758	1,24%	76.719.078
2002	6.276.721.836	1,22%	76.473.752
2003	6.353.195.588	1,21%	76.562.043
2004	6.429.757.631	1,20%	76.891.544
2005	6.506.649.175	1,19%	77.309.393
2006	6.583.958.568	1,18%	77.678.892
2007	6.661.637.460	1,17%	77.972.829
2008	6.739.610.289	1,16%	78.126.834
2009	6.817.737.123	1,15%	78.151.895
2010	6.895.889.018	1,13%	78.147.357

Fonte: (ONU, 2011). Dados em preto fornecidos pela fonte; dados em cinza calculados pelo autor.

Consumo mundial de açúcar

Tabela 52 – Consumo mundial de açúcar

Safra	Ano	Consumo Mundial de Açúcar (t/ano)
1980/1981	1980	91.286.000
1981/1982	1981	92.422.000
1982/1983	1982	94.643.000
1983/1984	1983	98.626.000
1984/1985	1984	97.854.000
1985/1986	1985	100.312.000
1986/1987	1986	105.045.000
1987/1988	1987	105.121.000
1988/1989	1988	106.053.000
1989/1990	1989	106.958.000
1990/1991	1990	110.136.000
1991/1992	1991	113.722.000
1992/1993	1992	113.977.000
1993/1994	1993	113.540.000
1994/1995	1994	115.644.000
1995/1996	1995	117.656.000
1996/1997	1996	120.942.000
1997/1998	1997	123.552.000
1998/1999	1998	124.828.000
1999/2000	1999	127.615.000
2000/2001	2000	130.392.000
2001/2002	2001	134.986.000
2002/2003	2002	139.082.000
2003/2004	2003	139.746.000
2004/2005	2004	142.578.000
2005/2006	2005	143.657.000
2006/2007	2006	151.339.000
2007/2008	2007	152.770.000
2008/2009	2008	154.559.000
2009/2010	2009	155.377.000
2010/2011	2010	156.788.000
2011/2012	2011	160.048.000

(USDA, 2011)

Preço do açúcar ao consumidor (Brasil)

Tabela 53 – Preço do açúcar ao consumidor (Brasil)

Ano	Valores do CEPEA (US\$/t de açúcar)	Valores do MAPA (US\$/t de açúcar)	Valores USDA (US\$/t de açúcar)
1989		267,84	
1990		351,68	
1991		261,95	
1992		245,42	
1993		256,07	
1994		287,23	
1995		302,21	363,09
1996		299,14	368,97
1997		278,00	340,46
1998		232,15	296,46
1999		157,91	362,78
2000		184,41	403,16
2001		203,98	588,55
2002		156,78	669,14
2003	165,48	165,71	656,36
2004	178,29	167,49	701,57
2005	259,18	215,95	709,82
2006	415,76	326,76	911,38
2007	288,50	263,67	601,15
2008	312,76	290,69	645,87
2009	493,76	355,13	973,97
2010	690,44		1076,10

Fontes: (CEPEA - ESALQ - USP, 2011); (MAPA, 2011); e (USDA, 2011).

Preço internacional do açúcar

Tabela 54 – Preço internacional do açúcar

Year	Preço (US\$/t de açúcar)
1.980	712,18
1.981	452,22
1.982	250,50
1.983	251,36
1.984	170,01
1.985	149,76
1.986	186,86
1.987	192,87
1.988	264,81
1.989	378,28
1.990	381,83
1.991	295,66
1.992	273,19
1.993	282,12
1.994	345,30
1.995	396,71
1.996	366,89
1.997	315,88
1.998	255,48
1.999	200,61
2.000	219,94
2.001	248,99
2.002	228,32
2.003	214,66
2.004	239,67
2.005	290,79
2.006	419,09
2.007	308,77
2.008	351,98
2.009	488,04
2.010	612,55

Fonte: (USDA, 2011)

Vendas de carros a gasolina, etanol e flex

Tabela 55 – Vendas de carros a gasolina, etanol e flex.

Ano	Gasolina	Etanol	Flex-Fuel	Total
1980	626.467	243.757	0	870.224
1981	344.467	136.242	0	480.709
1982	365.434	232.575	0	598.009
1983	78.618	579.328	0	657.946
1984	33.482	565.536	0	599.018
1985	28.655	645.551	0	674.206
1986	61.916	697.049	0	758.965
1987	31.190	458.683	0	489.873
1988	77.312	566.482	0	643.794
1989	260.821	399.529	0	660.350
1990	542.855	81.996	0	624.851
1991	546.258	150.982	0	697.240
1992	498.927	195.503	0	694.430
1993	764.598	264.235	0	1.028.833
1994	1.127.485	141.834	0	1.269.319
1995	1.557.674	40.706	0	1.598.380
1996	1.621.968	7.647	0	1.629.615
1997	1.801.688	1.120	0	1.802.808
1998	1.388.734	1.224	0	1.389.958
1999	1.122.229	10.947	0	1.133.176
2000	1.310.479	10.292	0	1.320.771
2001	1.412.420	18.335	0	1.430.755
2002	1.283.963	55.961	0	1.339.924
2003	1.152.463	36.380	48.178	1.237.021
2004	1.077.945	50.949	328.379	1.457.273
2005	697.004	32.357	812.104	1.541.465
2006	316.561	1.863	1.430.334	1.748.758
2007	245.660	107	2.003.090	2.248.857
2008	217.021	84	2.329.247	2.546.352
2009	221.709	70	2.652.298	2.874.077

