



**ANDRÉ BERTO GIMENEZ**

**Estudo da Difusão de Tecnologia de Extração de  
Sacarose no complexo Agroindustrial Canavieiro  
Utilizando Modelos de Simulação Agent-Based**

**Campinas  
2013**





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**INSTITUTO DE ECONOMIA**

**ANDRÉ BERTO GIMENEZ**

**Estudo da Difusão de Tecnologia de Extração de  
Sacarose no complexo Agroindustrial Canavieiro  
Utilizando Modelos de Simulação Agent-Based**

**Prof. Dr. José Maria Ferreira Jardim da Silveira – orientador**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas, do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Mestre em Ciências Econômicas.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ANDRÉ  
BERTO GIMENEZ E ORIENTADO PELO PROF. DR.  
JOSÉ MARIA FERREIRA JARDIM DA SILVEIRA.

Orientador

A handwritten signature in blue ink, which appears to be "José", is written over a horizontal line that extends to the right.

**CAMPINAS  
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR  
Maria Teodora Buoro Albertini – CRB8/2142 –  
CEDOC/INSTITUTO DE ECONOMIA DA UNICAMP

Gimenez, André Berto, 1986-  
G429e Estudo da difusão de tecnologia de extração de sacarose no complexo agroindustrial canavieiro utilizando modelos de simulação agent-based / André Berto Gimenez. – Campinas, SP: [s.n.], 2013.

Orientador: José Maria Ferreira Jardim da Silveira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia.  
1. Simulação. 2. Economia evolucionária. 3. Agroindústria canavieira. 4. Etanol. 5. Difusão de inovações. I. Silveira, José Maria Ferreira, Jardim da, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Economia. III. Título.

13-22-BIE

Informações para Biblioteca Digital

**Título em Inglês:** Study of the diffusion of sucrose extraction technology in the sugar-cane agroindustry using agent-based simulation models

**Palavras-chave em inglês:**

Simulation  
Evolutionary economics  
Sugar-cane agroindustry  
Ethanol  
Diffusion of innovations

**Área de Concentração:** Ciências econômicas

**Titulação:** Mestre em Ciências Econômicas

**Banca examinadora:**

José Maria Ferreira Jardim da Silveira  
Marcelo Pereira da Cunha  
Maria Beatriz Machado Bonacelli

**Data da defesa:** 28-02-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências Econômicas



## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANDRÉ BERTO GIMENEZ

# Estudo da Difusão de Tecnologia de Extração de Sacarose no complexo Agroindustrial Canavieiro Utilizando Modelos de Simulação Agent-Based

Defendida em 28/02/2013

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. JOSÉ MARIA FERREIRA JARDIM DA SILVEIRA  
Instituto de Economia / UNICAMP



Prof. Dr. MARCELO PEREIRA DA CUNHA  
Instituto de Economia / UNICAMP



Profa. Dra. MARIA BEATRIZ MACHADO BONACELLI  
Instituto de Geociências / UNICAMP



Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e me incentivaram a estudar, e à Tonya, que me acompanhou nesta aventura.



## **Agradecimentos**

Agradeço, ao Prof. José Maria pela valorosa orientação e pelas oportunidades que ele me abriu.

Aos demais professores que me ajudaram das mais diversas formas, em especial ao Prof. Marco Valente.

Aos colegas Marcelo Pereira e Thadeu Alves, com os quais compartilhei o processo de aprendizado nesta área de estudo que nos é comum.

Aos demais colegas, que enriqueceram grandemente essa experiência.



## Resumo

Este estudo insere-se na temática da evolução tecnológica da agroindústria canavieira. Este setor tem ganhado relevância conforme aumentam seu leque de produtos e a demanda por estes e conforme ele consolida-se como parcela crescente da matriz energética do país. Tendo estas perspectivas em vista, grandes esforços de pesquisa têm sido despendidos focados nas necessidades e potenciais do setor. Uma vez que estes esforços resultem em inovações, será relevante entender a dinâmica e os determinantes da difusão de inovações na agroindústria canavieira. Neste contexto, propõe-se elaborar e utilizar um modelo de simulação baseado em agentes para organizar, explicitar e testar hipóteses acerca dos determinantes do processo de difusão de nova tecnologia de extração de sacarose. Observa-se a competição entre duas tecnologias alternativas, uma baseada em ternos de moendas e outra baseada em difusores. A primeira, disponível há séculos, mantém-se, no período estudado, dominante sobre a segunda, adaptada da produção de açúcar de beterraba há poucas décadas. Pretende-se, com este estudo, contribuir ao entendimento dos determinantes do processo de difusão de tecnologias no setor. Os resultados obtidos pela simulação indicam que as hipóteses não foram capazes de replicar o fenômeno observado. Isso mostra-se útil ao objetivo final da pesquisa conduzida, tendo em vista que o conhecimento adquirido no desenvolvimento do modelo e no estudo de seus resultados foi relevante no balizamento de estudos futuros para aprimorar essas hipóteses. A principal direção apontada pelos resultados é para o estudo da estrutura de modularidade do processo produtivo e de seu impacto nos processos de difusão de tecnologia na agroindústria canavieira.

**Palavras chave:** Simulação, dinâmica industrial, economia evolucionária, agroindústria canavieira, etanol, difusão de inovação.



## Abstract

This study relates to the question of the diffusion technologies in the sugar-cane agroindustry. This sector gains relevance as its range of products increases, its demands grows and it settles as a relevant part of the national energy sources. With this in sight, there have been great research efforts aiming at the needs and potentials of this sector. Once these efforts result in innovations, it will be relevant to understand the dynamics and determinants of innovation diffusion in sugar-cane agroindustry. In this context, the development and use of an agent-based simulation model as a tool for organizing, explicitly stating and testing hypothesis about the determinants of the diffusion process of new technology of sucrose extraction is proposed. The competition between two technologies, one based on press rolls and the other on diffusers, is observed. The first, available for centuries, holds, throughout the studied period, dominant over the second, adapted from the beetroot sugar production a few decades ago. This study aims, with this, at contributing to the understanding of the determinants of the process of diffusion of technologies in this sector. The results obtained from the simulations show that the hypothesis were not enough to replicate the observed phenomena. This proves useful to the established aim of this research, given that the knowledge developed by the building of the model and the analysis of its results was relevant in the identification of good future research on diffusion of technologies in the sector. The main path to be studied shown by the results of this research is the modularity structure of the production process and its impact on the diffusion of new technologies processes on the sugar-cane agroindustry.

**Key-words:** Simulation, industrial dynamics, evolutionary economics, sugar-cane agroindustry, ethanol, diffusion of innovation.



## Lista de figuras

<b>Figura 1:</b> Exemplo de implantação de Usina (Usina Mandu – Guaíra / SP).....	6
<b>Figura 2:</b> Distribuição da produção de cana-de-açúcar no mundo e no Brasil em 2010. ....	7
<b>Figura 3:</b> Distribuição das usinas de processamento de cana-de-açúcar no Brasil.....	8
<b>Figura 4:</b> Evolução da produtividade média dos canaviais brasileiros. ....	11
<b>Figura 5:</b> Área Total cultivada em 2003 em comparação com 2012.....	13
<b>Figura 6:</b> Diagrama de fluxo da produção de açúcar e etanol de cana-de-açúcar.....	15
<b>Figura 7:</b> Representação de um sistema decomponível em partes.....	20
<b>Figura 8:</b> Representação de um sistema não decomponível, porém modular.....	21
<b>Figura 9:</b> Esquema de um tandem de moendas: Conjunto de seis ternos.....	22
<b>Figura 10:</b> Esquema de um difusor com ternos de secagem.....	23
<b>Figura 11:</b> Curva de uma função logística representando um processo de difusão.....	40
<b>Figura 12:</b> Estrutura hierárquica dos objetos no modelo.....	63
<b>Figura 13:</b> Preço das exportações brasileira de açúcar (2006=100).....	96
<b>Figura 14:</b> Produção total – todas as simulações.....	100
<b>Figura 15:</b> Produção total: média por cenário.....	101
<b>Figura 16:</b> Produção total: efeito de diferentes valores de $I_1$ .....	102
<b>Figura 17:</b> <i>Market share</i> dos difusores: todas as simulações.....	103
<b>Figura 18:</b> <i>Market share</i> dos difusores: média por cenário.....	104
<b>Figura 19:</b> Média de <i>know-how</i> dos ternos de moendas por cenário.....	105
<b>Figura 20:</b> Média de <i>know-how</i> dos difusores por cenário.....	106
<b>Figura 21:</b> <i>Know-how público</i> dos ternos de moendas: média por cenário.....	107
<b>Figura 22:</b> <i>Know-how público</i> dos difusores: média por cenário.....	108



## Lista de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Etapas e operações envolvidas na produção agrícola e no processamento industrial da cana de açúcar. ....	10
<b>Tabela 2:</b> Comparativo técnico entre difusor e moenda. ....	27
<b>Tabela 3:</b> Síntese das características técnicas dos dois sistemas de extração da sacarose de cana-de-açúcar. ....	27
<b>Tabela 4</b> Síntese comparativa dos dois sistemas de extração da sacarose de cana-de-açúcar. ....	27
<b>Tabela 5:</b> Evolução tecnológica da indústria canavieira. ....	30
<b>Tabela 6:</b> Certificados de Proteção de Cultivares de Cana-de-Açúcar Expedidos pelo Serviço Nacional de Proteção de Cultivares/Brasil, (jan/1998 a Dez/2007). ....	36
<b>Tabela 7:</b> Fatores determinantes na escolha de tecnologia. ....	60
<b>Tabela 8:</b> Escolhas relevantes na estruturação do modelo ....	61
<b>Tabela 9:</b> Características dos <i>Bens de capital</i> ofertados por <i>Fornecedor</i> em $t=1$ .....	66
<b>Tabela 10:</b> Características dos <i>Bens de capital</i> ofertados por <i>Fornecedor</i> em $t=2$ .....	66
<b>Tabela 11:</b> Características dos <i>Canaviais</i> em $t=1$ .....	68
<b>Tabela 12:</b> Características dos <i>Canaviais</i> em $t=2$ .....	68
<b>Tabela 13:</b> Características dos <i>Bens de capital</i> instalados na <i>Usina</i> .....	70
<b>Tabela 14:</b> Processo de alocação de cana-de-açúcar na <i>Usina</i> . ....	71
<b>Tabela 15:</b> Cômputo da produção na primeira iteração.....	72
<b>Tabela 16:</b> Fluxo de caixa antes do investimento – primeira iteração .....	78
<b>Tabela 17:</b> Retorno estimado da renovação dos <i>Canaviais</i> .....	79
<b>Tabela 18:</b> Retorno estimado da compra de <i>Bens de capital</i> .....	80
<b>Tabela 19:</b> Retorno estimado da construção de uma nova <i>Usina</i> na primeira iteração.....	82
<b>Tabela 20:</b> Retornos estimados das opções de investimentos .....	84
<b>Tabela 21:</b> Fatores relevantes à decisão de investimento e sua representação no modelo. ....	87
<b>Tabela 22:</b> Itens selecionados da inicialização básica do modelo .....	94
<b>Tabela 23:</b> Elementos que compoem o estado inicial do modelo.....	95

<b>Tabela 24:</b> Caracterização dos <i>Bens de capital</i> no <i>Fornecedor</i> no início da simulação .....	97
<b>Tabela 25:</b> Cenários e respectivos valores de parâmetros. ....	99

## Lista de abreviaturas e siglas

BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FAOSTAT	<i>Food and Agriculture Organization - Statistics Division</i> - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - Divisão de Estatísticas
FUNCEX	Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LSD	<i>Laboratory for Simulation Development</i>
MHF	modelos <i>History-friendly</i>
PECEGE	Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas
RIDESA	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro
TDC	Tonelada de cana por dia
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo



## Sumário

Introdução .....	1
Capítulo 1: Agroindústria Canavieira .....	5
1.1 As bases da agroindústria canavieira.....	5
1.2 Produção Agrícola .....	7
1.3 Processamento industrial na usina.....	13
1.4 Tecnologias de extração de caldo.....	22
1.5 Outras considerações a respeito da agroindústria canavieira .....	28
Capítulo 2: Inovação e difusão de tecnologias na agroindústria canavieira .....	33
2.1 Tecnologia e conhecimento na agroindústria canavieira.....	33
2.2 Histórico dos modelos de difusão.....	39
2.3 Modelos evolucionários de difusão .....	44
2.4 Conclusão .....	48
Capítulo 3: Descrição do Modelo .....	51
3.1 Considerações prévias .....	52
3.2 Bases para elaboração do modelo.....	53
3.3 Modelo desenvolvido .....	61
3.3.1 Estrutura geral do modelo.....	64
3.3.2 Detalhamento do Fornecedor de Bem de Capital .....	64
3.3.3 Detalhamento do Canavial.....	67
3.3.4 Detalhamento da <i>Usina</i> .....	69
3.3.4.1 A variável know-how .....	71
3.3.5 Detalhamento do Proprietário.....	76
3.3.5.1 Decisão do Proprietário em investir na Renovação do Canavial.....	78
3.3.5.2 Decisão do Proprietário em investir na compra de um novo Bem de capital.....	79

3.3.5.3	Decisão do Proprietário em investir na criação de uma nova Usina.....	81
3.3.5.4	A escolha pelo Proprietário de como investir .....	82
3.4	Considerações sobre o modelo .....	86
Capítulo 4:	Resultados das Simulações .....	91
4.1	Inicialização.....	91
4.2	Resultados.....	100
4.3	CONCLUSÃO.....	109
Capítulo 5:	Conclusões e perspectivas.....	111
Referências	.....	121
Apêndice A:	Código fonte do modelo de simulação em linguagem própria do Laboratory for Simulation Development 6.1 .....	127

## Introdução

A cana-de-açúcar é produzida no Brasil há séculos e seu primeiro produto, o açúcar, teve um papel central durante o período de colônia. Com o passar do tempo, outros produtos da cana-de-açúcar foram desenvolvidos e incorporados à cultura, à culinária e à economia locais. Desde a década de 1930 o etanol anidro é produzido a partir da cana-de-açúcar e misturado à gasolina como um aditivo oxigenante. Mas somente a partir da segunda metade da década de 1970 a cana-de-açúcar ganhou maior relevância na matriz energética brasileira.

Em resposta aos choques de preço do petróleo em 1973 e 1979, o governo brasileiro criou o programa Pró-álcool, cujo propósito era promover a produção de etanol hidratado e a substituição de veículos movidos a gasolina por veículos movidos a etanol. Após grande sucesso durante a década de 1980, o programa enfrentou diversos problemas até se tornar pouco relevante na década de 1990. O etanol perdeu importância enquanto produto, com a produção de cana-de-açúcar voltando-se para o açúcar.

O cenário seria novamente alterado em 2003 com o advento dos carros *flex*. Capazes de funcionar com qualquer mistura de gasolina e etanol, esses veículos incrementaram a demanda por etanol e criaram uma forte conexão entre os preços de etanol hidratado e da gasolina, redefinindo as características do mercado. Essa nova dinâmica trouxe investimentos em pesquisa focada no aumento da produtividade futura da produção. É esperado que uma nova onda de inovações gestadas em centros de pesquisas e universidades públicas resulte disso.

Nesse contexto, mostrou-se relevante estudar os fatores e agentes determinantes para a difusão de inovações neste complexo. O maior ou menor sucesso dos processos de difusão destas tecnologias novas determinará seu impacto real no setor, na economia e na sociedade. O entendimento de como este processo se conforma permite a ação proativa para direcionar resultados.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação que represente e sintetize um conjunto de hipóteses acerca dos fatores determinantes da difusão de tec-

nologia de extração de sacarose na agroindústria canavieira. Em seguida, pretende-se utilizar este modelo como forma de avaliar o resultado da interação destas hipóteses e contrastá-lo com a realidade estudada. Espera-se que a construção do modelo e a análise dos resultados permitam avaliar e aprimorar as hipóteses inicialmente adotadas. Assim, se propõe que o modelo seja uma ferramenta de consolidação do conhecimento disponível para permitir sua melhor compreensão e sua expansão.

Existem duas tecnologias disponíveis no mercado para a extração de sacarose. A primeira é o uso de ternos de moendas, que comprimem a cana-de-açúcar, rompendo as células e removendo com seus líquidos a sacarose. A segunda é pelo uso de difusores. Água quente é utilizada para remover a sacarose da cana-de-açúcar dilacerada por lixiviação ou por difusão.

Enquanto os ternos de moendas são utilizados há séculos, os difusores foram adaptados há poucas décadas do processo de produção de açúcar da beterraba. Existe um acirrado debate sobre a superioridade técnico-econômica de uma tecnologia sobre a outra. Entretanto, a maior parte das usinas é construída com ternos de moendas e quase nenhuma das usinas existentes optou por trocar de tecnologia.

O trabalho é dividido em cinco capítulos que se seguem a esta introdução. O primeiro capítulo visa apresentar um panorama geral da agroindústria canavieira brasileira. São descritas a conformação típica das unidades produtivas do setor, as atividades produtivas agrícolas (seção 1.1) e as atividades produtivas industriais (seção 1.2). Sendo o foco deste trabalho a atividade de extração do caldo contendo sacarose, as tecnologias alternativas e suas características são descritas em maior detalhe (seção 1.3). Outras considerações tidas como relevantes tendo em vista o estudo proposto também são apresentadas (seção 1.4).

O capítulo 2 descreve a conformação da inovação e da difusão de tecnologias na agroindústria canavieira, ponderando a importância dos agentes que interagem com o setor, a distribuição de competências nestes, as características das tecnologias e processos produtivos envolvidos e a conformação institucional de uma cadeia inovativa setorial (seção 2.1). Em seguida, é revisado um breve histórico dos modelos de difusão (seção 2.2), em

especial dos modelos evolucionários de difusão (seção 2.3). Da combinação destas análises, é definida a metodologia de modelagem adequada ao estudo proposto, um modelo evolucionário *history-friendly* de simulação baseado em agentes (seção 2.4).

No capítulo 3 é apresentado o modelo. São tomadas por base a discussão do capítulo anterior e considerações metodológicas (seção 3.1). Em seguida são descritas as hipóteses que se pretende testar pelo uso do modelo (seção 3.2). A seguir, é descrita em detalhes a estrutura do modelo (seção 3.3). Finalmente, o capítulo é encerrado com um destaque da forma como as hipóteses estão refletidas na estrutura do modelo desenvolvido e suas consequências (seção 3.4).

O quarto capítulo descreve a inicialização do modelo e os resultados obtidos. Na descrição da inicialização utilizada são detalhadas as fontes de dados utilizadas e as relações da inicialização com as hipóteses que se pretende testar (seção 4.1). Na apresentação dos resultados, é feita uma análise destes e da forma como eles derivaram da estrutura e da inicialização do modelo (seção 4.2).

Finalmente, o quinto capítulo conclui o trabalho. São retomados os resultados obtidos, ressaltando sua relação com as hipóteses utilizadas. Essa comparação é feita à luz das características do setor tal qual apresentadas nos capítulos 1 e 2. Como derivação desta análise e do trabalho como um todo aqui apresentado, são propostas linhas futuras de pesquisa.



## **CAPÍTULO 1: AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA**

Levando-se em consideração que, para a criação de um modelo de simulação baseado em agentes que possa contribuir com o estudo da difusão de nova tecnologia de extração de sacarose na agroindústria canavieira, é necessário conhecer os processos e o perfil de seus decisores, o que se pretende com este capítulo é estudar o setor agroindustrial canavieiro com foco centrado no processo de extração de sacarose. É fundamental entender como este processo interfere e sofre interferências das demais etapas produtivas.

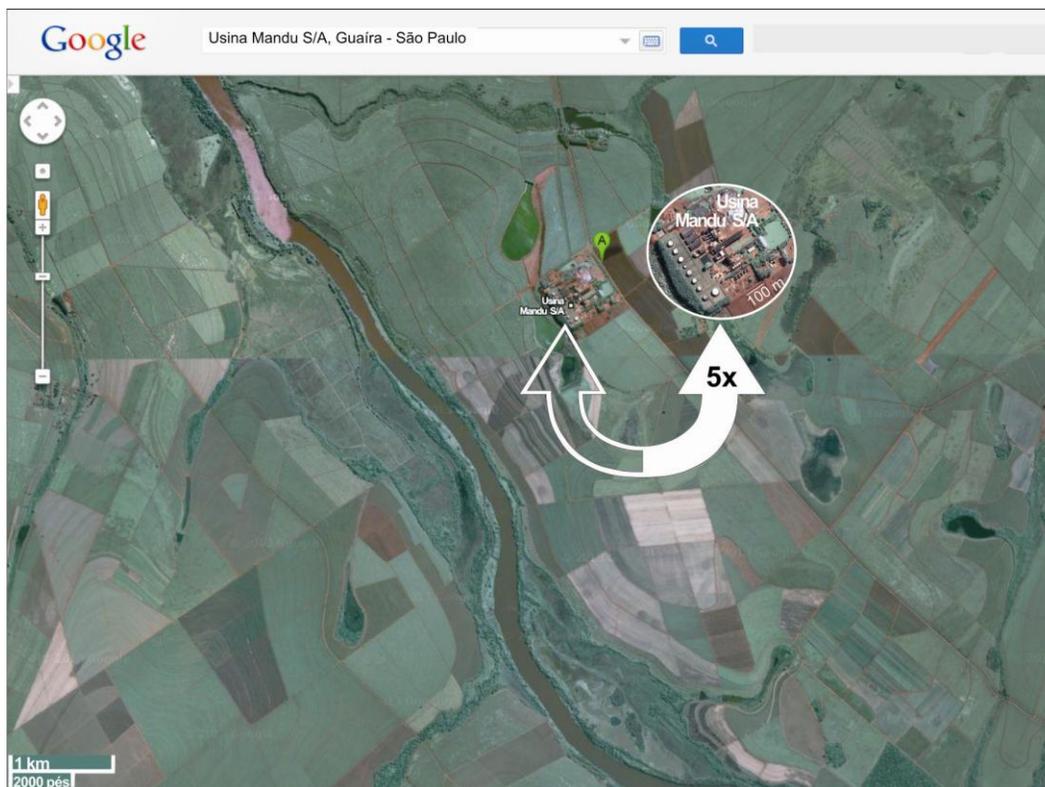
### **1.1 As bases da agroindústria canavieira**

A cana-de-açúcar é, no Brasil, utilizada como principal insumo para produção de diversos produtos industriais. Novas tecnologias trazem perspectivas de ampliar esse leque de produtos. Este capítulo tem por objetivo caracterizar esse complexo produtivo, denominado agroindústria canavieira. Serão abordadas as características gerais do complexo, conformadas por fatores técnico-econômicos, as etapas produtivas e suas características e os produtos e subprodutos gerados.<sup>1</sup>

A agroindústria canavieira define-se pela produção de cana-de-açúcar e seu uso como insumo em processos industriais. Custos de transporte da cana-de-açúcar colhida e o curto tempo de estocagem a que esta resiste exigem uma proximidade geográfica entre as atividades agrícolas associadas à produção da cana-de-açúcar e as atividades industriais de processamento desta como insumo. Tipicamente tem-se uma unidade de processamento industrial da cana-de-açúcar, a usina, cercada pela atividade agrícola que produz seu insumo. Possíveis ganhos de escala são reduzidos pelo crescente custo de transporte, conformando uma faixa de escala de produção economicamente viável. Um exemplo de usina com a atividade agrícola desenvolvida em seu entorno pode ser visto na Figura 1.