Fonte: (ANFAVEA, 2011)

Frota de carros a gasolina, etanol e flex

Tabela 56 – Frota de carros a gasolina, etanol e flex

Ano	Total⁴⁰ Gasolina	Total Etanol	Total Flex
1980	8.025.792	243.102	0
1981	8.123.062	378.251	0
1982	8.210.425	608.486	0
1983	7.980.783	1.182.745	0
1984	7.676.959	1.739.408	0
1985	7.341.805	2.370.203	0
1986	7.017.055	3.044.072	0
1987	6.643.509	3.468.809	0
1988	6.303.236	3.987.021	0
1989	6.138.799	4.321.350	0
1990	6.253.485	4.319.133	0
1991	6.373.457	4.364.446	0
1992	6.451.569	4.431.741	0
1993	6.802.348	4.544.994	0
1994	7.523.035	4.514.244	0
1995	8.678.899	4.362.632	0
1996	9.900.960	4.160.766	0
1997	11.299.213	3.938.323	0
1998	12.275.577	3.705.488	0
1999	12.969.457	3.475.586	0
2000	13.827.309	3.241.969	0
2001	14.755.558	3.016.835	0
2002	15.517.662	2.832.868	0
2003	16.105.327	2.635.701	48.026
2004	16.571.802	2.461.664	375.255
2005	16.609.554	2.279.340	1.183.720
2006	16.219.735	2.078.075	2.605.227
2007	15.714.084	1.887.331	4.590.150
2008	15.139.184	1.709.203	6.880.362
2009	14.475.029	1.543.680	9.323.843
2010	13.792.000	1.390.659	11.853.688

Fonte: (MMA, 2011)

⁴⁰

O número total de veículos em cada categoria inclui automóveis e veículos utilitários leves.

Preço do etanol no Brasil

Tabela 57 – Preço do etanol no Brasil

Ano	Etanol Preço ao Distribuidor (R\$/litro)	Etanol Preço ao Consumidor (R\$/litro)
1995		
1996		
1997		
1998		
1999		
2000		
2001		
2002		
2003	0,877	1,119
2004	1,003	1,325
2005	1,166	1,385
2006	1,404	1,634
2007	1,189	1,448
2008	1,190	1,445
2009	1,223	1,485
2010	1,405	1,669

Fonte: (ANP, 2011)

Preço da gasolina no Brasil

Tabela 58 – Preço da gasolina no Brasil

Ano	Gasolina Preço ao Consumidor (R\$/litro)	Gasolina Preço ao Distribuidor (R\$/litro)
1995		
1996		
1997		
1998		
1999		
2000		
2001		
2002		
2003	1,836	1,591
2004	2,137	1,835
2005	2,340	2,047
2006	2,552	2,241
2007	2,508	2,163
2008	2,500	2,164
2009	2,511	2,176
2010	2,566	2,226
2011	2,731	2,371

Fonte: (ANP, 2011)

Critério de decisão gasolina ou etanol

Tabela 59 – Critério de decisão gasolina ou etanol

Fonte: Elaboração própria.

Figura 28. Fração da frota de veículos flexíveis operando com AEHC em função da relação de preços entre o AEHC e a gasolina C, nos postos, em cada unidade da Federação.

Fonte: Cálculo dos autores

Fonte: (Goldemberg, et al., 2008)

Taxa de Câmbio R\$/US\$

Tabela 60 – Taxa de câmbio R\$/US\$

Ano	Taxa de Câmbio (R\$/US\$)
1995	0,92
1996	1,01
1997	1,08
1998	1,16
1999	1,82
2000	1,83
2001	2,35
2002	2,93
2003	3,07
2004	2,93
2005	2,43
2006	2,18
2007	1,95
2008	1,84
2009	1,99
2010	1,76
2011	1,65

Fonte: (BACEN, 2011)

Taxa de Inflação

Tabela 61 – Taxa de inflação

Ano	Taxa de Inflação Efetiva (1/ano)
1995	22,40%
1996	9,60%
1997	5,20%
1998	1,70%
1999	8,94%
2000	5,97%
2001	7,67%
2002	12,53%
2003	9,30%
2004	7,60%
2005	5,69%
2006	3,14%
2007	4,46%
2008	5,90%
2009	4,31%
2010	5,91%
2011	6,50%

Fonte:

Custos de Produção da Cana-de-Açúcar (1998 – 2010)

Tabela 62 – Custos da cana-de-açúcar (1998 – 2010)

Ano	ORPLANA Custos Cana (R\$/ t Cana) (Nominiais)	ORPLANA Custos Cana (R\$/ t Cana) (Real 2010)	ORPLANA Custos Cana (US\$/t) (US\$ 2010)	ORPLANA Variação % Custos de Cana (%/ano)
1980				
1981				
1982				
1983				
1984				
1985				
1986				
1987				
1988				
1989				
1990				
1991				
1992				
1993				
1994				
1995				
1996				
1997				
1998	22,40	49,09	27,91	
1999	19,01	38,24	21,74	-22,1%
2000	25,45	48,31	27,47	26,3%
2001	28,40	50,07	28,47	3,6%
2002	30,21	47,33	26,91	-5,5%
2003	36,56	52,41	29,80	10,7%
2004	39,44	52,54	29,87	0,3%
2005	39,46	49,74	28,28	-5,3%
2006	43,80	53,53	30,43	7,6%
2007	43,42	50,80	28,88	-5,1%
2008	52,15	57,61	32,75	13,4%
2009	52,63	55,74	31,69	-3,2%
2010	55,63	55,63	31,63	-0,2%