---

<sup>1</sup> A descrição apresentada neste capítulo baseia-se principalmente em Piacente (2010), BNDES e CGEE (2008) e CGEE (2009)



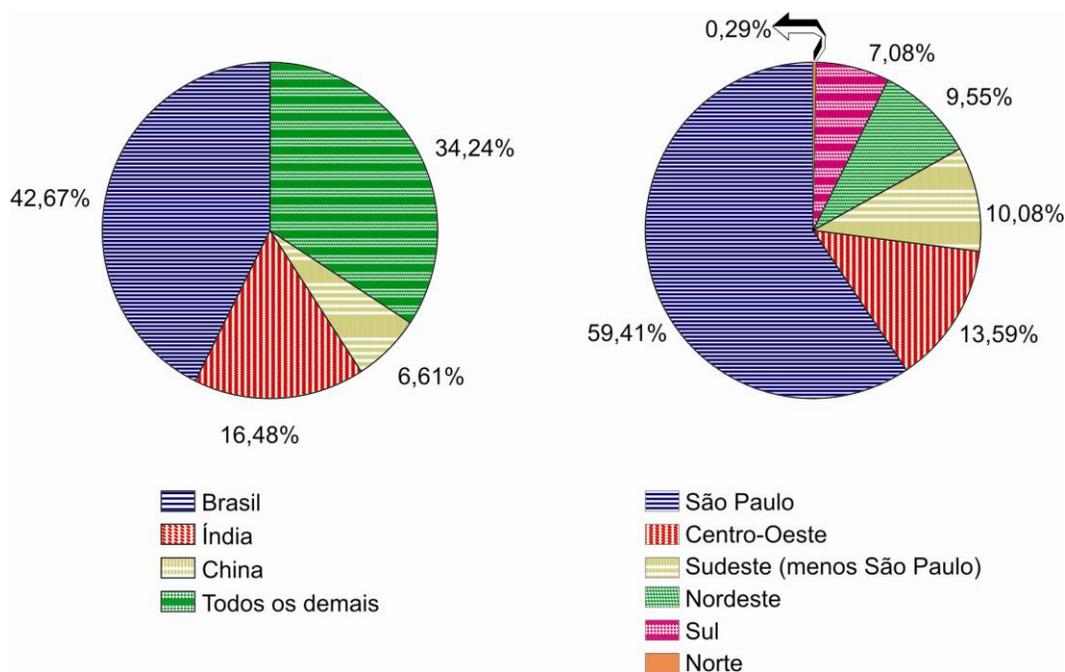
**Figura 1:** Exemplo de implantação de Usina (Usina Mandu – Guaíra / SP).

A área total de cana-de-açúcar, entre áreas próprias e de proprietários rurais que fornecem cana para a Mandu é de aproximadamente 21.000 hectares de terras. Capacidade Instalada: Moagem: 7.920 toneladas de cana/dia. Produção de álcool: 200.000 litros/dia. Produção de açúcar : 9.353 sacas 50 kg/dia. Fonte: GOOGLE acessado em 13/01/2013; INDUSTRIABRASILEIRA acessado em 13/01/2013 e SUCRAL acessado em 13/01/2013

Para atingir este objetivo primeiro foi necessário estudar a agroindústria canavi-eira brasileira para entender seus processos, características e peculiaridades. Foram incluí-das nesse estudo a etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar, a etapa industrial de processamento desta e as diversas formas como interagem as etapas e atividades realizadas no processo produtivo. Em seguida, foi necessário estudar a teoria sobre o processo de difusão e os modelos que dela decorrem, incluindo um estudo dos modelos evolucionários de difu-são e dos modelos de simulação baseados em agentes.

## 1.2 Produção Agrícola

O Brasil destaca-se como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com aproximadamente 720 milhões de toneladas colhidas em 2010. Em uma distante segunda posição a Índia produziu quase 280 milhões de toneladas, seguida pela China, com pouco mais de 110 milhões de toneladas.<sup>2</sup> De acordo com a Pesquisa Agrícola Mensal (IBGE, 2012a), a cana-de-açúcar é o terceiro maior cultivo do Brasil em área plantada, com 9,6 milhões de hectares correspondendo a 14,3% da área ocupada por todos os cultivos. Neste ano foram colhidas 734 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, resultando em um valor da produção de R\$ 39 bilhões, 20,1% do valor da produção agrícola nacional. Nestes totais tem destaque o estado de São Paulo, com uma área plantada de 5,2 milhões de hectares e produção de 427 milhões de toneladas.



**Figura 2:** Distribuição da produção de cana-de-açúcar no mundo e no Brasil em 2010.

Fonte: FAOSTAT (2012) e IBGE (2012b). Elaboração própria.

<sup>2</sup> Os valores apresentados são disponibilizados pela FAOSTAT (2012). Os números da FAO para a produção de cana-de-açúcar do Brasil divergem dos números do IBGE (2012b) em aproximadamente 3 milhões de toneladas, quase 0,5% do total.

A agroindústria canavieira desenvolveu-se em dois eixos principais, um no Centro-Sul do país e o outro no Nordeste. Isso pode ser visto na distribuição geográfica das usinas apresentada na Figura 3.



**Figura 3:** Distribuição das usinas de processamento de cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte: CGEE (2009, p.41)

A cana-de-açúcar pertence à família das gramíneas e é originária do sudeste da Ásia. Ela está bem adaptada a ambientes quentes com grande radiação solar, não apresentando saturação por excesso de insolação. Nos períodos de chuva a planta tem rápido crescimento, enquanto que nos períodos de pouca chuva ela armazena energia em estoques de sacarose. Sendo o objetivo do cultivo no modelo atual do setor a extração da sacarose, é interessante que este se dê em regiões com ciclos de chuva bem definidos, solo fértil e forte insolação.

A sacarose é armazenada em colmos que formam a haste da planta. Da haste saem as folhas e pontas, que compõem a palha. No processo de colheita a haste é cortada e levada, junto com parte da palha. A planta recomeça o processo de crescimento, mas perde produtividade a cada ciclo. Tipicamente, sem irrigação, após cinco anos é mais rentável promover o replantio. Dessa forma tem-se um ciclo de, em geral, seis anos. A primeira colheita, da chamada cana-planta, dá-se 12 ou 18 meses após o plantio, dependendo da variedade da cana-de-açúcar. Seguem-se quatro colheitas anuais da chamada cana-soca, resultante da rebrota da planta. Finalmente, quando a produtividade do canavial estiver muito baixa, faz-se a reforma da área, seguida do replantio da cana-de-açúcar. Na reforma a área pode ficar em descanso, sem produzir, ou pode ser utilizada para produção de culturas de ciclo curto, como leguminosas.

Em uma usina típica, a área total plantada é dividida em diversas áreas menores, cada uma em fase diferente do ciclo. Desta forma, elimina-se o caráter cíclico da produtividade do cultivo da cana-de-açúcar, adequando a produção dessa às necessidades da usina. Essa fragmentação da área total do canavial reflete-se nas linhas e diferenças de tonalidade que podem ser vistas na Figura 1.

Também no momento de criação de uma usina é necessário levar em conta as particularidades da etapa agrícola. O plantio da cana-de-açúcar deve ser iniciado alguns anos antes da conclusão da usina, visando garantir o suprimento de matéria prima para esta desde seu início e já estruturar o campo em relação ao ciclo, além de usar as primeiras áreas de cultivo para a multiplicação de mudas.

O ciclo completo do campo inicia-se com o preparo do solo, quando se faz a aração, gradagem, subsolagem e calagem. Em seguida, escolhidas as variedades de cana-de-açúcar, tem-se o sulcamento, adubação do sulco e plantio. A escolha de variedades adequadas às condições específicas do campo, como tipo de solo e regime de chuvas, é essencial para garantir a produtividade agrícola.<sup>3</sup> A cana planta demanda tratamentos culturais que incluem o controle de pragas, a adubação e a manutenção da área.

---

<sup>3</sup> A concentração geográfica dos recursos destinados à pesquisa de variedades e o foco desta afeta a disponibilidade de variedades adequadas a certas áreas (WWF-Brasil 2008, p.19)

A adubação demanda pouco uso de fertilizantes quando comparado a outras culturas comuns no Brasil. Isso em parte porque a torta de filtro e a vinhaça, ambos subprodutos do processo industrial realizado na usina, são utilizadas de forma a complementar os fertilizantes. O trato cultural da cana soca demanda os mesmos tratos despendidos à cana planta e, quando não é praticada a queima na colheita, faz-se o enleiramento da palha deixada no campo. Se devidamente enleirada, essa palha contribuirá para a manutenção da qualidade do solo e para a redução de pragas (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005), além de reduzir o custo de transporte ao ser deixada no campo. Por fim, tem-se a colheita, que pode ser feita com ou sem a queima prévia do canavial.

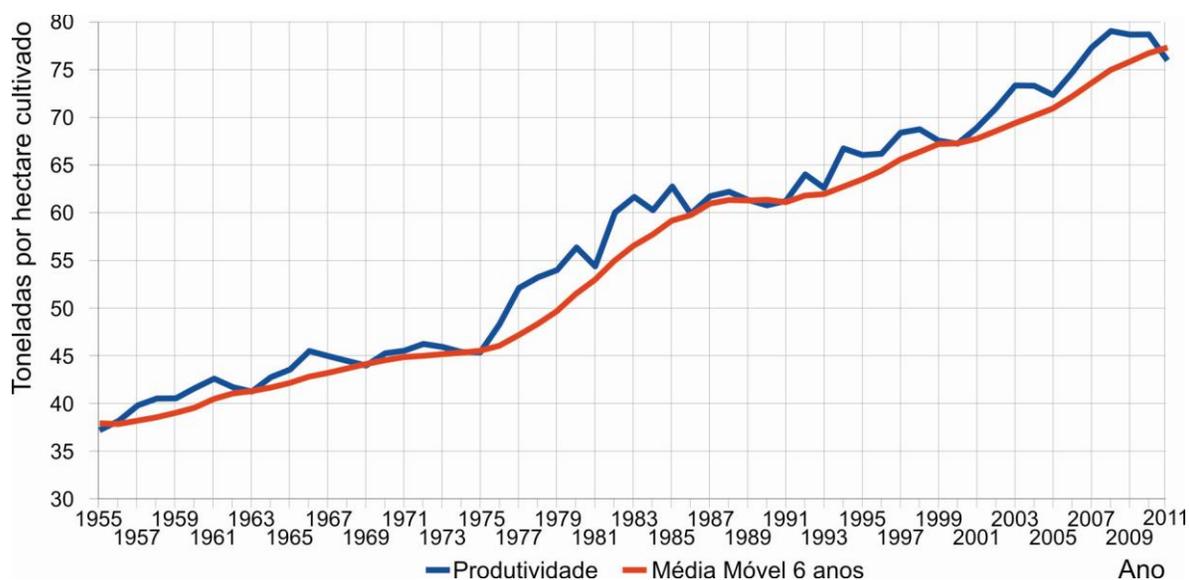
<b>Etapas</b>	<b>Operações agrícolas/industriais</b>	<b>Principais melhorias técnicas</b>
<b>Preparo de Solo</b>	Aração; Gradagem; Subsolagem; Calagem.	Agricultura de precisão; mapas de aplicação de agroquímicos e; sistematização georeferenciadas de áreas para cultivo.
<b>Plantio</b>	Escolha da muda; Sulcação; Adubação do sulco; Plantio.	Mudas geneticamente melhoradas; e plantio mecanizado.
<b>Tratos Culturais: <i>Cana planta</i></b>	Controle de ervas daninhas e insetos invasores; Adubação; Manutenção de curva de nível, estradas e canais.	Equipamentos e tratores com baixa compactação; tratos culturais conservacionistas; técnicas para retenção de água no solo.
<b>Tratos Culturais: <i>Cana soca</i></b>	Enleiramento da palha; Controle de ervas e insetos invasores; Descompactação (subsolação + gradagem); Manutenção de curva de nível, estradas e canais.	Equipamentos e tratores com baixa compactação; tratos culturais conservacionistas; técnicas para retenção de água no solo.
<b>Colheita</b>	Queima; Corte; Carregamento; Transporte.	Colheita mecânica; sistemas de gerenciamento e otimização de colheitas e frotas.

**Tabela 1:** Etapas e operações envolvidas na produção agrícola e no processamento industrial da cana de açúcar.

Fonte: PIACENTE (2010)

A queima elimina a palha e facilita o processo de colheita manual, mas restrições ambientais levam essa prática a ser progressivamente abandonada. Quando o terreno é adequadamente plano e com pouca declividade, a colheita da cana crua, sem queima, pode

ser feita com corte mecânico. Caso o terreno seja muito irregular ou em declive, não é possível utilizar as colhedoras e é necessário fazer a colheita manual. O material colhido é, então, carregado em caminhões com capacidade de 15 a 60 toneladas de carga e transportado até a usina.



**Figura 4:** Evolução da produtividade média dos canaviais brasileiros.

Fonte: Pesquisa Agrícola Mensal - IBGE (2012a). Elaboração própria.

A evolução da produtividade dos canaviais é determinada pela introdução de diversas tecnologias e técnicas. Atualmente essas tecnologias incluem a agricultura de precisão, mecanização, melhorias de técnicas de cultivo e novas variedades de cana-de-açúcar (PIACENTE, 2010).

A agricultura de precisão, com mapas de aplicação de agroquímicos e sistematização georreferenciada da área para cultivo, permite o uso mais racional da terra e de seus recursos e a redução no uso de agroquímicos sem perda de eficiência, reduzindo custos e efeitos colaterais. Ela está associada a certo grau de mecanização para permitir sua melhor implementação.

A mecanização do campo é dificultada pela declividade do terreno. Em áreas planas a mecanização pode trazer benefícios econômicos significativos. Porém, as máqui-

nas não conseguem operar adequadamente em áreas de maior declividade, inviabilizando a adoção em certos locais. O plantio mecanizado e a colheita mecanizada, reduzem o tempo e a mão-de-obra necessários para estas atividades, além de facilitar a colheita sem queima do canavial, que tem forte impacto ambiental. Esses equipamentos, assim como os equipamentos de transporte da cana-de-açúcar colhida e dos insumos agrícolas vêm sendo modificados para reduzir a compactação do solo. Isto, associado com sistemas de gerenciamento e otimização de colheitas e frotas, significa que a mecanização do campo torna-se possível a custos menores e com menor impacto sobre a qualidade do solo.

As melhores técnicas incluem tratos culturais conservacionistas, técnicas para retenção de água no solo e técnicas e tecnologias para melhor aproveitamento de recursos disponíveis, incluindo subprodutos do processo produtivo. Um exemplo disto são tecnologias e processos para redução do teor de potássio na vinhaça e concentração desta com baixo consumo energético. Ambos permitiram um uso mais intensivo e extensivo da vinhaça para fertilização do solo, cujo atual teor de potássio impõe limites ao uso intensivo e cujo grande conteúdo de água resulta em custos de transporte que inviabilizam o uso em terras mais distantes da usina.

O melhoramento genético das variedades de cana-de-açúcar também é uma fonte relevante de incremento de produtividade agrícola. Mudanças geneticamente modificadas podem implicar em menor consumo de insumos agrícolas, menor susceptibilidade a doenças e pragas, maior volume de produção agrícola por área plantada e maior qualidade do produto gerado.

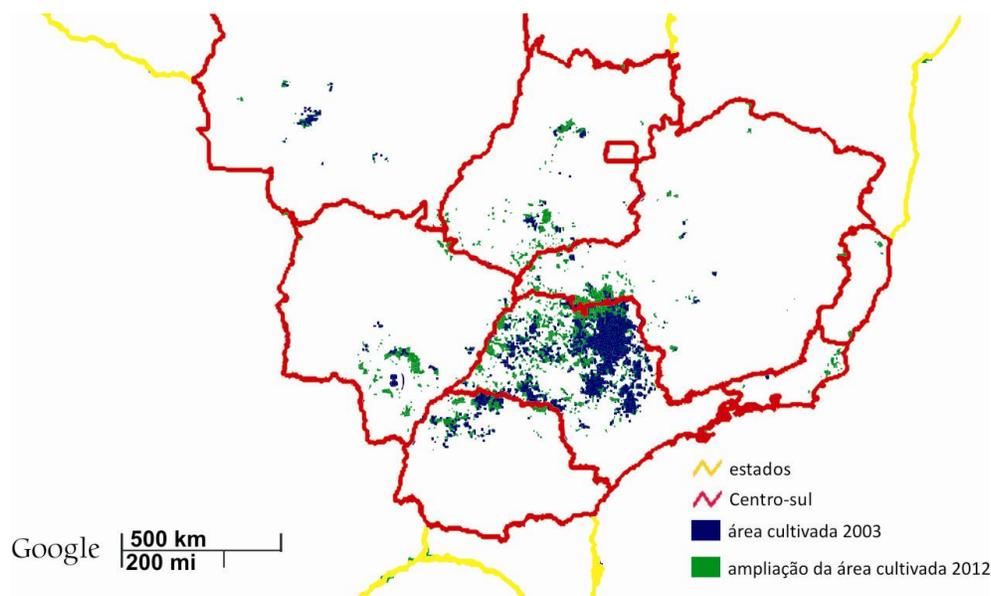
Embora o aumento da produtividade seja um fator relevante na expansão da produção, também é necessário considerar a importância da expansão da área plantada. Nos 20 anos compreendidos entre 1990 e 2010, a quantidade produzida cresceu 173,14%, resultado de um incremento de 28,4% de produtividade dos canaviais e de 112,4% da área colhida (PEREIRA, C., 2012). Como pode ser visto na Figura 5, parte significativa desta expansão deu-se fora da área de produção tradicional de cana-de-açúcar.

Esse movimento de ocupação tardia do Centro-Oeste com a produção de cana-de-açúcar implica na necessidade de novos estudos e desenvolvimento de novas técnicas para melhor adaptar a produção às condições locais, além de diferentes padrões de investi-

mento. Características diferentes de solo podem exigir correção ou demandar o desenvolvimento de mudas diferentes melhor adaptadas. Infraestrutura carente ou inadequada podem exigir investimentos em melhorias.<sup>4</sup> Como destacado por Embrapa (2008):

“Com a expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado, em algumas de suas regiões, haverá necessidade de irrigação de lâminas de água entre 80 mm e 120 mm, realizados, normalmente, após o plantio ou colheita da cultura, denominada 'irrigação de salvamento'”. (p.01)

Como resultado disto foi adotada em Goiás, de forma pioneira, a irrigação da cana-de-açúcar por gotejamento.



**Figura 5:** Área Total cultivada em 2003 em comparação com 2012.

Fonte: CANASAT acessado em 03/02/2013

### 1.3 Processamento industrial na usina

A cana-de-açúcar não pode ser armazenada por mais que alguns dias. O processo de colheita é feito levando em consideração a capacidade de processamento da usina de

---

<sup>4</sup> Pereira, C., (2012) identificou a carência de infraestrutura como um dos fatores relevantes para explicar a demora do setor em expandir-se para o Centro-Oeste.

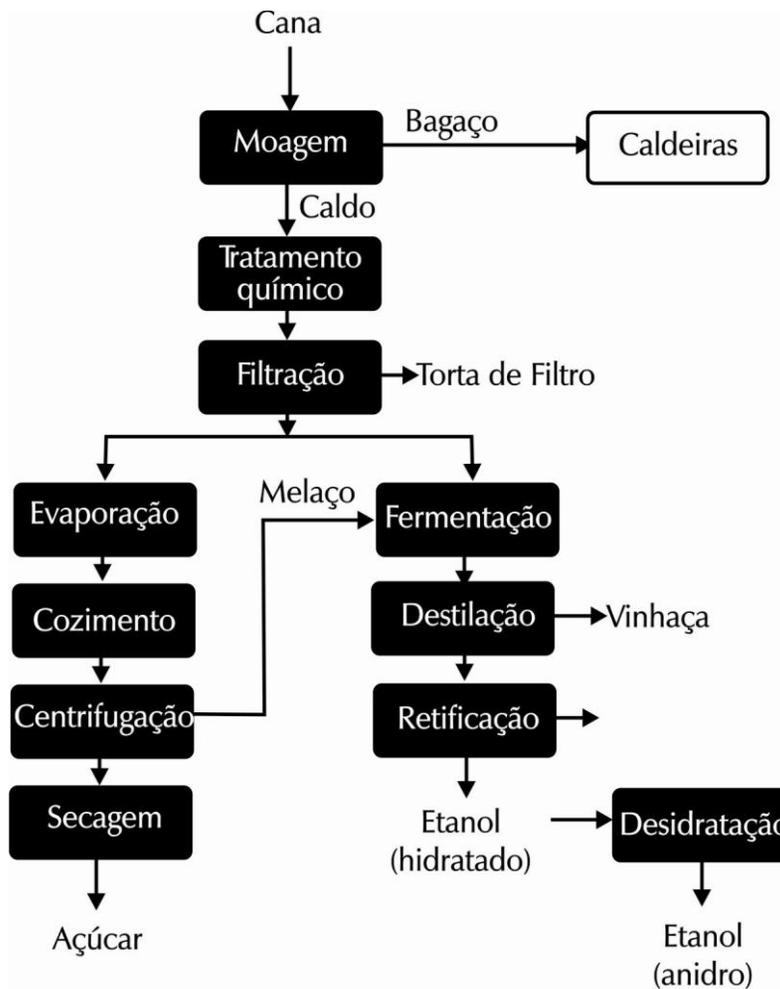
forma a garantir o suprimento constante de matéria prima, mas também garantir que esta cana-de-açúcar já colhida possa ter seu processamento rapidamente iniciado.

O processamento da cana-de-açúcar tem início com o preparo e a extração do caldo. Depois disso os processos divergem de acordo com o produto final que se almeja produzir. Um esquema do processo pode ser visto na Figura 6. Algumas usinas especializam-se na produção de açúcar e algumas na produção de etanol, mas a maior parte delas possui ambas as estruturas para produção de açúcar e de etanol, em geral cada com capacidade de processar 75% do total de caldo que a usina pode gerar. Desta forma a usina pode destinar 75% do caldo para a produção de açúcar e 25% para a produção de etanol, 75% para a produção de etanol e 25% para a produção de açúcar ou qualquer composição intermediária.

Uma vez recebida na usina, a cana-de-açúcar é limpa por lavagem ou a seco, por sopradores. A forma de colheita afeta o processo de limpeza a ser utilizado. A lavagem com água só é possível quando a cana-de-açúcar chega à usina inteira, visto que a água lava parte da sacarose da cana-de-açúcar picada, resultando em perdas. A cana-de-açúcar colhida manualmente chega à usina inteira. A cana-de-açúcar colhida mecanicamente pode chegar picada. Neste caso é mais adequado o uso da limpeza a seco por sopradores. Os sopradores também têm a vantagem de simplificar as instalações e de não consumir água. A forma de colheita também afeta a quantidade e o tipo de sujeira que estará presente.

Em seguida a cana-de-açúcar é picada e preparada por um desfibrador, que visa expor e/ou romper as células que armazenam a sacarose. Um conjunto de facas pica a cana-de-açúcar em pedaços menores. Um desfibrador destrói a casca e os nós da cana-de-açúcar. Isto expõe as estruturas de armazenamento da sacarose, aumentando a eficiência dos processos subsequentes.

A etapa seguinte do processamento industrial da cana-de-açúcar na usina é a extração do caldo, foco deste estudo. Atualmente duas tecnologias estão disponíveis para essa tarefa, as moendas e os difusores de cana. Na primeira, ternos de moendas sequenciais comprimem a cana de forma a separar o caldo do bagaço. Na segunda, lixiviação e difusão fazem a função de separar o caldo. As características de cada processo serão abordadas em detalhes na próxima seção.



**Figura 6:** Diagrama de fluxo da produção de açúcar e etanol de cana-de-açúcar.  
Fonte: BNDES;CGEE, (2008).

Independente da tecnologia adotada, são obtidos neste ponto do processo o bagaço com 50% de umidade e o caldo. O bagaço é majoritariamente destinado à queima em caldeiras. Tradicionalmente tinham-se caldeiras de baixa pressão e o vapor gerado era utilizado para gerar eletricidade para consumo próprio da usina e para o acionamento mecânico de parte dos equipamentos. Conforme as usinas foram sendo conectadas à rede de energia elétrica, as caldeiras de baixa pressão foram sendo substituídas por caldeiras de alta pressão, mais eficientes na geração de energia. Os sistemas mecânicos acionados a vapor em pressão foram sendo substituídos por motores elétricos, cujo consumo energético

co é menor. Como resultado, a usina passou a ser uma unidade com geração líquida de energia que é vendida ao sistema elétrico.

As tecnologias de etanol de segunda geração permitem dar outro uso ao bagaço. A estrutura lignocelulósica das células da planta pode ser rompida e utilizada como insumo para a produção de etanol. O princípio fundamental do processo é desfazer essas estruturas e reduzi-las a açúcares mais simples que possam ser fermentados. Este processo ainda está em fase inicial de otimização, mas tem potencial de aumentar significativamente a eficiência total da usina (EMBRAPA, 2010).

Após extraído, o caldo deve seguir para tratamento para remoção de impurezas e preparo, entretanto estes processos são diferentes dependendo do produto final a ser produzido e do processo de extração de do caldo. Enquanto as moendas extraem um caldo com mais impurezas e areia, o difusor extrai mais componentes vegetais, assim os processos de remoção de impurezas precisam ser diferentes.

Para a produção de açúcar, o caldo é primeiro peneirado. Em seguida, tem-se o clareamento químico e a precipitação das impurezas em um decantador. Como resultado da filtragem destas impurezas tem-se a torta de filtro, que é utilizada para a adubação do canavial.

O caldo é aquecido para evaporar a água e elevar a concentração de sacarose, resultando no xarope. O cozimento deste faz com que se formem cristais, que crescem conforme novas camadas vão sendo depositas. O resultado é uma mistura de cristais e mel, que são separados por centrifugação. O mel pode passar novamente pelo processo para recuperar uma maior fração da sacarose disponível. O melaço, mel resultante desse reprocessamento do mel, serve de insumo à produção de etanol, conforme será visto mais à frente.

Para obter o açúcar bruto resta somente a secagem dos cristais separados pela centrifugação. A usina pode vender o açúcar bruto, usado como insumo em refinarias, ou refiná-lo internamente e vender o açúcar cristal branco. O açúcar cristal branco é um produto de maior valor agregado para a usina. Vale destacar que as impurezas vegetais extraídas pelo difusor – mas não extraídas pelo terno de moenda – podem dificultar ou encare-

cer o processo de clareamento que é parte do refino do açúcar, podendo tornar economicamente inviável a produção de açúcar cristal branco de maior pureza, geralmente destinado à exportação.

Para a produção do etanol, depois de tratado e filtrado o caldo é evaporado para aumentar sua concentração. Caso o melaço – subproduto da produção de açúcar – esteja disponível, ele é misturado ao caldo concentrado. O mosto obtido é fermentado por leveduras por um período de 4 a 6 horas e passa a ser denominado vinho. No processo mais comum nas usinas brasileiras, o vinho passa por centrifugação para recuperar as leveduras, que serão reutilizadas. O vinho, que tem uma concentração de 7% a 10% de álcool, é então destilado repetidas vezes em colunas de destilação para dar origem à vinhaça, ao etanol hidratado, a álcoois de segunda e a óleo fúsel.

Normalmente, para cada litro de etanol hidratado produzido tem-se de 10 a 13 litros de vinhaça, que é utilizada para fazer fertirrigação, reduzindo o consumo de adubo na etapa agrícola. O etanol hidratado, com aproximadamente 96° GL, pode ser vendido como produto final ou pode ser desidratado para gerar o etanol anidro, com aproximadamente 99,7° GL.

A desidratação não pode ser feita diretamente pois o etanol hidratado é uma mistura azeotrópica. Isso pode ser resolvido pela adição do cicloexano, que torna a mistura destilável, por peneiras moleculares ou por destilação extrativa com monoetilenoglicol. O uso do cicloexano é o processo mais comum no Brasil, mas as peneiras moleculares vêm ganhando espaço por resultar em um etanol anidro livre de contaminantes e, portanto, responder às crescentes pressões ambientais.

Assim como acontece na etapa agrícola, as usinas variam entre si no nível de eficiência de operação na etapa industrial. Tipicamente uma tonelada de cana pode produzir 86 litros de etanol hidratado e não produzir açúcar, 100 Kg de açúcar mais 23 litros de etanol hidratado ou qualquer combinação intermediária. (BNDES; CGEE, 2008)

Como pode ser visto, o processo produtivo completo é composto por uma sequência de atividades, cada uma delas responsável por parte da transformação do insumo nos produtos finais. Existem, para várias dessas atividades, diversas tecnologias ou técni-

cas disponíveis. A título de exemplo, a colheita pode ser feita com ou sem a queima prévia do canavial; a colheita também pode ser manual ou mecanizada; a palha pode ser enleirada no canavial ou recolhida junto com a cana-de-açúcar; a limpeza pode ser feita por lavagem ou a seco; a extração do caldo pode ser feita por ternos de moenda ou por difusor; a fermentação pode ser por batelada ou contínua; a desidratação pode ser feita com o uso de cicloexano, peneiras moleculares ou monoetilenoglicol.

A escolha pelo uso de uma técnica ou tecnologia em uma atividade depende das características técnico-econômicas das opções disponíveis, mas também pode ser afetada pelas técnicas e tecnologias utilizadas em certas outras atividades, independente das técnicas e tecnologias utilizadas.

Por exemplo, a escolha entre colheita manual e mecanizada depende do custo e da disponibilidade de mão-de-obra para a colheita, dos custos de capital e de operação do maquinário em questão e da declividade do terreno do canavial. As relações entre custos determinam qual opção resulta em maior vantagem econômica e a declividade excessiva do canavial inviabiliza a colheita mecanizada.

Mas a escolha pela colheita mecanizada também implica na não queima prévia do canavial e implica na limpeza a seco. A queima prévia do canavial, que facilita a colheita manual, mas reduz a quantidade de biomassa disponível para geração de eletricidade, não é necessária com a colheita mecanizada. A limpeza por lavagem, levando em consideração que a colheita mecanizada resulta em cana-de-açúcar fatiada em colmos, levaria a perdas significativas de sacarose.

Essa interação entre atividades não existe somente para atividades imediatamente sequenciais. Por exemplo, a queima na caldeira para gerar energia elétrica é afetada por escolhas em diversas outras atividades. A queima ou não queima do canavial prévia à colheita determina a disponibilidade das pontas para queima junto com o bagaço. A forma de colheita afeta a carga de impurezas que irão junto com o bagaço. O uso do difusor resulta em um bagaço com fibras mais longas, que exige adaptações na alimentação da caldeira.

Existem também atividades que sofrem pouco ou nenhum impacto de alterações em outras atividades. A exemplo disto temos a desidratação do etanol hidratado,

cujas tecnologias podem ser intercambiadas independentemente das formas como são realizadas as atividades prévias. Entretanto, esta atividade ainda consome energia elétrica, de forma que alterações nela que resultem em alterações em seu consumo energético afetam a rentabilidade do sistema como um todo.

A interface entre uma atividade e outra é o produto. A forma como é feita a colheita determina as características da cana-de-açúcar colhida e, portanto, estabelece limitantes à forma como deve ser feita a limpeza. Por outro lado, a forma como é feita a colheita também gera demandas para seu insumo, a cana-de-açúcar no canavial, afetando as alternativas pré-colheita. Qualquer mudança que altere alguma característica dos produtos e subprodutos de uma atividade pode exigir adaptações em alguma outra atividade.

Mas toda essa interação entre as diferentes atividades do processo produtivo que tem lugar na usina não implica em uma completa rigidez das técnicas e tecnologias. Diversas combinações das técnicas e tecnologias das várias atividades existem na população de usinas. Também são observadas alterações nas técnicas e tecnologias em uso nas usinas. A interação entre as atividades implica em custos adicionais de mudança, visto que adaptações em outras atividades serão necessárias. Mas esses custos extras não necessariamente inviabilizam mudanças.

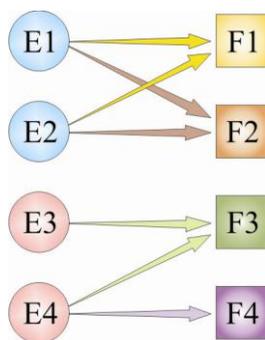
São exemplos de mudança a difusão da colheita mecanizada e as adaptações em diversas atividades para geração de maiores excedentes de energia elétrica. Aumento do custo de mão-de-obra para colheita em paralelo com pressões ambientais para a não realização de queimada pré-colheita levaram à difusão acelerada da tecnologia de colheita mecanizada, mesmo isso implicando em alterações em outras atividades, como no transporte da cana-de-açúcar colhida e na limpeza desta na chegada à usina.

As alterações necessárias para aumentar os excedentes de energia elétrica foram muito mais significativas, mas foram motivadas por grandes ganhos potenciais. O aumento do preço da energia elétrica e a conexão de diversas usinas à rede levou à valorização desta como produto das usinas. Foram necessárias a substituição das caldeiras de baixa pressão por caldeiras de maior pressão, de sistemas de acionamento mecânicos por sistemas elétri-

cos e da queima do canavial pela não queima, juntamente com formas de colheita e transporte que permitissem trazer maior volume de biomassa do canavial para a usina.

Os conceitos de modularidade e decomponibilidade conforme apresentados por Frenken (2006) são úteis para compreender essa questão da interação entre as diferentes atividades realizadas no processo produtivo. Ele define um sistema complexo como um conjunto de elementos e um conjunto de funções. Os elementos definem os resultados das funções e estas definem o resultado do sistema como um todo.

Assim sendo, um sistema é considerado decomponível em partes quando alterações nos elementos de uma das partes afeta somente um subconjunto das funções e alterações em outros elementos não afetam as funções desse subconjunto. Esse conceito pode ser melhor entendido observando a Figura 7. Nesta figura, o sistema é decomponível em duas partes, uma composta pelos elementos E1 e E2 juntamente com as funções F1 e F2 e a outra pelos elementos E3 e E4 juntamente com as funções F3 e F4.



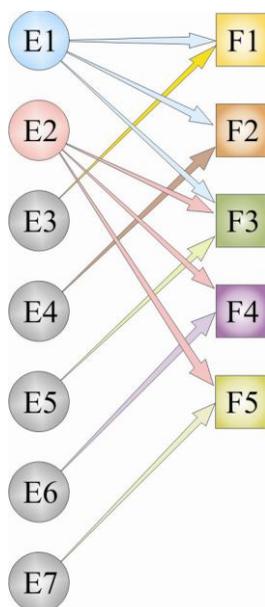
**Figura 7:** Representação de um sistema decomponível em partes.

Fonte: baseado em FRENKEN (2006). Elaboração própria

Levando em consideração as interfaces entre as atividades, o processo produtivo em uma usina não pode ser decomposto. Não é possível estabelecer uma atividade ou um conjunto de atividades que, objeto de modificações, não teria impacto potencial em qualquer outra atividade ou no processo como um todo.

Entretanto, sistemas não decomponíveis ainda podem ser modulares. Em um sistema modular, alguns elementos têm impacto em poucas funções enquanto outros ele-

mentos têm impacto em muitas funções. Os elementos que têm impacto em muitas funções (elementos de maior pleiotropia) servem de mediadores das interações entre os outros elementos. Na Figura 8 temos um sistema modular não decomponível. Nele, os elementos E1 e E2 são os elementos mediadores entre os vários elementos e são responsáveis pela não decomponibilidade do sistema.



**Figura 8:** Representação de um sistema não decomponível, porém modular.

Fonte: baseado em FRENKEN (2006). Elaboração própria.

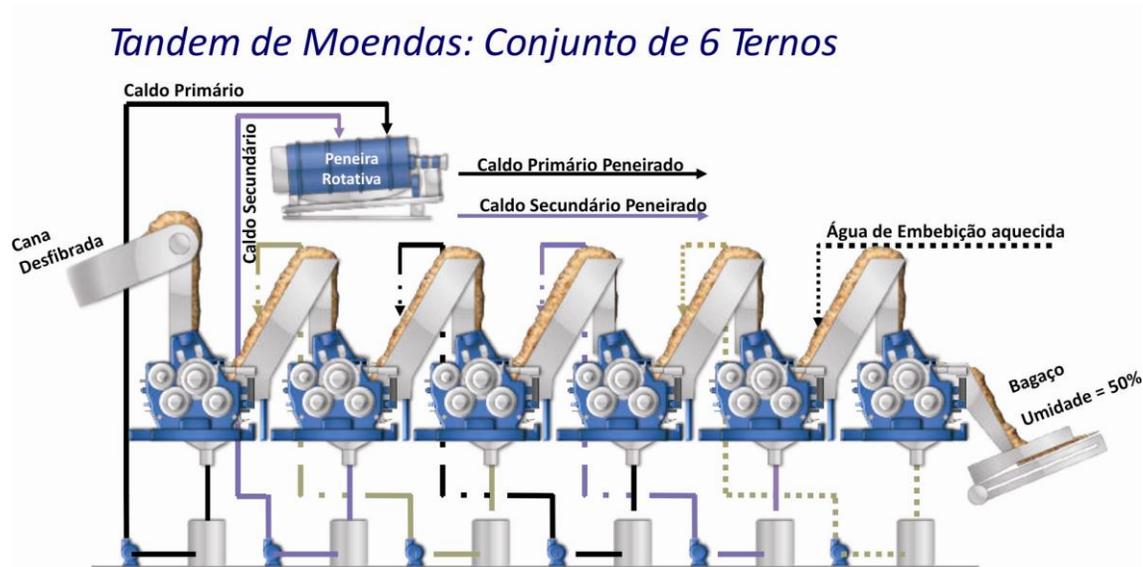
O processo produtivo agroindustrial canavieiro completo pode ser entendido como um sistema modular não decomponível. Alguns elementos têm impacto em poucas funções, como a desidratação do etanol hidratado impactando o consumo energético. Outros elementos têm impacto em várias funções, como a colheita impactando na limpeza, na extração de caldo e na caldeira. Algumas funções sofrem impacto de poucos elementos, como a desidratação do etanol hidratado. Outras funções sofrem impacto de diversos elementos, como o saldo energético da usina.

Dessa forma, é possível entender como, apesar de não ser decomponível, o processo produtivo comporta alterações em diversas das atividades que o compõem. Cada elemento tem impacto em certo número de funções, exigindo certo volume de a-

daptações. Ou seja, alterações em diferentes atividades serão possíveis, mas exigirão diferentes esforços de adaptação em diferentes números de processos.

#### 1.4 Tecnologias de extração de caldo

Um terno de moenda é um conjunto de três a quatro rolos acoplados de forma a gerar regiões sequenciais de compressão. A cana preparada passa pelo primeiro terno, onde é extraído o caldo primário. O bagaço segue de terno a terno. O caldo extraído do primeiro e do segundo ternos é peneirado e compõe o caldo efetivamente utilizado nos processos seguintes. O caldo extraído nos ternos posteriores é usado para embebição do bagaço do terno imediatamente anterior ao terno do qual foi extraído. O bagaço usado na alimentação do último terno é embebido em água aquecida. Assim, conforme o bagaço avança de um terno ao próximo, ele é progressivamente embebido em solução com menor parcela de sacarose e maior parcela de água. Os produtos do processo como um todo são o bagaço com umidade de 50% e o caldo peneirado.

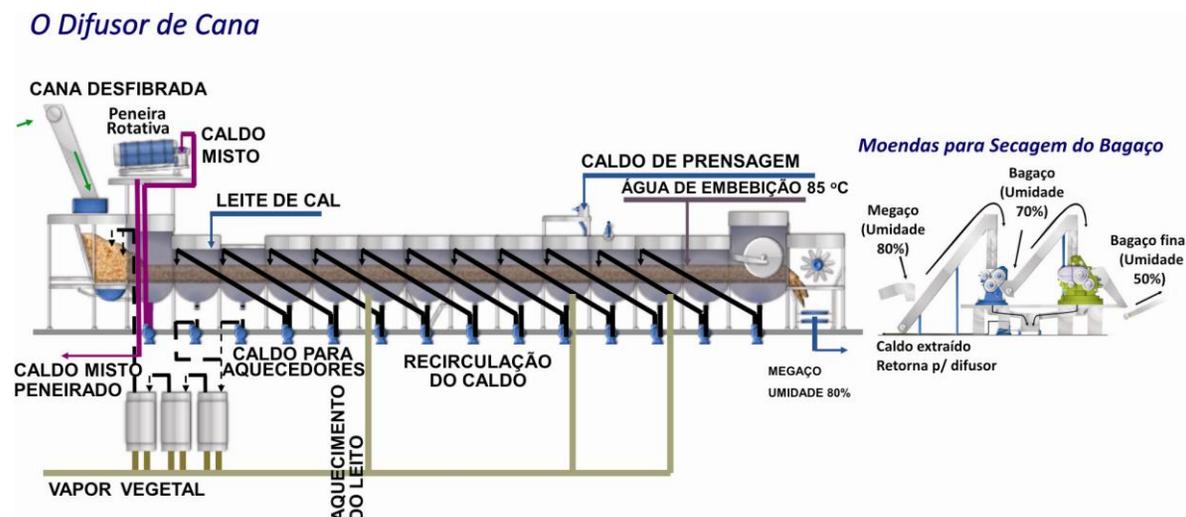


**Figura 9:** Esquema de um tandem de moendas: Conjunto de seis ternos.

Fonte: Dedini SA Indústrias de Base, 2011.

O princípio básico de um difusor de cana é utilizar a água quente para retirar a sacarose das células da planta. O conteúdo das células danificadas no preparo já está exposto e dilui-se na água. O conteúdo das células não rompidas no preparo é extraído por difusão, processo pelo qual a sacarose desloca-se do meio mais concentrado, dentro da célula, para o meio menos concentrado, a solução na qual a cana está imersa. Esse princípio de funcionamento exige que a solução na qual a cana-de-açúcar é embebida esteja bastante diluída, levando à posterior maior necessidade de evaporação para concentrar o caldo.

No processo, a cana é alimentada em uma extremidade da máquina e segue em direção à outra extremidade. A água aquecida é bombeada em sentido oposto à cana, de forma que imediatamente antes de ser retirada da máquina a cana está imersa no ponto menos concentrado da solução. A solução é coletada junto à extremidade onde é alimentada a cana e segue para processamento posterior. O bagaço da cana é retirado na outra extremidade e deve passar por dois ternos de moenda, denominados terno desaguador e terno secador, que visam reduzir a umidade deste a 50%, adequando-o aos processos seguintes.



**Figura 10:** Esquema de um difusor com ternos de secagem.

Fonte: Dedini SA Indústrias de Base, 2011.

As duas tecnologias de extração têm algumas diferenças que merecem destaque neste trabalho. A primeira delas diz respeito à escala mínima do investimento e à facilidade de expansão. Utilizando moendas, uma usina pode facilmente desenhar um plano de expansão da capacidade de moagem em fases. A capacidade pode ser quase dobrada acrescentando mais ternos ao mesmo tandem e aumentando a velocidade de operação destes. No caso do difusor de cana tradicional, o custo envolvido na expansão a inviabiliza. Além disso, a capacidade de processamento de um difusor não é desprezível frente à produção de cana em torno de uma usina típica, de forma que, pode ser difícil fazer um alinhamento fino da capacidade de processamento da usina com o volume de cana disponível para processamento. Novos projetos de difusores de cana visam permitir a expansão deste por módulos buscando resolver este problema.

Outra diferença é a qualidade do caldo extraído. Enquanto as moendas extraem um caldo com mais impurezas e areia, o difusor extrai mais componentes vegetais. Por isso são necessários tratamentos diferentes ao caldo em cada caso. Além disso, o caldo extraído pelo difusor está mais diluído em água, de forma a exigir mais evaporação. Em parte como consequência destas características, o consumo energético de cada tecnologia é diferente. Quando comparado às moendas, o difusor consome mais energia térmica, visto que seu processo completo demanda mais evaporação e consome maiores volumes de água quente. Por outro lado, as moendas utilizam muita energia mecânica para seu acionamento, consumindo mais eletricidade - caso sejam elétricas - ou pressão - caso sejam acionadas por vapor pressurizado - que o difusor. Decorre disso que cada tecnologia é mais adequada a um balanço e configuração energéticos específicos podendo, dependendo destes, gerar maior ou menor excedente de bioeletricidade.

Mais uma questão é a sensibilidade do processo. O resultado obtido pelo difusor é mais sensível à qualidade do preparo da cana. Ele também perde eficiência quando são feitas muitas paradas ou paradas muito longas. Além disso, em caso de mal funcionamento de um terno, um tandem ainda pode funcionar com *by-pass*, algo que seria difícil em um difusor. Em contrapartida, em condições adequadas de operação, o difusor é capaz de extrair um percentual mais elevado da sacarose da cana e opera com custos menores.

O resultado líquido de todos esses fatores em termos de qual é mais vantajoso não é consensual. Em uma revisão de diversos estudos comparativos entre as tecnologias, Nazato et al (2012) concluem que “(...) *para as novas usinas, mostra-se conveniente o advento do difusor, uma vez que ele apresenta vantagens extras.*” Já para de Oliveira (2010), “(...) *essa resposta não é trivial. Não existe um consenso entre fabricantes de equipamentos, empresas de consultoria, usina e outros atores. Cada sistema de extração tem suas particularidades que podem ser vantajosas, dependendo do caso.*”

Uma comparação técnica entre as duas tecnologias pode ser vista na Tabela 2, elaborada pela Dedini Indústrias de Base SA, que fabrica e comercializa ternos de moendas e difusores.

Em seu estudo de campo, Piacente (2010) observou que as usinas com difusores visitadas tinham coeficiente de extração de sacarose em média 1,66 pontos percentuais maior que as usinas com ternos de moendas visitadas. Um dos entrevistados, em depoimento, estima que a opção pelo difusor em um investimento *greenfield* em usina resultaria em receita adicional de US\$ 660.000, justificando a escolha. A síntese dos resultados obtidos pelo autor em sua pesquisa de campo pode ser vista nas Tabelas 2 e 3.

As discordâncias acerca de qual tecnologia é mais vantajosa dão-se, principalmente, na ponderação dos diversos fatores relevantes. Existe, também, uma dúvida sobre se a maior eficiência teórica do difusor reflete-se em maior eficiência na prática da planta como um todo.

Assim como as outras atividades realizadas na usina, a atividade de extração do caldo também tem interfaces com outras atividades, contribuindo para definir a modularidade do sistema como um todo. Isso significa dizer que a escolha pelo uso de ternos de moendas ou difusor implica em escolhas em outras atividades. Piacente (2010) lista pontos de interação destacados por agentes do setor em suas pesquisas de campo.

O colchão de cana-de-açúcar desfibrada presente no difusor serve de filtro para impurezas particuladas não eliminadas na limpeza da cana-de-açúcar. Por isso o caldo extraído por um difusor contém menor quantidade destas impurezas quando com-

parado ao caldo extraído por ternos de moenda. Como essas impurezas precisam ser filtradas para não atrapalhar o processo de fermentação para a produção de etanol, o caldo extraído por difusores é melhor para a produção deste produto que o caldo extraído por ternos de moenda.