Fonte: (Andrade Silva, 2012)

Custos de Produção do Etanol (1980 – 2002)

Tabela 63 – Custos de Produção do Etanol (1980 – 2002)

Ano	Goldemberg Preços Etanol (US\$/m3) (US\$ 2002)	Goldemberg Preços Etanol (US\$/m3) (US\$ 2010)	Goldemberg Variação % Custos Etanol (%/ano)
1980	450,00	544,50	
1981	410,00	496,10	-8,9%
1982	400,00	484,00	-2,4%
1983	360,00	435,60	-10,0%
1984	360,00	435,60	0,0%
1985	380,00	459,80	5,6%
1986	280,00	338,80	-26,3%
1987	300,00	363,00	7,1%
1988	250,00	302,50	-16,7%
1989	220,00	266,20	-12,0%
1990	200,00	242,00	-9,1%
1991	200,00	242,00	0,0%
1992	190,00	229,90	-5,0%
1993	190,00	229,90	0,0%
1994	170,00	205,70	-10,5%
1995	190,00	229,90	11,8%
1996	160,00	193,60	-15,8%
1997	150,00	181,50	-6,3%
1998	150,00	181,50	0,0%
1999	75,00	90,75	-50,0%
2000	150,00	181,50	100,0%
2001	175,00	211,75	16,7%
2002	150,00	181,50	-14,3%
2003			
2004			
2005			
2006			
2007			
2008			
2009			
2010			

Fonte: (Goldemberg, et al., 2004)

Custos de Produção do Açúcar e do Etanol (2006 – 2010)

Tabela 64 – Custos de Produção do Açúcar e do Etanol (2006 – 2010)

Ano	CEPEA Custos Açúcar (US\$/m3) (US\$ 2010)	CEPEA Custos Etanol (US\$/m3) (US\$ 2010)
1980		
1981		
1982		
1983		
1984		
1985		
1986		
1987		
1988		
1989		
1990		
1991		
1992		
1993		
1994		
1995		
1996		
1997		
1998		
1999		
2000		
2001		
2002		
2003		
2004		
2005		
2006		
2007	219,59	387,69
2008	268,18	479,36
2009	278,44	468,96
2010	324,82	529,11

Fonte: (CEPEA - ESALQ - USP, 2011)

Custos do Açúcar e do Etanol (1980 – 2010)

Tabela 65 – Custos do Açúcar e do Etanol (1980 – 2010)

Ano	Custos Totais do Açúcar (US\$/t)	Custos Totais do Etanol (US\$/m3)
1980	318,51	544,50
1981	290,20	496,10
1982	283,12	484,00
1983	254,81	435,60
1984	254,81	435,60
1985	268,96	459,80
1986	198,18	338,80
1987	212,34	363,00
1988	176,95	302,50
1989	155,72	266,20
1990	141,56	242,00
1991	141,56	242,00
1992	134,48	229,90
1993	134,48	229,90
1994	120,33	205,70
1995	134,48	229,90
1996	113,25	193,60
1997	106,17	181,50
1998	106,17	181,50
1999	53,09	90,75
2000	106,17	181,50
2001	123,87	211,75
2002	106,17	181,50
2003	196,51	335,94
2004	220,11	376,29
2005	220,68	377,26
2006	209,50	358,15
2007	219,59	387,69
2008	268,18	479,36
2009	278,44	468,96
2010	324,82	529,11

Fonte: Elaboração própria a partir de extrapolação dos dados obtidos de (Andrade Silva, 2012), (Goldemberg, et al., 2004) e (CEPEA - ESALQ - USP, 2011).

APÊNDICE D
SÚMULA DA ENTREVISTA COM LUIS CARLOS CORRÊA CARVALHO

Data: 15 de setembro de 2008; Hora: 10:00

Presentes: Prof. Abraham Sin Oi Yu, PhD.
Prof. Francisco Nigro, PhD.
Prof. Paulo Tromboni Nascimento, DSc.
Robson Quinello, MSc.
Sandra Petho, BSc.
Joaquim Rocha dos Santos, M.Eng.

RESUMO DA ENTREVISTA

A indústria sucroalcooleira, ou indústria do açúcar e do álcool teve várias fases no Brasil. Modernamente, pode-se dizer que a primeira fase ocorreu anteriormente ao programa do álcool (Proálcool), com a indústria se dedicando exclusivamente ao plantio da cana para a geração de açúcar.

Com o advento do Proálcool (Programa Nacional do Álcool), em 1975, a indústria vive grande euforia, com grandes investimentos e subsídios governamentais. Com os problemas econômicos enfrentados pelo Brasil a partir do início da década de 1980 e a queda dos preços internacionais do petróleo, o Proálcool esfriou e o interesse pelo álcool foi reduzido.

A redução do Proálcool e do desinteresse pela cana não interessava ao Estado de São Paulo, maior produtor de cana, responsável por 40% da produção nacional à época. Tal fato sensibilizou os governantes que implementaram a Câmara Setorial da Indústria sucroalcooleira. Esta Câmara engendrou uma série de medidas de curto e longo prazo, para estimular a indústria. Entre tais medidas estavam, a oferta de financiamento aos agricultores, a manutenção da taxa de álcool anidro na gasolina (22%), dentre outras, política fiscal mais branda para os carros a álcool, entre outras.