	<b>Difusor</b>	<b>Moenda</b>
<b>Preparo de cana</b>	Exige preparo 90+/ fibras longas são desejáveis/ cana picada dificulta (impurezas)	Atinge bons níveis de extração com preparo 85+/fibras longas não são tão importantes
<b>Caldo extraído</b>	Extrai mais componentes vegetais (ex.: fenólicos) que dificultam o tratamento/ extrai menos areia e impurezas	Inverso do difusor / tratamento facilitado / imprescindível filtro a vácuo ou similar
<b>Bagaço gerado</b>	Contem mais impurezas/ apresenta fibras mais longas / umidade mais alta	Menos impurezas e fibras mais curtas
<b>Evaporação necessária</b>	Geralmente é maior (brix do caldo menor)	Pode extrair até 80% de caldo absoluto (sem embebição)
<b>Extração de caldo</b>	Pode atingir 98,5% com 02 ternos de secagem	Difícilmente excede 97,5%
<b>Energia necessária</b>	3.500 kW instalados no difusor+secagem (13.000 TCD excluso preparo)/energia térmica é maior no próprio aparelho e na evaporação	6.000 kW equivalentes instalados (13.000 TCD excluso preparo)
<b>Bioeletricidade excedente</b>	Menor consumo de energia elétrica, e maior consumo de energia térmica de processo/ dependendo da configuração e do balanço energético da usina, semelhante à moenda	Menor consumo de energia térmica de processo/ dependendo da configuração e do balanço energético da usina, semelhante ao difusor
<b>Embebição</b>	Aceita taxas maiores (típica 300% fibra) / deve-se buscar o equilíbrio entre caldo extraído (brix), bagaço (umidade) e sistema de evaporação (equip/energia)	Normalmente limitada pela operação da moenda (típica 250% fibra)
<b>Custos operação com manutenção (O) e Manutenção (M)</b>	O: 80% M: 50-75% (mesmo nível de moagem, extração e umidade do bagaço)	O: 100% M:100% (mesmo nível de moagem, extração e umidade do bagaço)
<b>Flexibilidade de operação</b>	Fácil de operar (com instrumentação) / difícil para ampliações <sup>1</sup> / paradas prolongadas e paradas com partidas frequentes devem ser evitadas	Facilidade para ampliações / exige mais operadores e controle operacional / pode ser utilizado <i>by-pass</i> em caso de paradas
<b>Espaço x obras civis</b>	Espaço equivalente. Pode dispensar prédio e ponte rolante	Espaço equivalente. Maior necessidade de obras civis
<b>Capex– Investimento</b>	Equivalente à Moenda	Equivalente ao Difusor

<sup>1</sup> para o difusor convencional; o Difusor Modular Dedini –Bosch tem fácil ampliação.

**Tabela 2:** Comparativo técnico entre difusor e moenda.

Fonte: Dedini SA Indústrias de Base, 2011

Características	Sistema de difusão	Sistema de moenda
Especificação	15.000 tc/dia	90"x48" (12.000 – 16.800 tc/dia)
Capacidade processamento <sup>1</sup>	3.000.000 tc/safra	2.500.000 – 3.400.000 tc/safra
Consumo energia mecânica	140 cv/tc hora	180 cv/tc hora
Embebição	35% a 40% da cana	30% a 35% da cana
Extração de sacarose	até 98,5%	até 97,5%
Umidade final do bagaço	49% a 51%	46% a 50%
Índice de células abertas <sup>2</sup>	90% mínimo	80% a 85%

Notas: <sup>1</sup> Especificação nominal considerando uma safra com 200 dias de operação.

<sup>2</sup> Difusor exige um preparo de cana mais pesado comparado ao sistema de moenda.

**Tabela 3:** Síntese das características técnicas dos dois sistemas de extração da sacarose de cana-de-açúcar.

Fonte: PIACENTE (2010)

Sistema de difusão	Sistema de moendas
Rígido (expansão em módulos)	Maior flexibilidade para expansão
Sistema de tecnologia fechada	Permite pequenos incrementos e melhoria técnica
Manutenção simples	Manutenção especializada
Operação simples e completamente automatizada	Operação especializada e parcialmente automatizada
Intervenções técnicas (manutenção) apenas com o sistema parado	Intervenções técnicas (manutenção) com parte do sistema em operação

**Tabela 4** Síntese comparativa dos dois sistemas de extração da sacarose de cana-de-açúcar.

Fonte: PIACENTE (2010)

Por outro lado, a maior temperatura da água no difusor dissolve uma cera que envolve a casca da planta. Esta cera, que se dilui no caldo, não pode ser removida totalmente pelos métodos tradicionais de tratamento de caldo e clarificação. Conquanto isso não seja empecilho para a produção de açúcar bruto ou de baixa qualidade, compromete a produção do açúcar cristal, de maior qualidade e maior valor agregado. Para poder produzir este último produto com caldo extraído por um difusor, é necessário um sistema de clarificação do caldo com polímeros e descolorante.

Embora a maior parte das usinas no Brasil não se foque na produção de açúcar cristal de alta qualidade, Piacente (2010) cita visitas a usinas que têm ambos os sistemas de extração de caldo, priorizando o caldo extraído por difusor para a produção de etanol e o

caldo extraído por ternos de moenda para a produção de açúcar, e uma usina que utiliza caldo extraído por difusor para a produção de açúcar cristal de alta qualidade valendo-se de um sistema mais sofisticado de clarificação.

Do outro lado, as impurezas retidas pelo bagaço no difusor são queimadas junto com este nas caldeiras, produzindo maior volume de cinzas. O bagaço também chega às caldeiras com maior umidade, mesmo com o uso de ternos de moendas desaguador e secador. Além disso, as fibras da cana-de-açúcar são destruídas após as sucessivas passagens por ternos de moendas, mas permanecem intactas após a passagem por um difusor, resultando em bagaços com diferentes características.

Assim sendo, caso opte-se pela troca de ternos de moendas por difusores, o sistema de alimentação da caldeira deve ser modificado para receber bagaço de fibra mais longa, a caldeira deve ser adaptada para queimar o bagaço mais úmido e o sistema de limpeza e destinação das cinzas deve ser reformulado para lidar com o maior volume destas gerado.

## **1.5 Outras considerações a respeito da agroindústria canavieira**

Em diversos pontos ao longo do processo produtivo são gerados subprodutos e produtos. A etapa agrícola consome a torta de filtro, a vinhaça e as cinzas das caldeiras. Também é utilizada parte da palha para cobrir o canavial após a colheita. A etapa industrial consome eletricidade, vapor em alta pressão para energia mecânica e vapor em baixa pressão para energia térmica, dependendo da configuração da usina. A queima do bagaço alimenta caldeiras que geram o vapor em alta pressão. Este é utilizado para o acionamento mecânico de parte dos equipamentos da usina e de geradores de energia elétrica. Também são obtidas a energia térmica e o vapor em baixa pressão. Apesar do elevado consumo de energia necessário no processo, principalmente energia térmica, as usinas no Brasil, em sua maioria, têm potencial de gerar excedentes de energia elétrica passíveis de serem vendidos à rede.

Desta forma, o setor agroindustrial canavieiro no Brasil tem como produtos típicos vendidos pelas usinas o açúcar bruto, o açúcar cristal branco em suas diferentes qualida-

des, o etanol hidratado, o etanol anidro e a energia elétrica. Uma usina pode produzir um subconjunto desse total ou todos os produtos. A quantidade de bagaço queimada e a tecnologia utilizada determinam a quantidade de energia gerada e a operação da usina e a estrutura desta determinam o consumo. Assim sendo, a energia elétrica vendida atualmente é residual.

Conforme os preços que a usina espera receber pelo etanol e pelo açúcar, caso ela produza ambos, é definida a proporção da cana-de-açúcar a ser destinada para cada linha de produção, determinando a quantidade a ser produzida de cada um desses produtos. Essa flexibilidade individual das usinas reflete-se no setor como um todo, visto que as usinas especializadas somente em etanol ou em açúcar não representam a maioria da produção nacional. Em 2010, das 426 usinas instaladas no Brasil, 16 produziam somente açúcar, 159 produziam somente etanol e 251 eram capazes de produzir tanto açúcar quanto etanol (PEREIRA,C., 2012). Fica, assim, criado um vínculo entre os preços do açúcar e do etanol.

Enquanto o preço do açúcar é determinado no mercado internacional, o do etanol é, hoje, determinado em âmbito nacional<sup>5</sup>. Desde a popularização dos veículos flex, capazes de rodar com gasolina, etanol ou uma mistura destes, o preço do etanol passou a vincular-se de alguma forma ao preço da gasolina. Visto que para grande parte dos consumidores etanol e gasolina são substitutos perfeitos, a demanda é fortemente sensível à relação entre o preço destes. Embora esses vínculos não sejam de uma proporção fixa, flutuações dos preços do açúcar e da gasolina afetam as decisões de produção e, consequentemente, ambos os mercados de açúcar e combustíveis.

Fortes flutuações são observadas no preço do açúcar de safra a safra. Para reduzir o efeito destas sobre o mercado de combustíveis, considerado estratégico para o controle da inflação e para o desenvolvimento, o governo interfere ativamente na demanda por etanol. Por lei, a gasolina vendida no Brasil deve conter etanol anidro em uma proporção determinada pelo governo federal, situada entre 18% e 25%. Pelo controle da mistura, o governo pode influenciar a transmissão do preço de um mercado para o outro. O governo também determina o preço da gasolina na refinaria e pode, via Petrobrás, importar etanol.

---

<sup>5</sup> Com a adoção da mistura de etanol na gasolina por um número crescente de países, existe a perspectiva de surgir um comércio internacional de etanol relevante, de forma que o preço deste pode vir a ser determinado no mercado internacional

Finalmente, cabe abordar a dinâmica de evolução do setor. Como pode ser visto nas discussões acerca da produtividade dos canaviais (Seção 1.1) e acerca da modularidade do processo produtivo (Seção 1.2), diversas opções técnicas e tecnológicas estão disponíveis para os agentes do setor. Essas opções são resultado de esforços de pesquisa e desenvolvimento direcionados ao setor. Isso culmina, ao longo do tempo, em incrementos significativos de produtividade.

A Tabela 4 mostra diversas frentes de aumento da produtividade total do processo industrial no período de 1970 a 2011. Os esforços inovativos que levaram a esses aumentos eram, em um primeiro momento, coordenados pelo Estado. Em seguida, o processo de liberalização do setor transferiu aos mecanismos de mercado o papel de coordenador. Por fim, em um movimento mais recente, existe maior interação entre os atores de mercado e o Estado na definição das atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PEDRO, 2008).

	<b>Produto Dedini</b>	<b>Início do PROÁLCOOL</b>	<b>2011</b>
<b>Capacidade de moagem (TCD)-6x78"</b>	DH1 / MCD01	5.500	14.000
<b>Tempo de fermentação (h)</b>	CODISTIL Ferm. Bat / Cont.	24	4-6
<b>Teor alcoólico do vinho (°GL)</b>	CODISTIL Fermentação	7,5	10,0
<b>Rendimento extração (% aç. cana) 6 ternos</b>	DH1/ MCD01/ Difusor	93	97
<b>Rendimento fermentação (%)</b>	CODISTIL Ferm. Bat / Cont.	80	90
<b>Rendimento da destilação (%)</b>	Destiltech	98	99,5
<b>Rendimento total (Ibioetanol.hidr./ t cana)</b>	Tecnologia CODISTIL	66	86
<b>Consumo total de vapor (kg / t cana)</b>	Tecnologia CODISTIL	600	380
<b>Consumo de vapor - hidratado (kg / l)</b>	Destiltech	3,4	2,0
<b>Consumo de vapor - anidro (kg / l)</b>	Destiltech (+) Destilplus / Peneira Molecular / MEG	4,5	2,7
<b>Caldeira eficiência (% PCI)</b>		66	87
<b>Pressão (bar) / Temperatura (°C)</b>	AZ / AT / COGEMAX	21/300	85/530
<b>Bagaço excedente (%) - usina de bioetanol</b>	Tecnologia CODISTIL	Até 8	Até 78
<b>Biometano a partir de vinhaça (Nm<sup>3</sup> / l álç)</b>	METHAX	-	0,1
<b>Produção de vinhaça (l vinhaça / l bioetanol)</b>	BIOSTIL	13	0,8

**Tabela 5:** Evolução tecnológica da indústria canavieira.

Fonte: Fonseca (2012)

Essas mudanças nas formas de coordenação das atividades de pesquisa do setor refletem-se também nas formas de governança e estratégias tecnológicas. As diferentes reações dos atores às mudanças institucionais resultaram em grande variedade de estratégia e práticas de gestão entre as usinas. Apesar do avanço da produtividade média, observa-se uma grande heterogeneidade produtiva e de gestão entre elas, levando a grande heterogeneidade de produtividade (PEREIRA, C., 2012).

Neste cenário, diversas instituições privadas e públicas conformaram um sistema de pesquisa e desenvolvimento, como cita Pereira, C. (2012):

“o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Ridesa, USP, UNICAMP, UNESP, UFSCAR e EMBRAPA, além de empresas privadas, como Canavialis, na área de melhoramento genético, Grupo Dedini, na construção de plantas industriais” (pg. 34).

Além da evolução de produtividade, novas tecnologias prometem ampliar o grupo de produtos que podem ser incorporados no processo produtivo das usinas usando como matéria-prima a cana-de-açúcar, seja seu caldo, o bagaço ou o etanol. Principalmente pela utilização de organismos geneticamente modificados, novos processos estão sendo estudados para desenvolver produtos que vão desde outros combustíveis, como butanol, até plásticos, solventes e compostos mais complexos.

Apesar das incertezas quanto a quais dessas tecnologias serão economicamente viáveis e escaláveis às dimensões adequadas a uma usina e/ou ao mercado, existe a perspectiva de que o sucesso de ao menos parte delas leve ao desenvolvimento de uma indústria alcooolquímica.<sup>6</sup> Além disso, a possibilidade de produção de etanol de segunda geração, a partir do material lignocelulósico proveniente dos resíduos dos processos atuais pode trazer uma significativa ampliação do volume de etanol extraído e do aproveitamento da cana-de-açúcar.

---

<sup>6</sup> Para um estudo das perspectivas da alcooolquímica e o Brasil ver Bastos (2007).



## **CAPÍTULO 2: INOVAÇÃO E DIFUSÃO DE TECNOLOGIAS NA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA**

Este capítulo visa explorar a inovação e difusão de tecnologias na agroindústria canavieira, levando em consideração as características do ambiente onde estas têm lugar. Devido à heterogeneidade das atividades que compõem seu processo produtivo como um todo, a agroindústria canavieira precisa dominar diversas tecnologias relativas a diversas áreas do conhecimento. Para lograr isto, é necessário buscar conhecimento e tecnologia em um conjunto amplo de atores. Ao longo do tempo, mutam-se os atores, o ambiente institucional, as políticas de governo e as estratégias das usinas, escrevendo a história do contexto onde têm lugar a inovação e difusão de tecnologias aplicadas à agroindústria canavieira.

Pretende-se mostrar como este contexto é relevante para entender a escolha entre ternos de moenda e difusor. Em seguida, apresenta-se uma pequena revisão do histórico dos modelos de difusão. Por fim, é explicado porque a teoria evolucionária e, mais especificamente, os modelos baseados em agentes, são instrumentos adequados ao estudo proposto.

### **2.1 Tecnologia e conhecimento na agroindústria canavieira**

O processo produtivo da agroindústria canavieira como um todo demanda uma base ampla e heterogênea de competências, técnicas e tecnologias. O cultivo da cana-de-açúcar envolve diversas competências no campo da agronomia, como análises químico-físicas das propriedades do solo, técnicas de correção e adubação, sistemas de irrigação, técnicas de trato cultural. Quando são utilizadas técnicas de cultivo de precisão, todo o estudo do solo, o acompanhamento do campo e o controle dos insumos devem ser georreferenciados e planejados de acordo.

Além disso, são necessários maquinários de preparo, de plantio, de irrigação, de adubação, de colheita e de transporte. Isso implica em escolhas, seja na escolha de quais maquinários comprar ou quais maquinários utilizar, quando optar-se por utilizar maquinários de terceiros. Esses maquinários diferenciam-se na velocidade e eficiência de operação e na compactação resultante do solo.

Eles também demandam manutenção e controle. A gestão da operação e da logística destes maquinários é importante para garantir a eficiência da colheita. É importante que, ao mesmo tempo, haja cana-de-açúcar constantemente na entrada da usina, para que esta não pare de operar, que esta cana-de-açúcar tenha sido colhida há o menor tempo possível, para reduzir as perdas de sacarose pela espera, que todo o canavial seja colhido e de preferência o mais próximo possível do seu momento ideal de colheita, e que tudo isso seja feito com um controle adequado dos custos decorrentes.

De grande importância também é a utilização de uma variedade de cana-de-açúcar adequada às características do solo e do clima da região. Diversas variedades de cana-de-açúcar estão disponíveis e mais estão sendo pesquisadas. As variedades diferem em produtividade, teor de sacarose, necessidade de insumos, resistência e a controles de pragas e resistência a condições adversas.

Na usina, existem diversos equipamentos com parte móveis, incluindo os ternos de moendas e difusores, atividades que demandam o bombeamento de líquidos, como bombeamento de água e caldo, e a estrutura de caldeiras e de vapor. Assim sendo, existem diversas partes mecânicas, acionadores, bombas, geradores e válvulas, todos demandando manutenção adequada para operar.

A desfibração da cana-de-açúcar assim como a extração de caldo por ternos de moendas e a separação dos cristais do mel por centrifugação são processos físicos, baseados na ação de grandes forças sobre as estruturas da cana-de-açúcar e sobre o mel. A extração de caldo por difusores e a destilação do etanol hidratado para obter o etanol anidro são processos químicos. O cozimento do caldo para obtenção do mel é um processo físico-químico. Todos esses processos são executados em escala industrial, exigindo conhecimentos e sistemas de controle de processos adequados.

A fermentação também demanda capacidade de controle de processo, principalmente devido às escalas exigidas. Mas, por tratar-se de um processo biológico, são necessários conhecimentos diferentes dos utilizados nos outros processos. Para a fermentação são relevantes as enzimas e leveduras utilizadas e é necessário garantir as condições apropriadas para que

estas atuam eficientemente. Levando em consideração as escalas envolvidas e o volume de impurezas e as variações nos insumos recebidos, o controle deste processo não é trivial.

Essa amplitude de competências, técnicas e tecnologias necessárias para a operação eficiente de uma usina deriva de uma base diversificada de ramos de conhecimento. Como exemplos, química laboratorial embasa os testes de solo. Química de processos industriais embasa a operação dos difusores e dos processos de destilação. Mecânica desenha e mantém funcionando os maquinários. A logística viabiliza o processo de colheita. O controle de processos biológicos é necessário para a fermentação.

Mas disso também decorre que a inovação na agroindústria canavieira demanda uma base diversificada de conhecimento. Engenharia mecânica e mecatrônica são necessárias para melhorar os maquinários. Engenharia agrícola é necessária para alterar os métodos de cultivo e de gestão do campo. Microbiologia e genética são necessárias para o desenvolvimento de vertentes melhores de leveduras. O desenvolvimento de variedades de cana-de-açúcar demanda biotecnologia.

Enquanto parte dessa base de conhecimento está incorporada na usina, em geral estas não buscam absorver conhecimento em nível técnico suficiente para internalizar completamente o processo de inovação. Ao invés disso, a agroindústria canavieira vale-se de um conjunto de outras instituições com as quais ela interage para inovar, conformando uma cadeia inovativa setorial (PEDRO, 2008).

Pedro (2008) destaca que

“várias fontes de inovação e diferentes segmentos e trajetórias tecnológicas participam dos processos de capacitação e aquisição de tecnologia na agricultura e agroindústria. Nas empresas agroindustriais sucroalcooleiras, em específico, há um destaque para empresas fornecedoras de tecnologia e soluções; de equipamentos; de engenharia de sistemas (nacionais e internacionais); agências financeiras e governamentais de fomento a adoção de inovações; associações setoriais e câmaras empresariais locais; universidades e institutos públicos de pesquisa; centros públicos e privados de tecnologia (nacionais e internacionais) e clientes industriais. Na área agrícola, são fontes de inovação: universidades, institutos públicos, centros privados de pesquisa e empresas. Neste caso, as modalidades de inovação são produtos, serviços, sistemas e pacotes customizados, transferidos a partir de visitas, relatórios e reuniões técnicas, estudos de aplicação e adaptação, cursos e treinamentos, gestão dos sistemas de cultivo e de técnicas.” (pg 44).

Dada a amplitude de competências necessárias para inovar no processo produtivo da agroindústria canavieira como um todo, os agentes envolvidos na cadeia inovativa setorial focam-se em algumas competências, criando nichos complementares. Como pode ser visto na Tabela 5, o desenvolvimento de cultivares de cana-de-açúcar está concentrado em universidades públicas, institutos de pesquisa e cooperativas de usinas. Também tem importância em melhoramento genético a empresa Canavialis, inovadora em ter melhoramento de cana-de-açúcar como modelo de negócios de uma empresa privada.

Empresas/ano	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Total
<b>Copersucar</b>	5	11	1	2	3	7	-	-	-	-	29
<b>CTC-Centro de Tecnologia Canavieira</b>	-	-	-	-	-	-	-	5	7	-	12
<b>Universidade Federal de São Carlos</b>	-	6	-	-	4	-	-	-	-	4	14
<b>Universidade Federal de Alagoas</b>	-	-	-	4	-	2	1	-	-	-	7
<b>Universidade Federal de Viçosa</b>	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	2
<b>Instituto Agrônômico - IAC</b>	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4	6
<b>Agropav Agropecuária Ltda</b>	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
<b>Usina da Barra S/A Açúcar e Alcool</b>	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
<b>Total</b>	7	17	1	8	8	9	2	5	7	8	72

**Tabela 6:** Certificados de Proteção de Cultivares de Cana-de-Açúcar Expedidos pelo Serviço Nacional de Proteção de Cultivares/Brasil, (jan/1998 a Dez/2007).

Fonte: PEDRO (2008), p. 63.

Por outro lado, demandando competências diferentes, o desenvolvimento e aprimoramento dos equipamentos, maquinários e sistemas de automação estão concentrados nos fornecedores de equipamentos e no Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (PEREIRA, C., 2012, PEDRO, 2008).

A difusão com sucesso de uma tecnologia ou técnica na agroindústria canavieira depende não somente das características técnico-econômicas desta, pois também será afetada pela relação entre as usinas e o outro ou os outros agentes envolvidos no desenvolvimento dessa tecnologia ou técnica. Conforme notado por Pedro (2008), no início de sua operação, a

RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro) precisou estabelecer um modelo de operação diferente do adotado pelo CTC pois nesse era mais forte a relação de confiança e complementaridade de ativos com os clientes-parceiros.

No caso específico dos equipamentos produtivos da usina, incluindo os ternos de moenda e os difusores, as inovações radicais e as inovações que redefinem características dos equipamentos são feitas majoritariamente pelos fornecedores. As usinas concentram-se em ajustes nas condições de operação destes equipamentos. Ou seja, as inovações nesse campo são principalmente dominadas por fornecedores.

O domínio dos fornecedores e o próprio fato de tratarem-se de bens de capital implica que a implantação destas inovações depende de uma decisão de investimento por parte da usina, que opta por comprar ou não comprar um bem de capital e que escolhe entre um ou outro bem de capital. Estando a inovação incorporada no bem de capital, essa decisão por investir define o processo de difusão.

Assim sendo, quaisquer fatores que influam na tomada de decisão de investimento passam a influir na difusão das tecnologias incorporadas nos bens de capital. São importantes fatores relacionados à tecnologia em questão, como suas características técnico-econômicas e seu preço de venda. Também são importantes fatores relacionados à relação entre a usina e o fornecedor do bem de capital que incorpora a tecnologia, incluindo relação de confiança e a disponibilidade de informação técnica acerca do equipamento a ser comprado.

Mas um conjunto importante de fatores é relacionado ao contexto onde será implantado o bem de capital que incorpora esta tecnologia. Conforme descrito no Capítulo 1, o processo produtivo da agroindústria canavieira é modular, com interfaces entre as diferentes atividades executadas. Assim sendo, uma mudança em uma atividade, pela introdução de uma inovação, afeta a execução de outras atividades. Esse efeito pode dar-se pela mudança da eficiência em outras atividades ou pela necessidade de investimentos extras em adaptação destas ou em aprendizado.

Como exemplo disso, um aumento muito grande na capacidade de extração de caldo exigirá investimentos no aumento da capacidade dos fermentadores e, em seguida, na capacidade da destilaria, ambas as atividades cujas capacidades não podem ser facilmente

aumentadas de forma marginal. Em outro caso, a troca de ternos de moendas por difusores exige adaptações nas caldeiras para que estas consigam lidar com maior volume de cinzas.

A modularidade do processo produtivo tem impacto assimétrico na implantação de inovações em diferentes atividades produtivas. Uma atividade ter interfaces com poucas outras atividades, como acontece com a destilação do etanol hidratado, significa que inovações nesta atividade terão pouco impacto em outras atividades. Uma atividade ter interfaces com muitas outras atividades, como acontece com o sistema energético da usina, significa que inovações nesta atividade terão impacto em muitas outras atividades.

Disso decorre que implantar uma inovação em uma atividade com poucas interfaces tende a ser menos custoso e menos incerto. Menos adaptações em outras atividades serão necessárias, de forma que o custo será menor e será mais fácil antever o custo total e o impacto total da implantação da inovação em questão. Já implantar uma inovação em uma atividade com muitas interfaces exigirá adaptações em várias atividades, algumas das quais podem estar fora da área de competência do desenvolvedor desta inovação. O maior volume de adaptações implica não só em maior custo, mas também em maior dificuldade de antever precisamente os custos totais e os benefícios finais, incluindo os impactos em todas as atividades produtivas da usina, da implantação da inovação.

Assim sendo, um grande número de fatores de diversas naturezas afetam as decisões que, em última instância, determinam a inovação e a difusão de inovações. Devido à modularidade do processo produtivo, a inovação e a adoção de inovações exigem alterações em atividades do processo outras que não somente aquela a qual a inovação imediatamente aplica-se, e as competências necessárias a tratar essas alterações podem estar espalhadas em um conjunto de atores. Isso configura um ambiente bastante complexo de tomada de decisão.

Decorre da complexidade descrita dos processos de inovação e difusão de inovação na agroindústria canavieira que um modelo elaborado com o propósito de representar esses processos precisa ser capaz de refletir de alguma forma as interações e condições que geram essa complexidade. Faz-se, então, necessário analisar as formas alternativas de modelagem à luz das características da realidade que se pretende representar.

## 2.2 Histórico dos modelos de difusão

Motivada pela possibilidade de apropriar parte do lucro do inovador sem a necessidade de compartilhar de seus custos, a imitação ou ao menos a tentativa de imitar é comumente observada no processo de concorrência capitalista. O acúmulo de imitações bem sucedidas ao longo do tempo faz com que uma inovação específica progressivamente deixe de ser algo singular a uma empresa pioneira ou a um grupo restrito de empresas e passe a ser uma prática comum do setor em questão. Essa progressiva adoção de uma inovação caracteriza um processo de difusão da inovação (FURTADO; PELAEZ; SZMRECSÁNYI, 2006).

Conforme Richerson; Vila; Mulder (1996), enquanto a inovação em si é importante por expandir os limites do conjunto das possibilidades concebidas, a difusão é, em geral, o processo responsável por potencializar os impactos da inovação na economia.

Empiricamente observa-se que o processo de difusão tipicamente resulta em uma curva sigmóide do número de adotantes ao longo do tempo, usualmente aproximada pela curva logística. A complexidade do estudo da difusão evidencia-se, como explica Dosi (1991), pela questão da progressão no tempo do processo. É preciso explicar porque a difusão não é instantânea, com todos os possíveis beneficiários adotando a inovação imediatamente assim que esta está disponível. Também é necessário explicar que forças mantêm o processo, porque este não se esgota repentinamente após certo ponto no tempo.

As primeiras tentativas de modelar o comportamento do processo econômico de difusão da inovação partiram da similaridade estatística observada entre a difusão e a propagação de uma epidemia. Considerando que cada indivíduo contaminado é um vetor da doença tem-se que a interação entre um indivíduo contaminado e seus pares sadios próximos conforma uma fronteira de contágio potencial e, assim, uma taxa esperada de contágio.

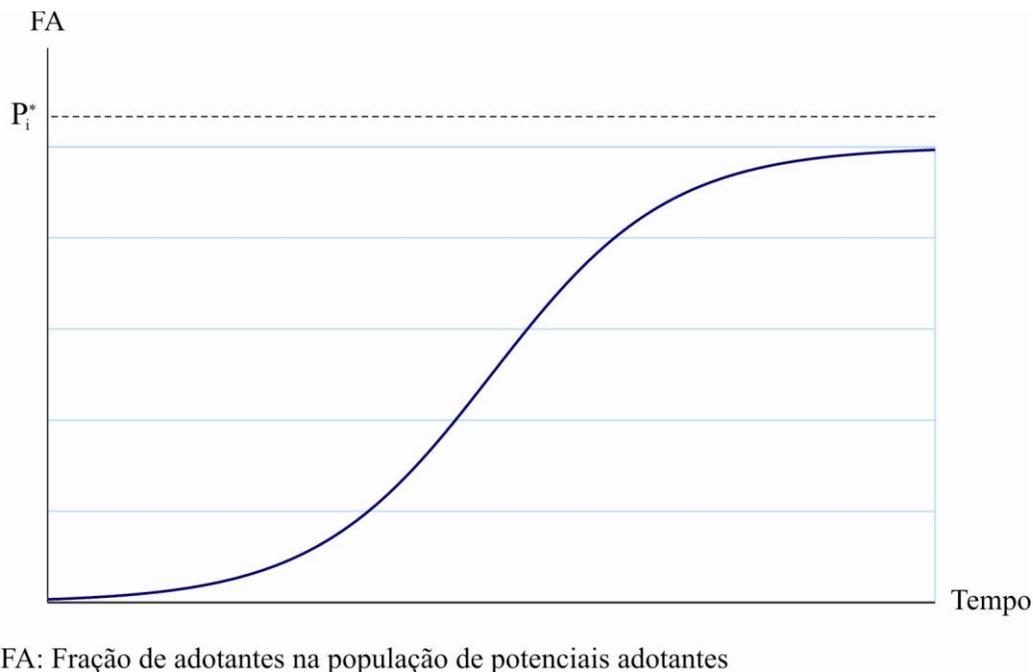
Em um primeiro momento, conforme o sistema passa de um único indivíduo contaminado para um pequeno grupo de indivíduos contaminados e para grupos progressivamente maiores de indivíduos contaminados, a fronteira de contágio expande-se e a velocidade de propagação da doença cresce. A partir do ponto em que a população contaminada passa a ser relevante na população total, as interações dos indivíduos doentes passam a ser

progressivamente mais com outros indivíduos doentes e menos com indivíduos saudáveis. Dessa forma, a velocidade de contágio cai e o sistema tende à saturação. Esse comportamento geral do processo - partindo de um único indivíduo, propagação acelerada no início, decrescente a partir de certo ponto e com tendência de saturação no fim - mostrou-se semelhante ao comportamento do processo de difusão da adoção de novas variedades de milho híbrido nos Estados Unidos estudado por Griliches (DIXON,1980).

Partindo desta constatação, Griliches propôs modelar a difusão da inovação com o uso da curva logística, que embasa os modelos epidemiológicos. A curva logística pode ser definida pela função

$$P_{it} = \frac{P_i^*}{1 + e^{-t}} \quad (1)$$

Como pode ser observado na Figura 11, a função logística resulta em uma curva em forma (S), reproduzindo a dinâmica da difusão da inovação.



**Figura 11:** Curva de uma função logística representando um processo de difusão.

Fonte: Elaboração própria.

Nos modelos logísticos de difusão da inovação iniciais,  $P_i^*$  é a população de potenciais adotantes da inovação quando o tempo tende ao infinito, todos os imitadores potenciais, e  $P_{it}$  é a fração desta população que já adotou a inovação, que já fez com sucesso a imitação. O expoente  $t$  no denominador da função é substituído por  $\eta_i + \Phi_{it}$  sendo que  $\eta_i$  define a população adotante inicial e  $\Phi_{it}$  representa a taxa de adoção no momento  $t$ , passando a equação a ser:

$$P_{it} = \frac{P_i^*}{1 + \exp - (\eta_i + \Phi_{it})} \quad (2)$$

Como destacado por Furtado et al. (2006) o modelo proposto por Griliches não possui embasamento teórico. A escolha por um modelo baseado na curva logística está apenas lastreada na proximidade entre os resultados empíricos e do modelo. Esta fundamentação, ainda segundo Furtado; Pelaez; Szmrecsányi (2006), caberia a Mansfield (1961). Observando processos de difusão de inovação em indústrias, Mansfield elencou como principais fatores definidores da velocidade de adoção em um momento a fração de adotantes neste momento, o incremento de rentabilidade que a inovação representa e o peso do investimento necessário para a adoção no total de ativos das empresas.

Essas considerações estão alinhadas com uma visão mais próxima da empresa que decide pela imitação, retirando o foco da observação das propriedades estatísticas do processo de difusão. A decisão por adotar está envolta em incerteza e risco. Uma maior fração de empresas já adotantes pode ser um indicador de maior experiência acumulada sobre a inovação em questão e de maior disponibilidade de informação relevante, além de sinalizar às empresas que não adotaram que a inovação é viável e possivelmente caminha para tornar-se um novo paradigma. Similarmente, a propensão de uma empresa por buscar imitar uma inovação depende positivamente da perspectiva de incremento de rentabilidade que esta representa e negativamente do custo de adoção desta em relação à capacidade da empresa de absorver estes custos.

Como destaca Furtado Pelaez; Szmrecsányi (2006), os modelos logísticos - tanto na vertente de Griliches quanto de Mansfield - têm uma representação muito estática da

tecnologia e um comportamento muito mecânico. Durante todo o processo de difusão a tecnologia não se altera, não recebe melhorias ou *feedback* dos usuários. Como consequência, a taxa de retorno é constante e o risco altera-se somente pela redução das assimetrias de informação. Em linha com o mecanicismo dos modelos logísticos, o número potencial de adotantes é fixo e previamente conhecido e estes conformam um grupo homogêneo.

Os modelos Probit, que se seguem, permitem não só a heterogeneidade dos agentes como também caracterizam essa heterogeneidade em um conjunto de variáveis relevantes ao processo de difusão. Neste sentido, esses modelos mostram-se mais desenvolvidos que os modelos logísticos.

Nos modelos pioneiros de David (1969) são considerados o tamanho da empresa adotante, a relação entre o custo de adoção e o custo de salários e a produtividade da nova tecnologia. O tamanho da empresa, o custo de salário e a produtividade da nova tecnologia são variáveis do modelo, resultando em um comportamento menos descritivo e mais bem elaborado que os modelos logísticos. Outros avanços relevantes foram incorporados a modelos Probit. Davies (1979) incorporou a incerteza no cálculo do retorno do investimento na nova tecnologia, que se reduz conforme existe um processo de aprendizagem. Seu modelo ponderava o tamanho da firma, seu aprendizado acumulado, o *learn-by-doing* dos fornecedores e outros fatores - agrupados em uma variável - para determinar o processo de difusão.

Finalmente, no modelo de Stoneman (1983), o aprendizado reduz o risco de adoção da nova tecnologia, representado pela redução da variância do retorno da nova tecnologia. Como novidade, ele traz o uso, por parte de cada empresa, de ambas as tecnologias ao mesmo tempo, caracterizando um processo de transição de uma tecnologia para a outra. Cabe a cada empresa, em cada momento do tempo, decidir que combinação das tecnologias ela pretende compor. Dessas decisões resulta o processo de difusão como um todo.

Metcalfe (1981) apresenta um modelo mais sofisticado, não mais Probit ou logístico. A inovação é internalizada ao modelo e tem motivação econômica, assim como sua difusão. Para representar isso, Metcalfe tem em seu modelo o fornecedor e o consumidor - adotante - da inovação. O fornecedor aumenta sua capacidade de produção da inovação em

função da taxa de lucro que ele percebe. Esta depende do preço final da inovação, da tecnologia utilizada na sua produção e do custo dos insumos. O total de adotantes cresce em função da proporção de adotantes e do mercado potencial total, que, por sua vez, responde ao preço da inovação.

Na dinâmica do modelo, o preço da inovação tende a cair, expandindo o mercado potencial e aumentando a velocidade de difusão. Conforme se intensifica a competição entre os fornecedores, cai o preço da inovação e aumenta a produção, aumentando o consumo de insumos e, portanto, o preço destes. Aliado com o crescimento do custo de insumos, a queda do preço reduz a margem de lucro, representando o esgotamento gradual do lucro extraordinário do inovador conforme aumenta o número de imitadores no lado do fornecedor da inovação. Desta forma, o modelo em sua dinâmica representa um duplo processo de difusão, a difusão da capacidade de produção de uma inovação entre os fornecedores e a difusão dessa inovação entre seus consumidores. O modelo representa ainda a interação entre esses dois processos paralelos de difusão.

Nas análises de Metcalfe, o ambiente de difusão não é visto como estático e sim como dinâmico, abrindo espaço para a influência de *learn-by-doing*, *feedbacks*, inovações complementares, economias de escala e crescimento econômico.

Apesar da evolução observada, esses modelos não são adequados para estudar a relação entre ternos de moendas e difusores. Como explicado anteriormente, a difusão de tecnologias na agroindústria canavieira tem lugar em um contexto específico. Os modelos apresentados não permitem a incorporação das peculiaridades do contexto institucional e técnico no qual a difusão de uma tecnologia específica está inserida.

Além disso, nos modelos apresentados a decisão por adotar ou não uma tecnologia é representada somente de forma implícita. É a partir de decisões de adoção que são definidos os comportamentos das variáveis estudadas, mas somente essas variáveis são incorporadas aos modelos. Dessa forma, esses modelos são limitados em representar as características da decisão de adoção. Tendo em vista, conforme previamente apresentado, a complexidade da decisão de investimento, que determina a adoção de tecnologias, esses modelos seriam representações limitadas da difusão na agroindústria canavieira.

## 2.3 Modelos evolucionários de difusão

A principal característica dos modelos evolucionários de difusão é o arcabouço teórico que compartilham. A corrente evolucionária fortalece-se em um estudo teórico da inovação e da difusão, partindo de bases estabelecidas por Schumpeter. Os pontos teóricos de maior destaque desses modelos em comparação com os modelos anteriores encaixam-se em três categorias, segundo Furtado Pelaez; Szmrecsányi (2006), a extinção das barreiras estanques entre os conceitos, o entendimento de que a inovação e a difusão dão-se em um contexto econômico, social e histórico e a relevância dos motivadores econômicos da inovação e da imitação na unidade inovadora e imitadora.

A separação hermética entre invenção, inovação e difusão

“(…) is a rough and 'heroic' conceptual distinction, which can hardly be found in practice, since the empirical processes are usually never quite like this. The invention is often introduced from the start as an innovation by economically-minded research establishments. Diffusion entails further innovation on the part of both developers and users. All three activities are often associated with changes in the characteristics of, and incentives for, potential innovators/adopters” (DOSI 1991, p.181)

Enquanto a separação conceitual entre inovação e difusão não foi extinta, uma reinterpretação da forma como elas interagem levou à redefinição de ambas. Diferentemente dos economistas ortodoxos, os evolucionários entendem a inovação como parte relevante do sistema econômico e, portanto, como algo que não deve ser tido como exógeno ao modelo. Como definido por Freeman et al (1988), as inovações radicais foram incorporadas, tidas como eventos descontínuos que introduzem produtos ou atividades novas. Seu processo de difusão, visto pela proporção de adotantes, assemelha-se às curvas dos modelos logísticos. Também foram incorporadas as inovações incrementais, que regularmente melhoram processos e produtos existentes, inclusive dos criados pelas inovações radicais.

Entretanto, como destaca Rosenberg; Labarta (1979), existe uma forte interação entre as inovações radicais, as inovações incrementais e o processo de difusão destas. Conforme uma inovação radical difunde-se, novos usuários aprendem a usá-la, descobrem novos usos para ela, desenvolvem modificações e aprimoramentos. Esse conjunto de inovações resultantes do denominado *learn-by-using*, junto com as inovações decorrentes do

*learn-by-doing*, têm impacto direto no processo de difusão, definindo-o. Alteram-se os custos de produção da nova tecnologia, a população de usuários potencial, a produtividade inerente da nova tecnologia. Desta forma, o processo de difusão passa a ser indissociável das inovações incrementais.

Também focado na aprendizagem, Silverberg (1991) estuda como diferenciais na aprendizagem do inovador e dos imitadores definem a apropriabilidade de uma inovação. Quanto mais fácil for o aprendizado do inovador em relação ao do imitador, maior a apropriabilidade de uma inovação. Conforme Dosi (1991), esta tem papel duplo no processo de difusão. Enquanto a apropriabilidade está correlacionada com maiores lucros diferenciais e, portanto, com maior incentivo à imitação e difusão, ela também configura uma barreira à entrada.

Outro nível de interação entre inovação e difusão dá-se no ambiente de difusão. Muitas vezes uma inovação depende de inovações complementares para atingir seu potencial. Podem ser necessárias mudanças de infraestrutura, de processos produtivos, de marcos regulatório, de padrões de consumo, de tecnologias empregadas na produção. A inovação radical não incentiva somente inovações complementares, mas também inovações e melhorias na tecnologia antiga que ela propõe-se substituir. Dessas inovações pode resultar uma sobrevida da tecnologia antiga, levando a um período longo de convivência de duas tecnologias concorrentes.

Desta forma, o foco do estudo não é sobre a difusão de uma inovação estanque como nos modelos logísticos ou Probit, mas sim sobre as sucessivas inovações que interagem para definir seus processos de difusão e, assim, afetar a dinâmica de competição e o sucesso ou fracasso de firmas e indústrias.

Inovação e difusão também interagem com o contexto econômico, social e histórico em que acontecem. Conforme destacado por Freeman; Clark e Sote (1992), o esforço imitativo e os investimentos complementares envolvidos no processo de difusão geram demanda adicional e induzem uma nova onda de inovações aplicadas a processos, resultando em efeitos dinâmicos sobre a economia. Disso resulta que as inovações podem ter lugar em aglomerados de inovações. Quando essa onda de inovações implicar em mudanças mui-

to pervasivas e significativas, pode-se ter uma mudança do paradigma técnico-econômico no qual opera a economia.

Uma inovação pode, também, estimular uma mudança do contexto institucional. Fatores como leis, cultura, tradições e percepções podem ser alterados frente às possibilidades abertas por uma inovação, ampliando, por sua vez, o espaço para outras inovações. Quando essas mudanças não são possíveis, o contexto institucional pode mostrar-se como uma barreira à inovação ou à sua difusão.

De forma mais geral, como destacado por Dosi (1991), existe um reconhecimento de que o contexto em que se insere a inovação e a história antes dela são relevantes, afetando a inovação e seu processo de adoção e difusão. Além do passado tecnológico sobre o qual se constrói a inovação, infraestrutura, complementaridades, conhecimentos específicos adquiridos previamente e durante os processos são relevantes. Esse entendimento reflete-se no conceito de *path-dependency*.

Finalmente, a inovação e a imitação são entendidas como motivadas por fatores econômicos. Isso implica não só na necessidade de ter internalizadas ambas, inovação e difusão, como também implica na necessidade de compreender o mecanismo pelo qual os estímulos econômicos à inovação e à imitação levam, em última instância, à difusão da inovação e os mecanismos pelos quais a inovação e a difusão afetam as condições econômicas e, conseqüentemente, os estímulos econômicos.

Para isso, os modelos incorporam as unidades de decisão que, afetadas pelos estímulos, decidem inovar ou imitar. Modelos como Nelson e Winter (1982) ressaltam a interação entre o micro e o macro, entre a unidade tomadora de decisão e seus motivos econômicos e o processo de difusão e o ambiente econômico. Objetivando evidenciar a riqueza desta interação, esses modelos são baseados em agente. Há, no modelo, uma representação dos agentes relevantes com seus motivadores econômicos, suas rotinas de comportamento e sua heterogeneidade. Os resultados macro obtidos do modelo, incluindo as variáveis responsáveis por definir os estímulos aos agentes representados, decorrem destas características dos agentes representados e de suas interações.

Dessa forma, não é necessário definir as propriedades das variáveis macro. Parte-se da teoria para definir os agentes e variáveis relevantes e para entender as relações entre eles, e de observações de seus comportamentos e rotinas para definir a estrutura e as partes do modelo. Do modelo resultam as variáveis macro e seus comportamentos, deixando espaço para a atuação de *feedbacks* e para o surgimento de propriedades emergentes e de resultados inesperados.

A incorporação explícita dos agentes no modelo permite diferenciá-los em parâmetros relevantes para a difusão. O fato de existir diferentes tamanhos de unidades adotantes da inovação permite, por exemplo, verificar o efeito de um elevado custo de adoção ou de uma escala mínima à qual a adoção é economicamente viável. Parâmetros individuais permitem a heterogeneidade dos agentes em relação à capacidade de aprendizado, conjunto de conhecimentos ou acesso a tecnologias. Fatores gerais, como o preço de determinada inovação ou a variação deste, podem ter efeitos diversos sobre cada unidade de um conjunto heterogêneo.

Também é possível incorporar o chamado *vintage effect*' (Salter, 1969 apud Dosi, 1991). Considerando que a tecnologia em processo de difusão está sempre em constante aprimoramento implica que os ativos de qualquer agente estão em constante processo de obsolescência. Nesse sentido, a escolha por adotar a nova tecnologia é também uma escolha pela substituição dos ativos atuais que precisa levar em consideração o grau de obsolescência destes frente às opções disponíveis. Agentes heterogêneos têm conjuntos diferentes de ativos incorporados em momentos diferentes do tempo e, portanto, com graus diferentes de obsolescência.

Finalmente a escolha por representar os agentes e respectivos comportamentos permite a representação no modelo de diferentes formas de racionalidade. Enquanto é tecnicamente possível incorporar agentes racionais maximizadores, também é possível incorporar comportamentos baseados em rotinas, limitados por *bounded rationality* ou diversas formas de assimetria de informação. Como ressaltado por Dosi (1991), a temporalidade do processo de difusão é uma evidência da existência de que este tem uma natureza de desequilíbrio e incerteza. Em um contexto de equilíbrio, seria de se esperar que qualquer firma

para a qual a adoção de determinada tecnologia fosse rentável a adotasse imediatamente, configurando uma curva de difusão diferente da sigmóide observada. O desenho do modelo em torno de agentes heterogêneos com comportamento definido localmente permite a incorporação de diversas formas de racionalidade, permitindo, inclusive, testá-las e compará-las.

O arcabouço teórico que embasa os modelos evolucionários mostra-se muito mais adequado às características da inovação e da difusão de inovação na agroindústria canavieira. A ênfase dada ao contexto no qual esses processos ocorrem permite levar em consideração o ambiente institucional da cadeia inovativa setorial da agroindústria canavieira. A estrutura flexível dos modelos permite incorporar a interação entre os diversos agentes envolvidos.