Às vésperas de um evento em que a idéia do carro flex a indústria sucroalcooleira está dividida. De um lado os produtores de açúcar e álcool; do outro, aqueles produtores que só produziam álcool. Os primeiros não se opunham à criação do carro desse tipo; já a expectativa de criação de um carro flex deixava os segundos apreensivos, pois poderia significar a perda da já diminuta faixa de mercado que eles ainda possuíam. Houve um evento em São Paulo onde o carro flex foi chamado de “PATO”, por andar mal, voar mal e nadar mal. Uma semana depois em um evento no IPT, que comemorava seus duzentos anos, a posição oficial da indústria sucroalcooleira era de observação, enquanto sua posição interna era de rejeição ao carro flex.

Por um processo ainda não bem compreendido, o carro flex foi lançado pelas montadoras instaladas no país. É interessante observar que as montadoras não têm uma estreita comunicação com suas matrizes. Muitas vezes as montadoras lançaram o carro flex no Brasil e suas matrizes são contra tal tecnologia.

Após seu lançamento, o carro flex tomou o mercado. Em um período de três anos saiu de zero a uma fatia igual a 90% desse mercado, um crescimento que surpreendeu a todos. Há relatos que os mais otimistas esperavam uma saturação em torno de 50% do mercado.

Com esse sucesso e o grande crescimento dos preços do petróleo no mercado externo, a indústria sucroalcooleira teve uma expansão importante que levou a, entre outros, sua profissionalização (aumento importante de produtividade), mudança de mentalidade (da fazenda de cana para o agronegócio), e a sua internacionalização (British Petroleum, CHEVRON, e outras).

As expectativas da Indústria são a exportação de álcool para os Estados Unidos, a co-geração de energia elétrica e a auto-geração para as usinas e a inserção da indústria alcoolquímica, com a produção de adubos e outros insumos a partir dos rejeitos do processo produtivo.

Os textos abaixo apresentam a entrevista na seqüência em que foi anotada, uma cronologia da História da Distribuição de Combustíveis no Brasil, e um documento gerado pela Câmara Paulista do Setor Sucroalcooleiro.

CONVERSA DURANTE A ENTREVISTA

A entrevista começou com o senhor Caio destacando a importância do agronegócio para a balança comercial brasileira.

A União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA - www.unica.com.br), foi criada em 1997, sucedendo a Associação das Indústrias do Açúcar e do Alcool (AIAA).

No início da década de 90, o Governador Mário Covas não priorizava o assunto. O Governador do Wisconsin, Tommy Thompson acabou despertando seu interesse (www.whitehouse.gov/government/thompson-bio.html), durante visita ao Brasil. Outros países já apresentavam interesse no programa do álcool, destacando-se a Suécia, por sua seriedade e competência. Os Estados Unidos mostram grande respeito pelas posições ambientais da Suécia.

Nos Estados Unidos começa o programa do etanol de milho. Os *stakeholders* queriam expandir o negócio. Em 1983/1984 começa o flex nos EUA. Enfrentam o problema conhecido como “chicken/egg”. Citado Tommy Thompson atuando como presidente do Governors' Ethanol Coalition (GEC - www.ethanol-gec.org). No estágio atual, os EUA não têm uma empresa como a Petrobrás que coordene a execução da política energética do setor; isto o deixa livre e seguindo as leis de mercado.

Há choques de interesses nos EUA. A maioria dos estados da Costa Leste e da Costa Oeste prefere importar álcool do Brasil, a um custo menor do que o álcool que vem do Centro-Oeste americano, produzido com milho. Os EUA têm uma lei interna que permite que 7% do consumo interno de etanol seja atendido pelos países do Caribe, sem cobrança de taxas de importação (Caribbean Basin Initiative – CBI - www.ustr.gov/Trade_Development/Preference_Programs/CBI/Section_Index.html). O Brasil exporta etanol hidratado para o Caribe e este reexporta etanol anidro para os EUA. Quando o preço da gasolina sobe, o Brasil consegue exportar álcool.

Os EUA possuem diversos incentivos fiscais (tanto federais, quanto estaduais) para o uso de carros flex. Por exemplo, Energy Policy Act (EPAAct) de 1992 que obriga a quem tem frota, tenha uma parte dessa frota movida por combustível não petróleo; e quem comprova que possui, tem um abatimento do Imposto de Renda. Mais exemplos podem ser encontrados no site do Departamento de Energia dos EUA (DOE - www.eere.energy.gov/afdc/ethanol/incentives_laws_federal.html).

Em 2000 houve um evento da ÚNICA no Hotel Transamérica em São Paulo. Nesse evento tentou-se posicionar o setor com relação à melhor estratégia: apoiar o carro flex, ou não. Havia uma importante divisão na ÚNICA, pois parte dos usineiros podem produzir açúcar ou álcool e parte deles só pode produzir álcool. A avaliação da época foi que um carro com tecnologia flex-fuel poderia matar o programa do álcool, pois seria um carro a gasolina que “poderia” andar com álcool. Tal risco era aceitável para os usineiros que também produziam açúcar, mas não para aqueles que produziam somente álcool. Embora a posição oficial da ÚNICA tenha sido de aguardar os acontecimentos, internamente, havia maior tendência à rejeição da tecnologia. Nesta reunião houve uma interessante intervenção em que um participante comparou o carro flex a um pato (voa mal, anda mal e nada mal).