Os modelos baseados em agentes incorporam explicitamente o agente tomador de decisão, deixando as variáveis em nível macro meramente agregativas. Dessa forma, é possível representar no modelo a tomada de decisão por investir ou não investir e a escolha de em qual tecnologia investir, e ter a difusão ou não difusão de uma tecnologia como resultado de diversas decisões de agentes heterogêneos. Na medida em que as equações de decisão refletirem a modularidade do processo produtivo e a inserção da tecnologia objeto da decisão neste sistema, este fator estará incorporado ao modelo.

Assim sendo, o embasamento teórico e a estrutura dos modelos evolucionários baseados em agentes tornam esses modelos mais adequados para representar as características do processo de difusão de inovação na agroindústria canavieira conforme descrito neste capítulo do que os outros modelos aqui avaliados.

## **2.4 Conclusão**

A inovação e a difusão de inovações na agroindústria canavieira é marcada pelas características técnicas e institucionais desse setor. Conforme Pereira, C., (2012),

“observa-se a preponderância das inovações incrementais nesse setor, em que grande parte das usinas prefere ficar em uma situação defensiva, uma vez que a adoção de inovações e mudança tecnológica configura um ambiente permeado de incertezas” (p. 35).

O que a análise da inovação na agroindústria canavieira mostra é que essa incerteza decorre principalmente da complexidade do ambiente em que se dá a decisão por inovar ou adotar a inovação. Para inovar ou adotar uma inovação é necessária a interação entre diversos atores com especializações diferentes. Devido à modularidade do processo produtivo em questão, essa adoção de uma inovação pode impactar outros processos, afetando a produtividade da usina como um todo e/ou o custo de implantação da inovação.

Nesse sistema complexo, a superioridade técnico-econômica de uma tecnologia em ambientes controlados não se reflete, necessariamente, em superioridade prática em uma usina operacional. Ao ponderar todos os fatores discutidos nas decisões de investimento, as usinas determinam um processo de difusão de tecnologias na agroindústria canavieira complexo, que depende da disponibilidade de informação, das características técnico-econômicas, de conhecimento, mas também da interação de atores diversos e da estratégia da usina.

A relevância das decisões individuais de agentes heterogêneos que se inserem em um contexto institucional no qual interagem com outros agentes e que ponderam fatores locais complexos, como modularidade, e fatores macro dependentes das decisões de outros agentes, destaca os modelos evolucionários baseados em agentes como forma de representação desta realidade. Este tipo de modelo permite incorporar os agentes e suas decisões e ter o sistema complexo resultante da interação dos agentes como propriedades emergentes.

Esse capítulo contribui para o debate da questão da difusão de tecnologias na agroindústria canavieira brasileira ao identificar simultaneamente as características do contexto institucional que define a cadeia inovativa setorial e como a estrutura do processo produtivo da usina, em especial sua modularidade, afeta a difusão de tecnologias. Dessa forma, é possível construir um cenário mais amplo do ambiente onde ocorre a difusão. A partir deste cenário e de uma revisão dos modelos de difusão, é também possível identificar os modelos evolucionários baseados em agentes como a formatação mais adequada para representar o processo de difusão em questão.



## **CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DO MODELO**

Conforme visto no capítulo anterior, existem diversos fatores que afetam o sucesso e a velocidade da difusão de novas tecnologias na agroindústria canavieira. Este trabalho busca contribuir ao estudo desse processo de difusão aprofundando no caso da difusão da tecnologia de extração de sacarose.

É tomado como base o trabalho de Piacente (2010), que faz, a partir de uma revisão de outros estudos e de pesquisa de campo, uma análise descritiva dos fatores relevantes para a difusão da tecnologia de extração de sacarose. Essa fonte permite elencar os fatores relevantes e definir hipóteses sobre o comportamento dos tomadores de decisão. Esse conhecimento é utilizado para balizar a elaboração de um modelo de simulação.

Na medida em que o modelo refletir o conhecimento em questão, a análise dos resultados obtidos com simulações rodadas no modelo desenvolvido permite avaliar, de forma mais objetiva, a interpretação dada ao fenômeno estudado. Dessa forma, o modelo configura uma ferramenta de avaliação e possivelmente de expansão do conhecimento.

Este capítulo foi estruturado de maneira a apresentar, de forma didática, o modelo desenvolvido. Para tanto, apresenta-se subdividido da seguinte forma: a seção 3.1 traz considerações sobre a metodologia a ser utilizada, de acordo com o objeto de estudo e o objetivo de construção do modelo. Na seção 3.2 são apresentadas as questões que se pretende incorporar ao modelo, detalhando a descrição e interpretação que se pretende representar do objeto de estudo. A seção 3.3 descreve o modelo desenvolvido. Por meio de um exemplo prático, apresenta todo o roteiro de seu funcionamento. Para facilitar a sua compreensão, a explicação norteia-se pela sequência de cálculo do modelo e não pela sua estrutura hierárquica. Finalmente, na seção 3.4 são destacados os paralelos entre o modelo apresentado na seção 3.3 e as questões elencadas na seção 3.2 e são apresentadas algumas considerações finais.

### 3.1 Considerações prévias

O processo de difusão é resultado do comportamento e da interação dos decisores. Um modelo de simulação baseado em agentes, por sua própria formatação, é capaz de reproduzir esses fatores de forma natural (DWECK, 2010). Conforme o descrito por Yoon e Lee (2009), um modelo de simulação baseado em agentes é caracterizado por um conjunto de agentes com regras de comportamento e micro-estados, inseridos em estruturas de interação. O ambiente é completado por parâmetros de nível micro e macro e por variáveis macro resultantes da agregação de variáveis micro contidas nos micro-estados. As hipóteses acerca do comportamento dos decisores balizam a definição do comportamento dos agentes do modelo. O ambiente onde essa decisão é tomada e as interações dos decisores formatam as estruturas de interação do modelo e sua parametrização. As variáveis macro agregadas devem servir para avaliar o processo de difusão.

A estrutura do modelo a ser desenvolvido e a forma como ele será utilizado dependem do propósito do desenvolvimento do mesmo. O objetivo neste trabalho é condensar o conhecimento já adquirido sobre a difusão de tecnologia de extração de sacarose na agroindústria canavieira de forma que permita avaliá-lo. Assim sendo, o trabalho proposto aproxima-se da metodologia de análise qualitativa de um modelo de simulação, como explicada em Valente (1999, 2002).

Segundo Valente (1999, 2002), mais importante que representar a realidade, um modelo deve refletir o conhecimento detido sobre o fenômeno que se estuda. O resultado mais importante a ser obtido do modelo é o entendimento de como interagem as diversas relações causais ali representadas, ou seja, o modelo cria a possibilidade de observar e analisar as diversas frações de conhecimento acumulado interagindo. Conforme Dweck “Neste tipo de análise, o grande objetivo da utilização de simulação é analisar a dinâmica que decorre das suposições inseridas no modelo” (2010, p. 17).

Para a construção do modelo foi utilizada a abordagem dos modelos *History-friendly*, que é uma categoria particular dos modelos baseados em agentes. “Os MHF [modelos *History-friendly*] buscam verificar se mecanismos particulares, incluídos nos

modelos, são capazes de replicar – e explicar – características selecionadas da história” (PEREIRA, M., 2012, pg. 190).

A abordagem dos modelos *History-friendly* busca utilizar-se da observação da realidade para reduzir a generalidade dos modelos baseados em agentes e compreender seus resultados. Como descrito por Pereira, M. (2012), os modelos *History-friendly* são focados em indústrias específicas, uma vez que partem do diagnóstico empírico de que as características relevantes dos complexos sistemas de inovação são específicas para cada indústria.

Utilizando-se de informações empíricas da indústria em questão constrói-se o modelo e definem-se os valores de suas variáveis. Os resultados extraídos das simulações realizadas são comparados com algum fato estilizado da realidade que se pretende estudar, de forma a validar o modelo construído.

Tendo em vista o propósito da elaboração do modelo e a metodologia escolhida, a construção deste tem de ser feita de forma a espelhar o conhecimento que se visa testar. Primeiro, o conhecimento é descrito sob a forma de hipóteses que elencam e descrevem os fatores relevantes à difusão de novas tecnologias na agroindústria canavieira. Em seguida, essas hipóteses materializam-se de forma não ambígua na estrutura e nas equações do modelo.

A análise das simulações clarificará qual a relevância e contribuição de cada fator. Quaisquer que sejam os resultados produzidos pelo modelo, a possibilidade de explorar em detalhes o processo pelo qual estes foram gerados representa uma ferramenta de expansão do conhecimento (VALENTE, 2002). Os processos reais são dificilmente observáveis e frequentemente ignorados em estudos que não envolvam simulação, apesar de sua importância em qualquer contexto *path-dependent*.

### **3.2 Bases para elaboração do modelo**

Como exposto na seção anterior, o objetivo do modelo é avaliar o conhecimento existente a respeito da difusão da tecnologia de extração da sacarose, que se materializa no bem de capital comprado pela usina. Assim sendo, o modelo pode ser divi-

dido em duas partes com enfoques diferentes. Uma parte visa replicar o comportamento do agente relevante, responsável pela decisão do investimento que, em última instância, determina o processo de difusão. Outra parte busca reproduzir o contexto no qual essa decisão é tomada, representando todo o universo de fatores considerados relevantes à decisão.

Portanto, o primeiro passo para a definição do modelo é levantar qual é o comportamento dos agentes tomadores de decisão, incluindo rotinas de decisão e parâmetros utilizados nestas. Em seu trabalho, Piacente (2010) elenca diversos fatores analisados pelos tomadores de decisão, que são o foco desta seção.

Em seguida, é necessário definir como este comportamento será representado no modelo, com quais equações e quais parâmetros. Finalmente, as lacunas do universo do modelo são preenchidas. O comportamento de cada parâmetro utilizado pelo tomador de decisão deve ser estudado e representado no modelo, incluindo todas as interações entre as partes relevantes. Esses tópicos serão abordados nas próximas seções.

As hipóteses aventadas por Piacente (2010) acerca dos determinantes do investimento abrangem questões técnicas, econômicas e conjunturais. Para uma melhor compreensão de como estes conhecimentos são relevantes ao modelo, estas hipóteses serão retomadas e aprofundadas a seguir.

Estabelecendo uma intersecção entre os lados técnico e econômico, a eficiência do *Bem de capital* e a simplicidade de operação implicam, respectivamente, em maior eficiência produtiva e menor custo operacional, ambos direcionados ao maior retorno do investimento. Como foi visto na seção 1.3, o difusor é capaz de extrair maior teor de sacarose da cana-de-açúcar do que os ternos de moenda, sendo, portanto, mais eficiente na extração. Além disso, o difusor tem operação automatizada, sendo relativamente mais fácil de operar que os ternos de moendas.

A capacidade máxima do bem de capital tem várias facetas consideradas. Primeiro, é interessante que o bem seja flexível, funcionando eficientemente perto e longe da capacidade máxima de operação. Nesse quesito, os ternos de moendas se sobressaem. Enquanto é possível ajustar a velocidade de operação dos ternos de moenda

e, assim, ter pouca perda de eficiência quando trabalhando com pouco volume de cana-de-açúcar, o difusor não consegue manter níveis elevados de eficiência com pouco volume de cana-de-açúcar.

Também existem vantagens associadas ao uso de mais equipamentos de menor capacidade em comparação ao uso de menos equipamentos de maior capacidade. Embora menor capacidade máxima usualmente esteja associada a menor eficiência, ela permite o fracionamento do investimento e facilita a manutenção.

Como os ternos de moenda têm menor capacidade e são mais flexíveis em termos de volume de cana-de-açúcar processada, eles permitem fracionar o investimento. Uma usina pode começar a operar com menos ternos de moendas assim que tiver cana-de-açúcar disponível. Conforme for sendo ampliada a área do canavial e, assim, o volume de cana-de-açúcar, são instalados novos ternos de moenda, ajustando a capacidade de esmagamento da usina à disponibilidade de cana-de-açúcar. Dessa forma, os investimentos são espaçados no tempo.

Havendo necessidade de parada para manutenção a menor capacidade dos ternos de moenda e sua flexibilidade também se mostram vantajosas. Se um terno de moenda apresenta um problema que exige sua parada, é possível ampliar a velocidade de linhas paralelas ou operar a sua linha pulando este terno em específico. Apesar da perda resultante de eficiência, a usina não para o esmagamento e a extração. Levando em consideração o caráter perecível da cana-de-açúcar cortada e a complexidade da logística de colheita, isso é uma vantagem.

A pouca flexibilidade do difusor e sua capacidade de operação relevante frente à necessidade das usinas não permite nem o fracionamento dos investimentos nem a continuidade da produção caso haja problemas técnicos, representando desvantagens deste.

Também são consideradas sinergias com outras etapas da produção. Ganham destaque por Piacente (2010) a maior pureza do caldo, maior consumo de energia e excessiva umidade do bagaço como impactos do uso do difusor em outras atividades, quando comparado com o uso de ternos de moenda.

Alguns dos fatores levantados têm relação direta com a irreversibilidade do investimento. São eles os *sunk-costs* e a incerteza. O preço de venda dos principais produtos é volátil, de forma que não está garantido o retorno do investimento. Isso é acentuado pelos elevados *sunk-costs*. Caso decida desfazer-se do investimento, a usina recuperará pouco do custo de investimento, de forma que a opção de investir é irreversível. Nesse quesito, o custo similar de ternos de moenda e difusor, para uma mesma capacidade, aproxima as duas tecnologias. Entretanto, a possibilidade de fracionar os investimentos em ternos de moenda permite postergar parte dos *sunk-costs* ou até abortar os investimentos e evitar o comprometimento de parte dos recursos.

Conforme será descrito na próxima seção, todos os fatores supracitados foram de alguma forma incorporados ao modelo. Outros fatores elencados por Piacente (2010) foram descartados. Seguem as considerações a respeito dos fatores descartados e os motivos para tal, além de algumas simplificações importantes adotadas.

Um grupo de fatores relevantes é relacionado ao ciclo de investimento e expansão do setor como um todo. Disponibilidade e prazo de entrega do bem de capital são fatores importantes em momentos de forte expansão do setor, como o ciclo recente de investimentos antes da crise financeira internacional iniciada em 2008. A falta de oferta de moendas redirecionou parte da demanda resultante do ciclo de investimentos para os difusores, como destacado por Piacente:

“Parte da opção pelo sistema de difusão entre 2004 e 2006 deve-se ao fato de que as firmas fabricantes de moendas demorariam mais de dois anos para entregar suas encomendas, devido à grande procura pelos seus equipamentos, isso 'abriu espaço' para os fabricantes de difusores. A Uni-Systems e a Sermatec, apresentaram o sistema de difusão como uma opção com viabilidade produtiva, custo comparado reduzido e com potencialidade de instalação de uma planta completa em no máximo 18 meses.” (2010, p. 151).

O crescimento rápido da capacidade instalada de qualquer uma das tecnologias também pode resultar em escassez de mão-de-obra qualificada para operar e dar manutenção a equipamentos desta tecnologia, gerando um efeito análogo ao *crowding-out*. Isso também pesou contra os ternos de moenda no momento de forte

expansão do setor prévio a 2008, visto que essa tecnologia esbarrou antes nesse limitante.

A diversificação geográfica, com a expansão da produção longe das áreas tradicionais, também resulta em situações semelhantes. Nestes locais ainda não existe a mesma estrutura de oferta de serviços e mão-de-obra no porte configurado nos centros tradicionais. Desta forma, existe maior sensibilidade à expansão da demanda por esses, podendo redundar em inflação de custos no ciclo de investimento e dificuldades de operação. Em contrapartida, nas regiões tradicionais de produção, a infraestrutura de apoio aos ternos de moenda já montada pesa a favor desta tecnologia. Nas regiões de expansão as redes e infraestrutura de apoio ainda estão se conformando, não configurando uma forte assimetria entre as tecnologias.

Vale lembrar que, parte das demandas do setor, como por exemplo, serviços de manutenção, são específicos para cada tecnologia, de forma que os efeitos resultantes do ciclo de investimentos ou da região de expansão podem afetar de forma diversa usinas que operam com tecnologias diferentes.

Em um momento de crescimento mais ameno do setor, enquanto a expansão acontecer em áreas tradicionais e os setores produtor de bens de capital e prestador de serviços forem capazes de responder à demanda, a escolha por uma tecnologia implica em externalidades positivas aos adotantes desta tecnologia. O maior parque instalado facilitará a manutenção do equipamento e facilitará a procura por mão de obra preparada para operá-lo. Entretanto, quando o crescimento do setor é muito acelerado ou fora de áreas tradicionais, quando os setores produtor de bens de capital e prestador de serviços não forem capazes de responder à demanda específica a uma tecnologia, investimentos nesta tecnologia passam a ter externalidades negativas.

No modelo, o setor produtor de bens de capital é somente a oferta ilimitada de bens de capital a preço fixo. A inclusão do setor produtor de bens de capital permitiria estudar os impactos de fatores como atraso de entrega e falta de oferta e estudar a dinâmica de interação entre fornecedor e usuário do bem de capital, incluindo a dinâmica de evolução da tecnologia contida no bem de capital, a exemplo do feito em Chiaro-

monte; Dosi e Orsenigo, (1993). Seria possível incorporar os fatores relacionados ao ciclo de investimento citados. Por outro lado, isso implicaria em um aumento significativo da complexidade do modelo e na ampliação do número de parâmetros a serem inicializados, dificultando a análise posterior dos resultados.

Em sua análise, Piacente (2010) considera que esses fatores atuaram no processo de difusão somente em um período, criando uma espécie de excepcionalidade temporária. Tendo em vista que o objetivo deste modelo é avaliar o conhecimento existente a respeito da difusão da tecnologia de extração da sacarose frente ao fato estilizado da não difusão da tecnologia de difusores, a análise mantém-se interessante mesmo que esses fatores não sejam inclusos. Uma vez demonstrado que os fatores aqui considerados são responsáveis pela não difusão da nova tecnologia no período de normalidade, em um segundo momento da pesquisa, pode-se buscar incorporar os fatores aqui excluídos para verificar se eles criam a excepcionalidade descrita.

Neste sentido, enquanto o período em estudo restringir-se ao período anterior ao ciclo de forte expansão do setor, a oferta de bens de capital não tem grande impacto na tomada de decisão. O contexto estará restrito ao ambiente de normalidade, caracterizado por externalidades positivas. A ponderação de todos esses fatores levou à escolha por não desenvolver uma representação mais sofisticada do setor produtor de bens de capital.

Hipóteses sobre racionalidade dos agentes decisores e a completude do conjunto informacional ao qual eles têm acesso também precisam ser representadas no modelo. Os especialistas da área e trabalhadores do setor com quem se teve contato no processo de elaboração deste e outros trabalhos demonstraram deter e valorizar conhecimento técnico acerca dos diferentes processos e relataram rotinas de decisão que se aproximam do esperado de agentes racionais.

Além disso, eles demonstram conhecer as alternativas tecnológicas disponíveis, fato compatível com a existência de diversos meios de propagação de informação, como o marketing dos fornecedores de bens de capital, feiras, congressos e outros eventos específicos do setor além de publicações direcionadas. Vale destacar que os forne-

cedores de difusores são também fornecedores tradicionais de moendas. Assim sendo, este fornecedor tem acesso aos decisores no momento do investimento para oferecer ambas as tecnologias.

Levando-se em consideração estes fatores e tendo-se em vista que Piacente (2010) não aborda a incompletude de informação ou a racionalidade limitada dos decisores, os processos de decisão de investimento no modelo calculam e comparam o tempo esperado de retorno de cada uma das opções disponíveis com pouca ou nenhuma restrição ao acesso às informações existentes.

Outra escolha importante feita é o foco das decisões de investimento. O setor é caracterizado pela unidade produtiva usina. Entretanto, existem usinas que são também uma unidade administrativa e existem usinas que fazem parte de um grupo de usinas sob controle de uma administração central, capaz de realocar os recursos disponíveis para investimento entre suas usinas. No modelo, isso é representado pela alocação do objeto *Usina* sob um objeto *Proprietário*.

Um *Proprietário* com somente uma *Usina* sob seu controle representa uma usina que é simultaneamente unidade produtiva e administrativa. Um *Proprietário* com diversas iterações de *Usina* sob seu controle representa uma unidade administrativa que controla diversas unidades produtivas *Usina*. O *Proprietário* concentra o caixa, o fluxo de caixa e todas as decisões de investimento. Desta forma, a decisão de investimento representada no modelo é a decisão final da empresa, sem considerar as partes envolvidas nos processos internos que levaram à decisão final ou mesmo este processo interno de decisão.

Os fatores levantados por Piacente (2010), assim como as respectivas características das duas tecnologias podem ser vistas na Tabela 7. As escolhas relevantes sobre como estruturar o modelo, assim como suas motivações e consequências, podem ser vistas na Tabela 8. Somadas, essas tabelas resumem as bases para a elaboração do modelo, tema discutido nesta seção.

<b>Fator para escolha entre tecnologias segundo Piacente (2010)</b>	<b>Característica do terno de moenda</b>	<b>Característica do difusor</b>
<b>Simplicidade de operação</b>	Operação especializada	Operação simplificada
<b>Eficiência na extração</b>	Menos eficiente	Mais eficiente
<b>Eficiência de custos</b>	Maior custo de operação	Menor custo de operação
<b>Flexibilidade de escala de operação</b>	Flexível	Perde eficiência se longe da escala ideal de operação
<b>Capacidade de processamento de cana-de-açúcar</b>	Ternos de moendas são combinados e suas velocidades de operação são ajustadas para atingir as escalas necessárias	Capacidade fixa e relevante frente ao tamanho médio das usinas
<b>Sinergias com outras etapas</b>	Maiores sinergias	Menores sinergias (são necessárias adaptações em outras etapas)
<b>Facilidade de fracionamento do investimento</b>	Fácil de fracionar o investimento	Difícil de fracionar o investimento
<b>Disponibilidade de mão-de-obra capacitada para a tecnologia</b>	Escassa somente fora das regiões tradicionais durante o período de forte expansão. Abundante em outros contextos	Não representou problema
<b>Acesso a manutenção e serviços</b>	Difícil somente fora das regiões tradicionais durante o período de forte expansão	Mais difícil pela inexistência de uma rede bem estabelecida de serviços
<b>Disponibilidade e prazo de entrega de bem de capital</b>	Prazo de entrega longo durante o período de forte expansão	Não representou problema
<b><i>Sunk-costs</i> envolvidos</b>	<i>Sunk-costs</i> totais similares porém pode ser espaçados no tempo	<i>Sunk-costs</i> totais similares porém incorridos de forma concentrada
<b>Incerteza envolvida</b>	Igualmente afetado pela volatilidade do preço mas mais fácil de postergar ou cancelar investimentos	Igualmente afetado pela volatilidade do preço, mas mais difícil postergar ou cancelar investimentos

**Tabela 7:** Fatores determinantes na escolha de tecnologia.

Fonte: Piacente (2010).Elaboração própria

Escolha	Consequência	Motivação
<b>Representação simplificada do setor produtor de bens de capital; Externalidades positivas de adoção de uma tecnologia</b>	Não representados a diversificação geográfica e período de forte expansão do setor	Modelo mais simples, com menos parâmetros e resultados de mais fácil análise
<b>Completeness de informação e racionalidade dos tomadores de decisão</b>	Representação simplificada do tomador de decisão	Não considerado fator relevante por Piacente (2010); Observação do setor
<b>Unidade de decisão fora da usina</b>	Estrutura hierárquica com <i>Usina</i> sob <i>Proprietário</i> , que concentra o fluxo de caixa e toma decisões de investimento	Observação do setor

**Tabela 8:** Escolhas relevantes na estruturação do modelo

Fonte: Elaboração própria

O cenário desenhado permite o desenvolvimento de um modelo adequado ao estudo proposto. Com base no entendimento aqui representado do funcionamento do setor e do comportamento dos tomadores de decisão é possível definir a estrutura e as equações do modelo.