Foi destacado que o carro flex apresenta duas rupturas relevantes: a primeira é a tecnológica; e a segunda, mercadológica.

O preço do petróleo na época era de US\$ 21/ barril. Com este preço o flex seria viável, mas as margens estavam bem apertadas. Foi criado um imposto sobre a gasolina (CID) para garantir um “colchão” para o álcool. Quando o preço do petróleo cai, a taxa segura o preço inferior do produto, quando o preço do petróleo sobe a taxa pode ser reduzida.

Há a desregulamentação da indústria, sendo mantidas apenas: mistura do álcool anidro na gasolina; a CID, para garantir a viabilidade do álcool na bomba; e taxas diferenciadas (IPVA e IPI) para veículos a álcool.

Na época a força política das distribuidoras era maior do que a dos produtores da terra.

Associação dos Municípios Canavieiros do Estado de São Paulo (AMCESP), fez campanhas e consórcios para a venda de carros a álcool.

São Paulo é um estado muito prejudicado pela crise do álcool. O Governador Mário Covas se interessa pelo assunto, fazendo uma reunião onde convoca também os trabalhadores. Há posições políticas divergentes nos sindicatos: a CUT (ligada ao PT) apóia a Petrobrás e os combustíveis fósseis; as outras Centrais apóiam o programa do álcool.

Covas manda a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) fabricar carros a álcool e força a indústria sucroalcooleira a fazer propaganda o álcool. Vale ressaltar o apoio dos secretários de Agricultura e Abastecimento, João Carlos de Souza Meirelles e do Emprego e Relações do Trabalho, Walter Barelli.

Há uma reunião em Brasília estando presentes o Presidente Fernando Henrique Cardoso e o Governador Mário Covas, além de Ministros de Estado e outras personalidades, para tratar do assunto. O ministro do Desenvolvimento da Indústria e Comércio, Celso Lafer, é designado para tratar o assunto e monta a política do álcool.

Neste ponto havia uma grande dificuldade de entender os interesses dos diversos *stakeholders*. Há três documentos públicos, o Pacto dos Bandeirantes e pelo Emprego e um que trata da queima da cana (2002), que podem auxiliar na compreensão desses interesses.

Pactos de 1998 - Aspectos positivos da indústria da cana: emprego; ambiental (efeito estufa); oportunidade de exportação. Prioriza o álcool sobre o açúcar.

Com a abertura do setor automobilístico, durante o governo Collor, as montadoras passam a trazer para o Brasil, os carros “mundiais”, carros projetados no exterior, com tecnologia mais moderna do que a frota de álcool existente no Brasil, e deixam de modernizar a frota brasileira a álcool. Os carros a álcool no Brasil se tornam obsoletos.

Uma possibilidade vislumbrada para o renascimento do programa do álcool foi a adoção do carro flex, que deixaria ao consumidor a opção de escolher “na bomba” o combustível que desejasse. Tal idéia foi lançada durante um Seminário que ocorreu em São Paulo, no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), por ocasião do centenário da instituição.

A Bosch, a Magneti Marelli e a Delphi já eram a favor do carro flex, mas até o momento não se sabe exatamente, quando a ANFAVEA comprou a idéia. Acredita-se até que houve um momento em que a instituição reuniu as montadoras e deu a elas liberdade de ação sobre o assunto.

Em 2003 a Volkswagen do Brasil lança o primeiro carro flex com o sistema de injeção da Magneti Marelli, na realidade um carro ajustado para operar com gasolina, mas que podia rodar com álcool. Foi adotado esse ajuste, pois se o carro flex não

tivesse um bom desempenho a gasolina, ele seria trocado por aquele, que predominava na época e a idéia morreria no seu nascedouro. Havia ainda incertezas com relação ao comportamento da indústria do álcool.

Com a explosão do consumo de álcool, a indústria sucroalcooleira passa por transformações importantes. A primeira delas é sua profissionalização; esta profissionalização leva à grande competitividade do álcool brasileiro frente a seus concorrentes. É verificada uma tendência de produção individual mínima da ordem de 10 milhões de toneladas, contra uma produção total de 420 milhões (2,4%); ou seja, espera-se que no futuro haja uma reunião de pequenas usinas na formação de um grupo mais forte, para garantir uma economia de escala.

Há uma mudança de mentalidade; com isso o agronegócio é tratado como tal e não com a filosofia da grande fazenda de cana. A indústria se internacionaliza; a elevada rentabilidade do setor torna atrativos os investimentos externos.

A distribuição do álcool até o consumidor final (na bomba do posto) também está se alterando no Brasil. As indústrias petrolíferas estão querendo sair da distribuição para se concentrar na exploração de petróleo, sua atividade mais rentável. Aproveitando-se dessa lacuna, a indústria do álcool está entrando na distribuição, havendo uma tendência de sua pulverização. No futuro, talvez próximo, poderá haver a ligação direta Usina → Posto.

A indústria sucroalcooleira tende para o álcool, em detrimento do açúcar; tende para a indústria química, indústria alcoolquímica; e para novas evoluções como a cogeração de energia. Vale destacar o uso do vinhoto (fonte de potássio), da torta de filtro do tratamento do caldo (fonte de fósforo) e cinzas da queima do bagaço para minimizar o uso de fertilizantes na lavoura .

Durante a gestão do Presidente Fernando Henrique, o ministro do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior, Alcides Tápias, fez um programa de renovação da frota brasileira. Reuniu vários atores ligados ao setor de transporte em uma reunião para estudar o assunto. A ÚNICA fez uma palestra onde apresentou um estudo de toda a cadeia produtiva do álcool e da gasolina, chegando à conclusão que a cadeia produtiva do álcool gerava 20 empregos para cada 100 carros, enquanto a gasolina gerava 1 emprego para cada 100 carros. A ANFAVEA foi tão

frontalmente contra a idéia do álcool que o programa de renovação da frota não foi adiante.

Um problema do momento com relação ao álcool é a questão da disputa “*food x fuel*”, que afeta seriamente os Estados Unidos, aliado do Brasil na questão do álcool. Isso enfraquece a posição americana para o setor, o que pode aumentar as resistências internacionais ao programa brasileiro de álcool.

Tabela 66 – História da Distribuição de Combustíveis no Brasil ⁴¹

Data	Evento
1912	Tem início a distribuição sistemática de derivados de petróleo no Brasil, realizada em latas e tambores.
1922	Entrada no mercado brasileiro da Atlantic Refining Company of Brazil, em 07 de julho.
1934	Entra em funcionamento a Destilaria Rio Grandense S.A. em Uruguaiana, Rio Grande do Sul, que deu origem em 1937 a primeira Refinaria de Petróleo do país.
1938	Criado o Conselho Nacional do Petróleo, pelo Decreto-Lei nº 395, de 29 de abril de 1938, com o objetivo de, dentre outros, regular e fiscalizar as atividades de exploração, refino, importação, distribuição e comercialização de petróleo e seus derivados.
1941	Criação da Associação Profissional do Comércio Atacadista de Minérios e Combustíveis, que deu origem em 1960 ao Sindicato do Comércio Atacadista de Minérios e Combustíveis Minerais do Estado da Guanabara, passando a representação nacional em 1964 com a denominação de Sindicato Nacional do Comércio Atacadista de Minérios e Combustíveis Minerais, hoje SINDICOM - Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes.
1953	Estabelecido o monopólio da União sobre a lavra, refinação e transporte marítimo do petróleo e seus derivados, sendo criada a Petrobrás para exercê-lo, de acordo com a Lei nº 2004, de 3 de outubro de 1953.
1975	É lançado o Programa Nacional do Álcool - Proálcool, e as Distribuidoras começam a adaptar suas instalações e bombas para o novo combustível.
1988	Consagrado o monopólio da União sobre o petróleo e seus derivados, através da Constituição promulgada em 5 de outubro de 1988.
1990	Criado o Programa Federal de Desregulamentação. Estabelecido o critério de preços máximos nos postos revendedores e liberados os preços do querosene iluminante e dos lubrificantes automotivos. Criação do Departamento Nacional de Combustíveis com a extinção do Conselho Nacional do Petróleo.
1991	São inaugurados no Rio de Janeiro e em São Paulo os primeiros postos de abastecimento de veículos leves (táxis) movidos a gás natural. Ainda nesse ano os combustíveis aditivados são introduzidos no mercado brasileiro.
1995	Os preços dos combustíveis são desqualizados, com a inclusão do valor dos fretes de transferência/coleta (Álcool) na formação do preço.

⁴¹ Fonte: SINDICOM (Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes) - http://www.sindicom.com.br/pub_sind/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=21, acesso em 17/09/2008

Data	Evento
1996	Liberação dos preços, a partir da Refinaria, da gasolina, do álcool hidratado e do querosene de aviação.
1997	Aprovada pelo Congresso Nacional a Lei 9478, de 6 de agosto de 1997, que regulamenta a flexibilização do monopólio. Ainda no ano de 1997, foi lançada a gasolina premium no mercado brasileiro.
1998	Criação da Agência Nacional do Petróleo e óleo e conseqüente extinção do Departamento Nacional de Combustíveis, pelo Decreto nº 2455, de 14 de janeiro de 1998.
1999	Autorizada a importação de Óleos Combustíveis e exportação de Petróleo.
2000	Autorizada a produção de Gasolina pelas Centrais Petroquímicas. Portaria ANP 116/2000: Regulamenta o exercício da atividade de revenda varejista de combustível automotivo.
2001	Reforma tributária nos combustíveis (Emenda Constitucional 33 e Lei 10.336 - CIDE). Liberação do preço do Óleo Diesel.
2002	Fim do período de transição para a liberação do mercado, com a livre formação de preços nas refinarias e liberdade para importação de Gasolina e Óleo Diesel.
2003	Redução da alíquota de ICMS no Álcool Hidratado no Estado de São Paulo.
2004	Criação do Programa Nacional do Biodiesel.
2005	Marco regulatório do Programa Biodiesel com a regulamentação da Lei 11.097/05, que estabelece percentuais mínimos de mistura do novo produto ao diesel.
2006	Obrigatoriedade da adoção do corante no álcool anidro, instituída pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível – ANP, a fim de inviabilizar a fraude neste combustível.
2007	Publicada a Resolução ANP nº 07/2007, que proíbe a venda pelas distribuidoras a postos de outras bandeiras e restringe a venda entre distribuidoras em até 5%.
2008	A partir de 1º de janeiro passa a ser obrigatória a adição de 2% de biodiesel a todo óleo diesel comercializado no Brasil. (Resolução 05/2007 - CNPE)