### 3.3 Modelo desenvolvido

Nesta seção é descrito o modelo desenvolvido. Em paralelo com a descrição de cada parte é apresentado um exemplo simplificado do funcionamento da parte descrita. No fim da seção os exemplos das partes são agregados em uma iteração simplificada. Nos exemplos dados, os valores são meramente ilustrativos e foram definidos de forma a simplificar as contas para facilitar a compreensão.

Para a implementação do modelo foi utilizado o *Laboratory for Simulation Development 6.1* (LSD 6.1) desenvolvido pelo Professor Marco Valente (2002)<sup>7</sup>, na linguagem própria do programa, que é próxima de C++. Este software é um ambiente integrado de desenvolvimento (*Integrated Development Environment* - IDE) voltado ao desenvolvimento de modelos de simulação baseados em agente. O enfoque do ambiente em

<sup>7</sup> Para mais detalhes ver <http://www.labsimdev.org/>

facilitar a implementação e gestão do modelo e a análise dos resultados sem afastar o pesquisador dos detalhes do código do programa levaram à escolha desta ferramenta.

Fundamentalmente, o modelo é a definição de um conjunto de objetos e suas características, em uma estrutura hierárquica. Um objeto é uma unidade com um comportamento específico, definido por um conjunto de parâmetros e variáveis. Um parâmetro é um valor definido externamente ao modelo, pelo pesquisador que configura a simulação. Uma variável é um valor que é definido por uma equação do modelo e, portanto, é um elemento endógeno.

No modelo, por exemplo, existe um objeto *Canavial* que representa um canavial. Um *Canavial* possui variáveis que determinam seu potencial de produção de cana-de-açúcar e a sua produção efetiva. No modelo, existirão diversas cópias do objeto *Canavial*, denominadas instâncias deste objeto.

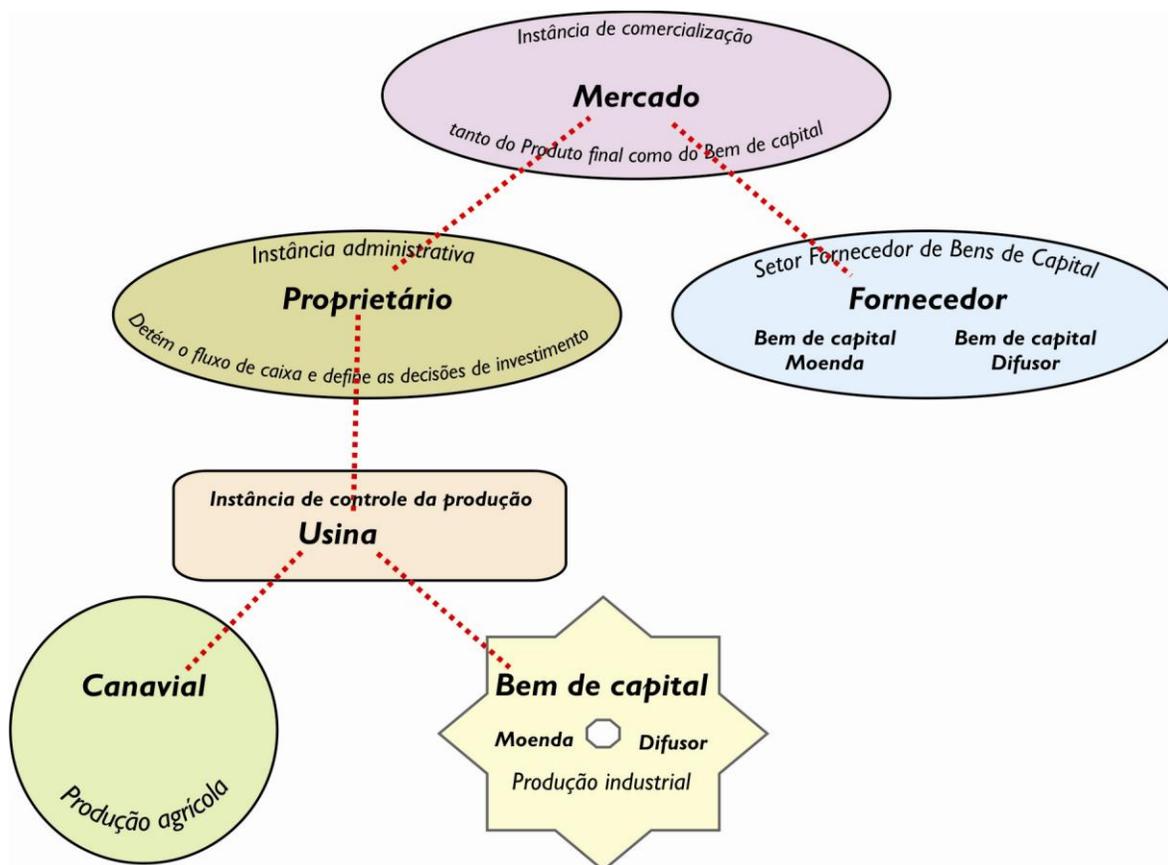
O comportamento das variáveis contidas em todas as instâncias de *Canavial* é o mesmo, ou seja, as funções matemáticas que determinam como se modificarão de uma iteração à outra estas variáveis é a mesma em todas as instâncias do objeto. Mas o valor de cada variável para cada instância de um objeto em cada momento do tempo é determinado individualmente e pode ser único. Por exemplo, o crescimento do potencial de produção de cana-de-açúcar em todas as instâncias de *Canavial* seguirá a mesma regra, expansão exponencial sobre o valor da iteração anterior. Entretanto, o valor da iteração anterior e a taxa de expansão poderão ser únicos para cada instância.

Assim sendo, um objeto no modelo é um tipo de agente que se pretende representar. Os parâmetros e variáveis contidas nesse objeto configuram um micro-estado que define as características desse tipo de agente. As equações associadas às variáveis desse objeto definem o comportamento desse tipo de agente. Todos os agentes de um mesmo tipo compartilham sua forma de comportamento, as mesmas equações, mas seus micro-estados têm características únicas.

Cada objeto está posicionado em uma estrutura hierárquica. Por exemplo, o objeto *Canavial* está sob o objeto *Usina*. Isso significa que todas as instâncias de *Canavial* estão sob alguma instância de *Usina*. Assim sendo, quando a *Usina* for procurar sua produção de cana-de-açúcar, ela irá somar a produção das iterações de *Canavial* sob si.

O modelo representa de forma estilizada os fornecedores de bens de capital para a produção de etanol e açúcar e o mercado destes produtos. Com mais detalhe é representada a produção agrícola de cana-de-açúcar e seu processamento industrial. Finalmente a decisão de investimento implementada busca incorporar as hipóteses elaboradas a respeito do comportamento dos agentes relevantes.

Conforme pode ser visto na Figura 12, a estrutura geral do modelo é fundada no objeto *Mercado*. Nele estão os parâmetros e funções mais gerais e as variáveis de agregação. Sob o *Mercado* estão também dois tipos de objetos, o *Fornecedor* e o *Proprietário*. Cada *Mercado* tem duas instâncias do objeto *Fornecedor*, cada uma responsável pela oferta de um tipo de *Bem de capital*, moenda ou difusor.



**Figura 12:** Estrutura hierárquica dos objetos no modelo

Fonte: Elaboração própria.

### 3.3.1 Estrutura geral do modelo

Cada instância do objeto *Proprietário* representa uma unidade administrativa concorrendo na produção. O objeto *Proprietário* contém o controle do fluxo de caixa, as equações de decisão e uma ou mais instâncias do objeto *Usina*. Este objeto, por sua vez, é uma unidade de gestão da produção, contendo os parâmetros e variáveis necessários para tal, além dos objetos *Bem de capital* e *Canavial*.

O *Canavial* é o âmbito do cálculo da produção de cana-de-açúcar. Cada instância de *Bem de capital* representa um sistema completo de produção, capaz de receber a cana-de-açúcar e gerar o produto final. Desta forma, o parâmetro produtividade do *Bem de capital* deve ser estipulado de forma a levar em consideração a produtividade do processo produtivo como um todo, incluindo sinergias entre as etapas e simplicidade de operação. Fica, assim, garantido a incorporação no modelo desses fatores.

O setor fornecedor de *Bens de capital* é representado somente pela oferta ilimitada de *Bens de capital* por parte do objeto *Fornecedor*. Com isso, não estão representadas no modelo as interações entre a agroindústria canavieira e os produtores de bens de capital. Conforme discutido anteriormente, essa simplificação limita o modelo, mas não prejudica o estudo aqui proposto.

Toda a estrutura está contida dentro do objeto *Mercado*. Neste objeto estão todas as variáveis agregativas do modelo, como produção total de produto final e market share de cada tecnologia. Também estão neste objeto as variáveis utilizadas por diversos objetos ou diversas instâncias de objetos, como o preço do produto final. Além disso, o *Mercado* estabelece uma ponte para permitir a interação entre os *Fornecedores* e os *Proprietários*.

Definida a estrutura geral do modelo é necessário detalhar alguns dos objetos contidos nessa estrutura. Para se obter um modelo, deve-se definir os parâmetros, as variáveis e as equações em cada objeto.

### 3.3.2 Detalhamento do Fornecedor de Bem de Capital

No momento da compra, os custos da transação e as características da nova instância de *Bem de capital* serão definidas pelos parâmetros e variáveis contidas no *Fornecedor* correspondente. O preço de venda, a capacidade máxima de operação, o custo variável

de operação e o tipo de tecnologia de extração de sacarose incorporado (moendas ou difusor) são parâmetros que caracterizam as unidades de *Bem de capital* disponíveis e são fixas desde o início do modelo.

Cada tipo de *Bem de capital* disponível para venda tem uma variável que define sua produtividade. A cada iteração, um sorteio com distribuição de probabilidade normal de média zero e variância  $SI$  é feito. Se o valor obtido for maior que zero, esse valor será o incremento à produtividade de todos os *Bens de capital* existentes à venda. Essa variável definirá, no momento da compra de um *Bem de capital*, o parâmetro de produtividade da nova iteração criada.

Assim, a produtividade das opções ofertadas de *Bem de capital* aumenta ao longo do tempo, mas a produtividade dos *Bens de capital* comprados é estática. Isso representa a evolução da produtividade dos novos ternos de moendas e dos novos difusores. A opção de comprar em um determinado momento implica na escolha por uma geração de ternos de moenda ou de difusor, com um patamar de produtividade. Disso resulta um *vintage effect*. Conforme um parque produtivo envelhece, a evolução dos novos *Bens de capital* disponíveis amplia a disparidade entre o parque instalado e as novas opções de investimento.

Como um único sorteio é feito para definir a adição de produtividade para todas as opções disponíveis de *Bens de capital*, é mantida a diferença de produtividade entre elas, garantindo que a ordenação das opções por produtividade seja a mesma ao longo de toda a simulação. Essas variáveis crescem em paralelo. A diferença de produtividade entre os *Bens de capital* disponíveis é definida pelo valor inicial atribuído às variáveis de produtividade.

Como exemplo, tem-se dois *Fornecedores*, cada qual vendendo um *Bem de capital* com características, no momento  $t=1$ , conforme descritas na Tabela 9.

Parte do Modelo	Tipo	Unidade	Instância I	Instância II
<i>Fornecedor</i>	Objeto	—	<i>Fornecedor A</i>	<i>Fornecedor B</i>
<i>Bem de capital</i>	Objeto	—	<i>Bem de capital A</i>	<i>Bem de capital B</i>
<b>Tecnologia</b>	Parâmetro	—	Terno de moenda	Difusor
<b>Capacidade</b>	Parâmetro	1.000 t cana /safra	600	1.200
<b>Produtividade</b>	Variável	kg açúcar / t cana processada	120	135
<b>Preço por unidade</b>	Parâmetro	1.000 R\$/ unidade	20.000	38.000
<b>Custo variável industrial</b>	Parâmetro	R\$ / kg açúcar produzido	0,15	0,14

**Tabela 9:** Características dos *Bens de capital* ofertados por *Fornecedor* em  $t=1$

Fonte: Elaboração própria

Na primeira iteração é feito o sorteio aleatório que define o avanço da produtividade dos *Bens de capital* disponíveis à venda e obtém-se o valor 0,5 de resultado. Assim, a produtividade de todos os *Bens de capital* disponíveis para venda é incrementada em 5, resultando, no momento seguinte  $t=2$ , nos novos valores de produtividade observados na Tabela 10.

Parte do Modelo	Tipo	Unidade	Instância I	Instância II
<i>Fornecedor</i>	Objeto	—	<i>Fornecedor A</i>	<i>Fornecedor B</i>
<i>Bem de capital</i>	Objeto	—	<i>Bem de capital A</i>	<i>Bem de capital B</i>
<b>Tecnologia</b>	Parâmetro	—	Terno de moenda	Difusor
<b>Capacidade</b>	Parâmetro	1.000 t cana /safra	600	1.200
<b>Produtividade</b>	Variável	kg açúcar / t cana processada	125	140
<b>Preço por unidade</b>	Parâmetro	1.000 R\$ / unidade	20.000	38.000
<b>Custo variável industrial</b>	Parâmetro	R\$ / kg açúcar produzido	0,15	0,14

**Tabela 10:** Características dos *Bens de capital* ofertados por *Fornecedor* em  $t=2$

Fonte: Elaboração própria

Caso o resultado do sorteio aleatório fosse negativo, não haveria qualquer mudança nas variáveis e a Tabela 9 ainda refletiria as características dos *Bens de capital* à venda nos *Fornecedores*. No momento da compra, as características do *Bem de capital* novo são fixas. Assim, um *Bem de capital A* comprado no momento  $t=1$  terá produtividade 120. Sua produtividade será menor que a produtividade de um *Bem de capital A* comprado no momento  $t=2$ , uma vez que, como visto, após a iteração, esta produtividade passa a ser 125.

### 3.3.3 Detalhamento do Canavial

No outro lado do modelo cada iteração tem início no *Canavial*. Um *Canavial* é definido por duas variáveis e um parâmetro. A variável de potencial de produção define o máximo de cana-de-açúcar que aquele *Canavial* consegue produzir no momento. A variável de produção efetiva define quanto de cana-de-açúcar aquele *Canavial* efetivamente produz. O parâmetro de custo variável agrícola define o custo por unidade de cana-de-açúcar produzida neste *Canavial*.

A cada iteração em cada *Canavial* cresce o potencial de produção, representando o crescimento da produtividade agrícola, e diminui a produção agrícola efetiva, representando a queda de produtividade do *Canavial* conforme este envelhece. Ambos os movimentos são feitos multiplicando o valor da variável na iteração anterior por um parâmetro. Todos os *Canaviais* do modelo têm uma única taxa de crescimento da capacidade de produção e uma única taxa de decréscimo da produção efetiva. Se, na iteração anterior, foi feita a renovação do *Canavial* em questão<sup>8</sup>, então a produção efetiva de cana-de-açúcar deste será igual ao seu potencial de produção.

No exemplo, tem-se duas instâncias de *Canavial*, cujas características no momento  $t=1$  estão descritas na Tabela 11. Nesse momento, o *Canavial D* acabou de ser renovado e produz plenamente seu potencial de produção. O *Canavial C* não é renovado há várias iterações e, portanto, efetivamente produz consideravelmente menos que seu potencial. Ambas as instâncias de *Canavial* pertencem à mesma *Usina*.

---

<sup>8</sup> A decisão por renovar um *Canavial* é tomada pelo *Proprietário* e resulta em custos. Uma explicação mais detalhada é feita na seção 3.3.5.1.

Parte do Modelo	Tipo	Unidade	Instância I	Instância II	Total	Média ponderada
<i>Canavial</i>	Objeto	—	<i>Canavial C</i>	<i>Canavial D</i>	—	—
<b>Custo variável agrícola</b>	Parâmetro	R\$ /t cana produzida	25	30	—	29
<b>Potencial de produção</b>	Variável	1.000 t cana / safra	1.140	900	2.040	—
<b>Produção efetiva</b>	Variável	1.000 t cana / safra	150	900	1.050	—

**Tabela 11:** Características dos *Canaviais* em  $t=1$

Fonte: Elaboração própria

Neste exemplo, o potencial de produção dos *Canaviais* cresce à taxa de 5% por iteração e a produção efetiva dos mesmos decresce à taxa de 10% por iteração. O *Proprietário* destes *Canaviais* decide, na primeira iteração, fazer a renovação do *Canavial C* mas não fazer a renovação do *Canavial D*<sup>9</sup>. Assim sendo, após uma iteração, atingido o momento  $t=2$ , as características dos *Canaviais* serão como apresentado na Tabela 12.

Parte do Modelo	Tipo	Unidade	Instância I	Instância II	Total	Média ponderada
<i>Canavial</i>	Objeto	—	<i>Canavial C</i>	<i>Canavial D</i>	—	—
<b>Custo variável agrícola</b>	Parâmetro	R\$ /t cana produzida	25	30	—	27
<b>Potencial de produção</b>	Variável	1.000 t cana / safra	1.140	900	2.040	—
<b>Produção efetiva</b>	Variável	1.000 t cana / safra	150	900	1.050	—

**Tabela 12:** Características dos *Canaviais* em  $t=2$

Fonte: Elaboração própria

<sup>9</sup> Os cálculos para essas decisões e os custos resultantes serão explicados nos exemplos mais adiante e estão apresentados na tabela 17.

### 3.3.4 Detalhamento da *Usina*

Cada *Bem de capital* processa uma quantidade de cana-de-açúcar alocada a ele pela *Usina*. Para fazer essa alocação, a *Usina* soma toda a cana-de-açúcar produzida por seus Canaviais. Em seguida, ela ordena as suas unidades de *Bem de capital* de acordo com a produtividade percebida desses. A cana-de-açúcar é então alocada dando preferência aos *Bens de capital* percebidos como mais produtivos.

É feito um sorteio aleatório a partir de uma distribuição normal com média na produtividade efetiva de cada *Bem de capital* e variância  $P1$  para obter-se a produtividade percebida pela *Usina* de cada *Bem de capital* sob ela. No ordenamento são desconsideradas em todo o processo produtivo as unidades cuja produtividade seja inferior a um mínimo definido como uma fração  $P2$  da produtividade média das opções de *Bem de capital* disponíveis para o investimento.

Conforme será discutido na seção 3.4, o valor de  $P2$  relaciona-se com o retorno esperado do investimento. Conceitualmente, dados uma taxa de retorno esperada do investimento e o custo deste, existirá um ponto a partir do qual a diferença de produtividade entre o maquinário em operação e o novo maquinário disponível para investimento justificará a substituição do velho pelo novo. Essa configuração assemelha-se ao adotado por Dosi; Fagiolo e Orsenigo (2007) para a substituição de equipamentos e por Chiaromonte; Dosi e Orsenigo (1993) como *scrapping rule*.

No modelo, a substituição não é automática. Primeiro, na etapa de produção, o *Bem de capital* antigo é descartado. Como será visto na seção 3.3.5.2, a falta de capacidade produtiva será identificada como uma oportunidade de investimento, levando à compra do novo *Bem de capital*. O resultado deste processo, assim como no modelo feito por Silverberg; Dosi e Orsenigo (1988)

“(...) replacement investment contributes more to lowering unit costs per unit of investment outlay than does expansion investment. Thus unit costs are determined by the age structure of the capital stock it represents.”  
(p. 1039)

É dada preferência ao *Bem de capital* com maior produtividade percebida até que a cana-de-açúcar alocada a ele alcance sua capacidade produtiva, quando a *Usina* passa ao pró-

ximo *Bem de capital*. Esse ciclo repete-se até que se esgote a cana-de-açúcar disponível ou até que se esgote a capacidade produtiva de todas as unidades de *Bem de capital* daquela *Usina* cuja produtividade percebida esteja acima do mínimo exigido pela própria *Usina*.

No exemplo, tem-se, na mesma *Usina* onde estão os dois *Canaviais* já apresentados, dois *Bens de capital*, cujas características estão descritas na Tabela 13. Como pode ser visto, ambos são ternos de moenda. A diferença de produtividade entre eles e o terno de moenda disponível no *Fornecedor A* indica que eles são *Bens de capital* de gerações diferentes, comprados em momentos diferentes de iterações passadas.

As produtividades percebidas desses *Bens de capital* são determinadas individualmente pelo sorteio aleatório descrito acima. Com esses resultados, a *Usina* considera que o *Bem de capital F* é mais produtivo que o *Bem de capital E*. Assim, ela dará preferência ao *Bem de capital F* na distribuição da cana-de-açúcar disponível. Como pode ser visto na Tabela 11, a *Usina* tem disponível no momento  $t=1$  um total de 1.050 mil toneladas de cana-de-açúcar. A *Usina* aloca essa cana-de-açúcar ao *Bem de capital F* até que acabe a cana-de-açúcar ou que este esteja a plena capacidade. Se ainda existir cana-de-açúcar disponível, ela executa o mesmo procedimento com o próximo *Bem de capital* na sequência decrescente de produtividade percebida.

Parte do Modelo	Tipo	Unidade	Instância I	Instância II
<i>Bem de capital</i>	Objeto	—	<i>Bem de capital E</i>	<i>Bem de capital F</i>
<b>Tecnologia</b>	Parâmetro	—	Terno de moenda	Terno de moenda
<b>Capacidade</b>	Parâmetro	1.000 t cana / safra	600	600
<b>Produtividade</b>	Parâmetro	Kg açúcar / t cana processada	110	115
<b>Custo variável industrial</b>	Parâmetro	R\$ / kg açúcar produzido	0,15	0,15
<b>Produtividade Percebida em (t=1)</b>	Variável	kg açúcar / t cana processada	113	114
<b>Produtividade Percebida em (t=2)</b>	Variável	Kg açúcar / t cana processada	105	117

**Tabela 13:** Características dos *Bens de capital* instalados na *Usina*

Fonte: Elaboração própria.

Nesse caso, na primeira iteração como a capacidade do *Bem de capital F* é de 600 mil toneladas, ele receberá da *Usina* um total de 600 mil toneladas de cana-de-açúcar.

As 450 mil toneladas restantes serão alocados ao *Bem de capital E*. Na segunda iteração, a cana-de-açúcar disponível é suficiente para ambos os *Bens de capital* operarem a plena capacidade e sobrar 807 mil toneladas de cana-de-açúcar não processadas. A Tabela 14 mostra o processo de alocação de cana-de-açúcar nas duas iterações.

Iteração	Cana-de-açúcar disponível	Cronograma de alocação da cana-de-açúcar			
		<i>Bem de Capital F</i>	Saldo a distribuir	<i>Bem de Capital E</i>	Saldo final
<b>Primeira</b>	1050 1.000 t cana-de-açúcar	600	450	450	0
<b>Segunda</b>	2007 1.000 t cana-de-açúcar	600	1407	600	807

**Tabela 14:** Processo de alocação de cana-de-açúcar na *Usina*.

Fonte: Elaboração própria.

#### 3.3.4.1 A variável *know-how*

A produção, incluindo todas as etapas da cana-de-açúcar ao produto final, é feita pelo *Bem de capital*. O volume produzido é resultado da multiplicação da quantidade de cana-de-açúcar pela produtividade do *Bem de capital* e pela variável *know-how*. A produtividade do *Bem de capital* representa a produtividade não somente do maquinário de extração de sacarose, mas da etapa industrial como um todo. Assim sendo, nele devem estar incluídas as sinergias existentes entre as diferentes atividades executadas nesta etapa. A variável *know-how* representa a detenção de conhecimentos específicos necessários à operação de equipamentos de um tipo.