Ata de Reunião da Câmara Paulista do Setor Sucro-Alcooleiro

A Câmara Paulista do setor sucro-alcooleiro, criada no dia 13 de dezembro de 1995, pelo Exmo. Sr. Governador do Estado de São Paulo, Mario Covas Jr, pelos seus Secretários Estaduais, representantes dos trabalhadores da Agricultura, na indústria alimentícia, na indústria química e dos condutores de veículos, representantes de empresários ligados à cana-de-açúcar e álcool, e representantes de instituições de pesquisa e desenvolvimento, no Estado de São Paulo, entende que o setor Sucro-Alcooleiro se reveste de importância para a economia paulista e brasileira, pelos seguintes motivos:

- a) Gerou um combustível e reduziu de forma significativa os efeitos poluentes no meio ambiente, desenvolvendo assim uma tecnologia avançada e bem sucedida, com parâmetros das economias do Primeiro Mundo;
- b) Desde 1976, a nível nacional, foram investidos US\$ 11,3 bilhões na criação do parque industrial alcooleiro, que permitiu até o final de 1995, poupança de divisas de US\$ 28,7 bilhões, não levados em conta os juros poupados da dívida externa. Além disso, o açúcar produzido é suficiente para gerar excedentes exportáveis ao redor de 5 milhões de toneladas por ano, gerando divisas em volume superior a US\$ 1,1 milhão por ano;
- c) Teve conseqüências altamente benéficas do ponto de vista social. Gerou mais de 1 milhão de empregos diretos – em São Paulo são 400 mil que representam 40% de todo contingente de trabalhadores na agricultura, dos quais 95% com carteira assinada, colocando no mercado formal de trabalho um grande contingente de brasileiros que viviam praticamente à margem da sociedade, sem acesso à assistência previdenciária, salário formal, registro em carteira e outros direitos sociais. Ao seu redor foram gerados centenas de milhares de empregos diretos, constituíram-se pólos industriais derivados – vide muitas indústrias metalúrgicas no interior de São Paulo – e foi, e continua sendo, o principal elemento dinamizador de considerável quantidade de municípios;
- d) O Estado de São Paulo é responsável por 62% da cana, 64% do álcool, e 56% do açúcar produzidos no Brasil. O álcool consumido no país corresponde a 220.000 varris por dia de gasolina equivalente;
- e) A cana-de-açúcar é a principal cultura de São Paulo, representando 30% da renda agrícola estadual. A agroindústria dela derivada movimenta o principal “agrobusiness” paulista com recursos que atingiram, na safra, 1994/1995, R\$ 6 bilhões, assim distribuídos: 7% para insumos modernos; 18% para a produção agrícola; 14% para a produção industrial; 36% para o armazenamento, distribuição e vendas; e 25% para impostos;
- f) Do ponto de vista energético a contribuição da agroindústria da cana-de-açúcar deverá expandir-se significativamente nos próximos anos, pois além do álcool, a produção de energia elétrica de cogeração deverá atender a parcela substancial do crescimento da demanda do Estado. Estima-se que o potencial de geração adicional de energia elétrica no setor Sucro-Alcooleiro só em São Paulo, com tecnologias que estão em desenvolvimento, alcance cerca de 3.000 MW de potência, correspondente a 30% de toda a atual potência instalada em São Paulo;
- g) Fonte de energia limpa, um dos maiores geradores de empregos no campo e base de equilíbrio da agroindústria paulista, o setor Sucro-Alcooleiro tem sido também um dos mais importantes geradores de pesquisa e desenvolvimento

agro-industrial levando o Estado de São Paulo à invejável posição de produtor de açúcar e de álcool com os mais baixos custos mundiais.

- h) A produção e melhoria da qualidade do combustível etanol proporcionou também o desenvolvimento de tecnologia de ponta para motores de automóveis a álcool.

CONSIDERAÇÕES:

- a) Dois terços da cana é processada para álcool, e que o mercado de combustíveis líquidos no Brasil vem sofrendo gradual processo de liberalização, onde é fundamental a redefinição das responsabilidades de cada agente econômico envolvido no processo, e das condições que serão estabelecidas para este cumprimento;
- b) A cana requer planejamento de longo-prazo, devido a seu caráter de cultura semi-perene;
- c) Muitos dos instrumentos de política de governo utilizados para a criação do mercado brasileiro de álcool carburante foram extintos, ou simplesmente deixaram de ser aplicados de forma adequada;
- d) A crise do setor poderá provocar a demissão de centenas de milhares de trabalhadores com vocação rural e voltados para o setor, que não serão relocados no mercado formal de trabalho. Este importante segmento, empregados direta ou indiretamente no setor, poderá engrossar o exército de desempregados nos grandes centros urbanos ou nos chamados “sem-terra” – com todas as conseqüências de aumento da marginalidade nas cidades com ampliação na crise do setor de saúde pública e de outros equipamentos, violência no campo, conflitos de terras e a geração de um clima de instabilidade política;
- e) As medidas de incentivos ou renúncias fiscais, sempre que possível, sejam acopladas a melhoria da qualidade ambiental, privilegiando a utilização dos combustíveis renováveis;
- f) A Câmara Paulista do setor sucro-alcooleiro entende fundamental sustentar a produção e o uso do álcool carburante no País.

A. MEDIDAS DE CURTO PRAZO:

1. Que seja mantido o nível de mistura de álcool anidro na gasolina, que é de 22% por definição legal, dadas as suas características positivas na redução de emissão de poluentes já atestadas pela CETESB (Agência Ambiental do Estado de São Paulo);
 2. Que o gás seja utilizado como combustível apenas nos veículos leves e pesados movidos a óleo diesel, para solucionar o problema de excedente de gasolina pelo processo de destilação, em decorrência da necessidade de reduzir o consumo de óleo diesel e contribuindo para a redução dos poluentes;
 3. Que sejam criadas condições para uma imediata recuperação da viabilidade empresarial do setor, através de medidas ligadas à recomposição da remuneração aos produtores, via preço e financiamento agrícola e dos estoques estruturais do álcool, advindos da natureza intrinsecamente sazonal da produção da cana-de-açúcar, sempre na visão de planejamento com a atual dimensão de produção de álcool. A remuneração do setor necessária para a sua continuidade deve se dar em sintonia com a estabilização da economia duramente conquistada pelo Plano Real, pois os principais beneficiários dessa estabilização são os trabalhadores e a sociedade brasileira. Em hipótese alguma devemos retornar à cultura inflacionária, quando um aumento do preço dos combustíveis era um indexador econômico, provocando aumentos em cascata. Esta remuneração deve envolver não apenas o retorno a que o capital tem direito por sua atividade empresarial, mas também a remuneração dos trabalhadores que apesar de terem contribuído para o acervo do Proálcool, tiveram baixíssima participação dos seus resultados. Uma nova política deve levar em consideração dividendos para todos os parceiros: trabalhadores, empresários e sociedade.
- a. A definição de uma política de preços realista para a cana-de-açúcar e o álcool, com o objetivo de garantir a existência no mercado de produtores eficientes, é o ponto fundamental para viabilizar o álcool combustível no Brasil. A formação de preços da cadeia produtiva do álcool tem que contemplar a adequada remuneração de todos os segmentos envolvidos. Em contrapartida deverão ser redefinidas metas de ganho de produtividade, com as quais o setor Sucro-Alcooleiro se comprometerá. O mecanismo que possibilitará a prática da política de preços enfatizada, no contexto de um mercado de combustível mais livre, é a criação de uma taxa diferenciada entre o combustível renovável e o fóssil, como ocorre nos Estados Unidos e França, entre outros países. Enquanto tal mecanismo não estiver implantado, uma vez que requer a elaboração de projetos de lei a ser posteriormente discutido no Congresso Nacional, a solução será a prática de uma adequada política de preços para o "mix" dos combustíveis. Nesse caos, é fundamental que as parcelas de preços dos derivados de petróleo que se destinam à cobertura do déficit da comercialização do álcool sejam destacados e transparentes e reajustados a cada variação de preço dos combustíveis, de forma a manter o equilíbrio da conta álcool.
 - b. Devem ser criadas linhas de financiamento para a renovação e custeio da lavoura e para a manutenção de estoques dos produtos finais, em condições semelhantes às do crédito agrícola. Esta é uma medida indispensável para que os custos reflitam as condições da produção e não da política monetária, uma vez que devido ao seu ciclo de produção, anual, bem como à sua característica sazonal, que implica em elevados estoques estruturais, a atividade sofre forte impacto dos juros em seus custos de produção.

4. Que os objetivos da Lei nº 8176 e do Decreto nº 238, de 1991 sejam atingidos, com formação de estoques estratégicos de álcool, planejando de tal forma, que possa reduzir-se os custos referentes aos estoques estruturais e manter a regularidade do fornecimento. Considerando os riscos na regularidade de abastecimento de álcool anidro na atual entressafra, é preciso que sejam tomadas por parte do Governo Federal as medidas necessárias para o abastecimento deste na composição da mistura de 22% à gasolina;
5. A definição de uma política de saneamento financeiro do setor que atenda os produtores competitivos e possibilite associações ou fusões de empresas a fim de garantir uma maior eficiência do setor e uma redução nos custos de produção.

B. MEDIDAS DE LONGO PRAZO

1. Definição de uma POLÍTICA PARA CANA-DE-AÇÚCAR E DERIVADOS, que englobem todos os produtos viáveis economicamente, com especial atenção a cogeração de energia e a álcool-química;
2. Definição pelo governo de uma matriz energética dos produtos para abastecimento dos veículos, para determinar a parcela de contribuição que cabe ao álcool. Para concretização deste papel tomar, em conjunto com os estados, as medidas necessárias, entre elas as tributárias e/ou de incentivo a produção e uso do álcool combustível;
3. Que seja incentivado a produção de combustível de biomassa para substituição do Diesel melhorando a qualidade de vida dos brasileiros através da geração de empregos e diminuição da emissão de poluentes dos motores de ciclo Diesel;
4. Estabelecimento de um programa de qualificação profissional, em parceria com entidades empresariais e de trabalhadores, para atender a demanda dos trabalhadores do Setor.

O atendimento destes pontos permitirá a necessária sustentação ao álcool, através da justa remuneração ao produtor e efetiva sinalização ao mercado, com seus efeitos positivos ao País. Entende-se que a emergência na tomada de decisão é a base do futuro que se desenha nos campos tecnológico; de diversificação de produtos; de energia adicional via cogeração pelo setor; de positivo avanço nas relações capital-trabalho no meio rural; de uma matriz energética mais viável ao desenvolvimento sustentado que interessa ao País.