Como o foco deste trabalho é o estudo da difusão de uma nova tecnologia, concorrente a uma existente, ambas incorporadas no respectivo tipo de *Bem de capital*, a variável *know-how* existirá sempre aos pares, uma cópia referente a cada tecnologia, difusor e moenda. Sendo a *Usina* a unidade produtiva básica do setor, cada *Usina* terá valores próprios para esta variável, contendo em si um par delas. Isso significa dizer que cada *Usina* terá uma capacidade própria de operar ternos de moendas e uma capacidade própria de operar difusores.

Finalmente, existe uma dinâmica para os valores de *know-how*, incorporando ao modelo aprendizado interno e externalidades decorrentes do uso de uma tecnologia. Essa

dinâmica será abordada mais adiante, nesta mesma seção, mas é importante destacar aqui que este parâmetro terá um valor sempre entre zero e um, denotando a capacidade de utilizar o *Bem de capital* em produtividade plena, à semelhança do feito por Chiaromonte; Dosi e Orsenigo (1993).

No exemplo, na primeira iteração, a produção dá-se de acordo com a Tabela 15.

Conforme já descrito na seção 3.3.4, a *Usina* alocou a cada *Bem de capital* um montante de cana-de-açúcar a ser processado (ver Tabela 14). Nesse momento, o *know-how* desta *Usina* para operar com ternos de moenda tem valor 0,95. Como ambos os *Bens de capital* em uso são ternos de moenda, esse é o valor de *know-how* utilizado no cômputo da produção.

Parte do Modelo	Tipo	Localização no Modelo	Unidade	Instância I	Instância II	Total	Média ponderada
<i>Bem de capital</i>	Objeto	<i>Usina</i>	—	<i>Bem de capital E</i>	<i>Bem de capital F</i>	—	—
<b>Tecnologia</b>	Parâmetro	<i>Bem de Capital</i>	—	Terno de moenda	Terno de moenda	—	—
A <sup>1</sup> <b>Cana-de-açúcar alocada<sup>2</sup></b>	Variável	<i>Bem de Capital</i>	1.000 t cana	450	600	1.050	—
B <b>Produtividade</b>	Parâmetro	<i>Bem de Capital</i>	Kg açúcar / t cana processada	110	115	—	107
C <b>Know-how</b>	Variável	<i>Usina</i>	—	0,95	—	—	—
<b>Custo variável industrial</b>	Parâmetro	<i>Bem de Capital</i>	R\$ / kg açúcar produzido	0,15	0,15	—	0,15
A*B*C <b>Produção de açúcar</b>	Variável	<i>Bem de Capital</i>	mil Kg açúcar	47.025	65.550	112.575	—

1 Memória de Cálculo: a partir desta tabela haverá uma indicação suplementar que facilitará o entendimento de como o modelo calcula, a partir de seus parâmetros e variáveis, os valores necessários para auxiliar na tomada de decisão do *Proprietário*

2 Variável calculada pela *Usina*

**Tabela 15:** Cômputo da produção na primeira iteração

Fonte: Elaboração própria.

Para obter-se o volume produzido por cada *Bem de capital* multiplica-se a cana-de-açúcar alocada pela produtividade e pelo *know-how* correspondentes. Assim,  $600 * 115 * 0,95 = 65.550$ . A produtividade média é obtida pela divisão do total produzido pelo total de cana-de-açúcar processada, ou seja,  $112.575 / 1.050 = 107$ . Devido à forma de cálculo, a produtividade média obtida é a média das produtividades dos *Bens de capital* multiplicadas pelos *know-hows* ponderada pelo volume produzido por cada *Bem de capital*.

Tendo em vista a estrutura montada, o parâmetro produtividade do *Bem de capital* deve ser definido de forma a incorporar todas as características intrínsecas ao *Bem de capital* que afetem sua produtividade e o valor de *know-how* deve refletir todos os fatores que impactem a capacidade dos agentes envolvidos no processo produtivo de atingir o potencial dos equipamentos que operam.

Assim sendo, levando em consideração o discutido nas seções anteriores, dado que a produtividade do *Bem de capital* reflete a produtividade total de todo o processo, desde a recepção da cana-de-açúcar na *Usina* até a obtenção do produto final, menores sinergias entre o terno de moenda ou o difusor e as outras atividades produtivas se refletem em uma redução desta produtividade. Além disso, o valor de *know-how* deve refletir não só o conhecimento técnico da usina sobre como operar aquele maquinário, mas também a facilidade de operação deste. Ambos as considerações atuam no sentido de diminuir os diferenciais de produtividade e de *know-how* existentes entre os ternos de moendas e os difusores representados no modelo.

Como pode ser percebido, não foi incorporada explicitamente a flexibilidade de escala de produção. A produtividade e os custos variáveis de operação do *Bem de capital*, tomando *know-how* constante, têm relação linear com o volume produzido. O único impacto negativo para a *Usina* de empregar um *Bem de capital* abaixo de sua capacidade máxima é ter tido um custo de investimento por unidade de produto produzido maior que o necessário.

Como explicado anteriormente, o parâmetro *know-how* reflete a capacidade dos agentes envolvidos na produção de atingir o potencial produtivo dos equipamentos. Ele está localizado aos pares na *Usina*, uma instância para cada tecnologia, e assume valores sempre entre zero e um. Quando uma *Usina* utiliza um *Bem de capital* na produção há uma chance de o valor de *know-how* desta *Usina* associado ao tipo do *Bem de capital* em questão aumentar. Essa dinâmica representa o aprendizado do tipo *learn-by-doing*, figura comum dos modelos evolucionários. O caráter tácito de parte do conhecimento envolvido na produção e o constante processo de revisão e adaptação das rotinas produtivas são usualmente representados em modelos evolucionários de simulação por um parâmetro de aprendizado cuja evolução depende da produção, a exemplo de Silverberg, Dosi e Orsenigo (1988).

No modelo aqui desenvolvido, cada vez que um *Bem de capital* é utilizado, o aprendizado pode acontecer com probabilidade igual à fração que a cana-de-açúcar processada por esse *Bem de capital* representa no total de cana-de-açúcar disponível à *Usina*. Caso haja aprendizado, é feito um sorteio aleatório a partir de uma distribuição uniforme entre zero e o parâmetro  $P_3$ , que é necessariamente menor que um. O novo valor do *know-how* da *Usina* associado à tecnologia daquele *Bem de capital* será:

$$kh^* = kh + s * (1-kh)$$

$$s \sim U(0, P_3) \tag{3}$$

onde  $kh^*$  é o novo valor de *know-how*,  $kh$  é seu valor prévio e  $s$  é o valor observado no sorteio aleatório realizado. A utilização de sorteio aleatório em dois estágios denota o não automatismo do processo de aprendizado. Embora normalmente associado a esforços de inovação (NELSON; WINTER, 1982) ou de exploração do universo de conhecimento (CHIAROMONTE; DOSI; ORSENIGO, 1993) este mecanismo é utilizado em modelos de simulação baseados em agentes.

Esta formulação significa que, caso haja aprendizado, a *Usina* aprenderá a fração  $s$  do que ela ainda tem por aprender para operar o equipamento com plena eficiência. Quando  $s=0$ , nada do conhecimento por aprender é aprendido e o novo *know-how* é igual ao anterior. Quando  $s=1$ , todo o conhecimento por aprender é aprendido e o novo *know-how* é igual a 1, indicando capacidade de operar o equipamento de forma plena. Para quaisquer valores intermediários de  $s$ , serão aprendidas frações correspondentes do conhecimento restante. Dessa forma, o aprendizado é mais efetivo quanto mais longe se está da plena eficiência e progressivamente mais marginal quando mais próximo desta.

No exemplo, existem dois *Bens de capital*. O *Bem de capital E* processou 450 de um total de 1.050 de cana-de-açúcar disponível. Assim, a *Usina* terá um sorteio com 43% de chance de ter aprendido. O *Bem de capital F* processou 600 de 1.050 de cana-de-açúcar de açúcar disponível. Assim, a *Usina* terá outro sorteio com probabilidade 57% de chance de ter aprendido. Mesmo somando 100%, os valores não implicam em certeza de aprendizado, pois são realizados dois sorteios em paralelo. Nenhum sucesso implica nenhum aprendizado, um sucesso implica

uma rodada de aprendizado e dois sucessos implicam em duas rodadas de aprendizado. As probabilidades de aprendizado somente não somarão 100% quando parte da cana-de-açúcar disponível não for processada, como é o caso da segunda iteração (ver Tabela 14).

Sendo obtido somente um sucesso, então há uma rodada de aprendizado. O *know-how* para ternos de moenda em  $t=1$  é 0,95. Conseqüentemente, o que resta a aprender,  $(1-kh)$ , é 0,05. Sendo 0,5 o valor de  $P_3$  e 0,4 o valor de  $s$ , resultado de um sorteio aleatório de uma distribuição uniforme entre 0 e 0,5, então 40% do potencial de melhora do *know-how* da *Usina* será atingido. O novo valor de *know-how*, em  $t=2$ , será 0,97.

Existe também no modelo uma dinâmica de *know-how* entre as diferentes instâncias de *Usina*. Conforme as várias instâncias de *Usina* produzem, aumenta o valor médio de *know-how*. Uma parte desse valor médio torna-se público, acessível a todas as outras instâncias de *Usina*. A cada iteração, uma *Usina* cujo valor de *know-how* for abaixo do valor da variável *know-how público* irá sobrescrever seu valor de *know-how* com o valor de *know-how público*, em dinâmica semelhante à adotada por Silverberg; Dosi e Orsenigo (1988).

Sendo, para uma determinada tecnologia,  $kh_p^*$  o novo valor da variável *know-how público*,  $kh_p$  seu valor prévio,  $kh_m$  o valor médio de *know-how* de todas as instâncias de *Usina* ponderado pela produção destas utilizando a tecnologia em questão,  $ms$  o *market-share* da tecnologia em questão no total produzido e  $P_4$  um parâmetro com valores entre zero e um para regular a facilidade com que *know-how* torna-se público, então a dinâmica de evolução do *know-how público* da tecnologia em questão a cada iteração será dada por:

$$kh_p^* = kh_p + P_4 * ms^2 * (kh_m - kh_p) \quad (4)$$

Dessa equação resulta que, enquanto  $P_4$  e o *market-share* da tecnologia em questão não forem nulos, a cada iteração uma parcela do conhecimento que ainda não é público se tornará público. Quanto maior  $P_4$  e quanto maior o *market-share* da tecnologia, maior essa parcela. Quando o termo  $P_4 * ms^2$  for igual a zero, nenhum conhecimento novo se tornará público. Quando ele for igual a um, o conhecimento médio das *Usinas* para a

tecnologia em questão se tornará integralmente público. Para valores intermediários, uma fração de conhecimento novo se tornará pública.

Essa dinâmica de difusão de *know-how* entre as instâncias de *Usina* faz com que seja mais fácil para uma *Usina* adotar uma tecnologia que ela ainda não utilize, conquanto que esta seja amplamente utilizada. Dessa forma, são garantidas externalidades positivas no uso de uma tecnologia. Quando uma *Usina* usa intensivamente uma tecnologia, ela está facilitando a outras *Usinas* adotarem esta mesma tecnologia.

Para uma tecnologia com amplo uso, haverá um valor mínimo de *know-how* mais elevado. Um paralelo direto dessa dinâmica pode ser estabelecido com um efeito de *spillover* na produção. Quanto mais utilizada e consolidada no mercado uma tecnologia, mais fácil será encontrar mão-de-obra especializada e capacitada, peças e serviço de manutenção, informações sobre melhores técnicas de operação e equipamentos para reposição do capital depreciado. De forma similar ao feito por Chiaromonte, Dosi e Orsenigo, 1993 todos esses fatores resultantes de externalidades são representados no modelo pela dinâmica do *know-how público*.

No exemplo construído,  $P_4$  assume o valor de 0,2 e os ternos de moenda têm 100% de *market share*. Em  $t=1$ , o valor de *know-how público* é de 0,8 e o valor médio de *know-how* das *Usinas* é o valor de *know-how* da única *Usina*, 0,95. Assim sendo, em  $t=2$  o valor de *know-how público* é 0,83.

### 3.3.5 Detalhamento do Proprietário

Todo volume do produto final produzido pelo *Bem de Capital* é concentrado no *Proprietário* e vendido a um preço de mercado, representado por uma variável contida no  *Mercado*. A variável preço pode ser definida pelo pesquisador que utiliza o modelo como fixa ao longo de toda a simulação ou pode ter um valor definido para cada iteração. Dadas as dificuldades de definir uma variável com comportamento capaz de replicar de forma satisfatória o comportamento observado do preço do açúcar, é possível utilizar uma série histórica de preços com valores anuais para definir este parâmetro do modelo.

A gestão do fluxo de caixa é toda feita pelo *Proprietário*. A única receita auferida é a venda do produto final. Os custos incluem um custo fixo por *Usina*, um custo variável agrícola-

la, diretamente proporcional ao volume de cana-de-açúcar produzido, e um custo variável industrial, diretamente proporcional ao volume de produto final produzido. O parâmetro que representa o custo fixo está associado à *Usina*, de forma que cada instância desta pode ter um custo fixo diferente. De forma semelhante, os custos variáveis estão associados à sua origem, o custo variável agrícola ao *Canavial* e o custo variável industrial ao *Bem de capital*. Isso permite que cada instância desses objetos tenha custos variáveis diferentes, gerando heterogeneidade no modelo como um todo.

A soma da receita menos custos com o caixa herdado da iteração anterior resulta no montante disponível para investimento<sup>10</sup>. O montante restante após pago o investimento é deixado como caixa para a próxima iteração. Não existe no modelo um setor financeiro que permita a tomada de crédito ou a aplicação de excedentes de caixa.

No exemplo utilizado, o fluxo de caixa antes do investimento dá-se conforme apresentado na Tabela 16. Os valores de total de cana-de-açúcar colhida e custo variável agrícola médio foram recuperados da Tabela 11 e os valores de total de cana-de-açúcar processada, custo variável industrial médio e volume produzido do produto final foram recuperados da Tabela 15. Os valores de caixa herdado da iteração anterior, preço do produto final e custos fixos das *Usinas* são apresentados pela primeira vez. Os valores de receita total, custo agrícola total, custo industrial total e caixa disponível para investimento são calculados a partir dos outros valores.

Por fim, cabe descrever a representação no modelo das decisões de investimento. A decisão de investimento é tomada pelo *Proprietário*. Após concentrar o produzido em todas suas *Usinas*, realizar toda a receita e pagar todos os custos, o *Proprietário* conhece sua disponibilidade de recursos financeiros para o investimento. Em seguida ele lista todas suas opções satisfatórias de investimento e ordena essa lista usando como critério o retorno esperado de cada investimento. O *Proprietário* segue, então, realizando sequencialmente os investimentos da lista, a partir do qual apresenta o maior retorno esperado, até que os recursos financeiros restantes não sejam suficientes para arcar com os custos do próximo investimento na lista.

---

<sup>10</sup> A tomada de decisão de investimento e a relação desta com a disponibilidade de recursos serão explicadas na seção 3.3.5.4.

	Parte do Modelo	Tipo	Localização no modelo	Unidade	Valor
A	Caixa herdado da iteração anterior	Variável	Proprietário	1.000 R\$	50.000
M	Volume produzido do produto final	Variável	Proprietário	1.000 kg açúcar	112.575
N	Preço do produto final	Variável	Mercado	R\$ / kg açúcar	0,50
B=M*N	Receita total	Variável	Proprietário	1.000 R\$	56.288
O	Volume de cana-de-açúcar colhida	Variável	Proprietário	1.000 t cana	1.050
P	Custo variável agrícola médio	Variável	Proprietário	R\$ / t cana colhida	29
C=O*P	Custo agrícola total	Variável	Proprietário	1.000 R\$	30.750
R	Custo variável industrial médio	Variável	Proprietário	R\$ / kg açúcar produzido	0,15
S	Sistema de custos fixos das Usinas	Variável	Proprietário	1.000 R\$	100
D=(M*R+S)	Custo industrial total	Variável	Proprietário	1.000 R\$	16.986
A+B-C-D	Caixa disponível para investimentos	Variável	Proprietário	1.000 R\$	58.551

**Tabela 16:** Fluxo de caixa antes do investimento – primeira iteração

Fonte: Elaboração própria

As opções consideradas pelo *Proprietário* são a renovação de um *Canavial*, a compra de um *Bem de capital* de um tipo para uma *Usina* sua e a criação de uma nova *Usina*. Assim, o número de itens na lista depende do número de unidades de *Usina* sob o *Proprietário*, do número de tipos de *Bem de capital* disponíveis e do número de unidades de *Canavial* sob estas.

Para avaliar o retorno de cada opção, o *Proprietário* estima o incremento no fluxo de caixa resultante dessa opção e divide esse valor pelo custo de implantação dessa opção. O resultado obtido é o inverso do tempo de retorno do investimento. Desta forma, quanto maior o valor obtido, menor o tempo de retorno do investimento e melhor é a opção de investimento.

### 3.3.5.1 Decisão do Proprietário em investir na Renovação do Canavial

No caso da opção de renovar um *Canavial*, as receitas são estimadas com base no incremento da produção agrícola resultante dessa opção. A partir da diferença entre a produção agrícola efetiva e a potencial do *Canavial* e da produtividade média da atividade industrial da

*Usina* correspondente, o *Proprietário* estima as variações esperadas na produção total, na receita e nos custos.

No exemplo trabalhado, seguindo a lógica apresentada, a renovação dos *Canaviais* no momento  $t=1$ , tem seu retorno calculado de acordo com a Tabela 17<sup>11</sup>. O valor do preço do produto final é igual ao da Tabela 16, o valor do custo variável agrícola dos *Canaviais* da Tabela 11, e os valores de produtividade industrial média da *Usina* e custo variável industrial médio da Tabela 15. O custo de renovação do *Canavial* aparece pela primeira vez.

	Parte do modelo	Tipo	Localização no Modelo	Unidade	Canavial C	Canavial D
A	Preço produto final	Variável	Mercado	R\$ / kg açúcar	0,50	
B	Custo Variável agrícola	Parâmetro	Canavial	R\$ / t cana produzida	25	30
C	Produtividade industrial média da Usina	Variável	Usina	Kg açúcar / t cana processada	107	
D	Custo variável industrial médio	Variável	Usina	R\$ / kg açúcar produzido	0,15	
E	Custo ew renovação do Canavial	Parâmetro	Mercado	R\$ / 1.000 t cana aumento produção	30	
<b>Cálculo intermediário<sup>1</sup></b>						
F= A*C	Incremento de receita/ 1.000 t cana-de-açúcar a mais produzida			R\$ / 1.000 t cana aumento produção	53,5	53,5
G=B+C*D	Incremento de custo/ 1.000 t cana-de-açúcar a mais produzida			R\$ / 1.000 t cana aumento produção	41,1	46,1
H= (F-G)/E	Taxa de retorno da renovação do Canavial	Variável	Proprietário		0,42	0,25

<sup>1</sup> Sempre que a memória de cálculo não for suficiente para demonstrar os caminhos que o modelo utiliz para chegar aos valores pretendidos, haverá esta incisão na tabela, onde será detalhado o cálculo intermediário.

**Tabela 17:** Retorno estimado da renovação dos Canaviais

Fonte: Elaboração própria.

### 3.3.5.2 Decisão do Proprietário em investir na compra de um novo Bem de capital

Para avaliar o investimento em *Bem de capital* o *Proprietário* precisa, para cada *Usina*, estimar o impacto da compra de mais uma unidade de *Bem de capital* para cada tipo destes oferecido pelo *Fornecedor*. A avaliação da compra de várias unidades de um *Bem de capital* não é feita. O *Proprietário* estuda a compra de uma única unidade. Se decidir pela com-

<sup>11</sup> Como, no exemplo apresentado, os valores das variáveis apresentadas na tabela 17 não se alteram de  $t=1$  para  $t=2$ , os cálculos apresentados nesta tabela se aplicam a ambos os momentos.

pra, após fazê-la, ele reavalia suas opções, podendo comprar mais uma unidade do mesmo tipo para a mesma *Usina*. As informações utilizadas pelo *Proprietário* para estimar o retorno desse tipo de investimento são as características do *Bem de capital* e o excedente de cana-de-açúcar disponível para processamento na *Usina*.

A Tabela 18 mostra o cálculo de avaliação do investimento em *Bens de capital* correspondentes ao exemplo apresentado. É importante notar que a ausência de cana-de-açúcar para ser processada pelo novo Bem de capital em  $t=1$  inviabiliza este investimento neste momento, resultando no retorno estimado zerado. O excedente disponível em  $t=2$ , por sua vez, torna esse investimento, na segunda iteração, consideravelmente atraente.

Parte do Modelo	Tipo	Localização no Modelo	Unidade	$t=1$		$t=2$		
				Bem de Capital A	Bem de Capital B	Bem de Capital A	Bem de Capital B	
A	Capacidade Bem de Capital	Parâmetro	Bem de Capital no Fornecedor	1.000 t cana/safra	600	1.200	600	1.200
B	Cana-de-açúcar disponível para processamento	Variável	Usina	1.000 t cana	0		807	
C	Preço produto final	Variável	Mercado	R\$/kg açúcar	0,50		0,50	
D	Custo variável agrícola médio	Variável	Usina	R\$/t cana produzida	29		27	
E	Preço Bem de capital	Parâmetro	Bem de Capital no Fornecedor	1.000 R\$/unidade	20.000	38.000	20.000	38.000
F	Custo variável industrial	Parâmetro	Bem de Capital no Fornecedor	R\$/kg açúcar produzido	0,15	0,14	0,15	0,14
G	Produtividade	Parâmetro	Bem de Capital no Fornecedor	Kg açúcar/t cana processada	120	135	125	140
H	Know-how	Variável	Usina	—	0,95	0,80	0,97	0,80
$I = \min(A;B)$	Quantidade de cana-de-açúcar a ser processada			1.000 t cana	0	0	600	807
$J = I * G * H$	Incremento de produção estimado			1.000 kg açúcar	0	0	72.750	90.384
$K = J * C$	Incremento de receita estimado			1.000 R\$	0	0	36.375	45.192
$L = I * D + J * F$	Incremento de custo estimado			1.000 R\$	0	0	27.123	34.457
$M = (K - L) / E$	Taxa de retorno do Bem de Capital	Variável	Proprietário	0	0	0	0,46	0,28

**Tabela 18:** Retorno estimado da compra de *Bens de capital*

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 18 mostra como o modelo reflete a vantagem da pequena escala do terno de moenda em comparação com o difusor. Apesar de menos produtivo, o terno de moenda é escolhido por sua escala aproximar-se melhor da evolução da produção de cana-de-açúcar. Por fim, é importante destacar que, confrontado com os dados dessa tabela, o

*Proprietário* escolhe comprar um *Bem de capital A*. Uma vez feito isso, ele recalcula o retorno das opções de *Bem de capital* considerando a disponibilidade de cana-de-açúcar de 207 mil toneladas, considerando que o *Bem de capital* recém adquirido processará 600 das 807 mil toneladas de cana-de-açúcar disponíveis.

#### 3.3.5.3 *Decisão do Proprietário em investir na criação de uma nova Usina*

O estudo necessário para a criação de uma nova *Usina* é mais complicado. O *Proprietário* precisa estimar a estrutura de custos e, para avaliar a rentabilidade, assume que será capaz de equilibrar a produção agrícola com a capacidade de processamento industrial da nova *Usina*.

No exemplo dado, o cálculo do retorno estimado para a criação de uma nova *Usina* na primeira iteração é como descrito na Tabela 19. Seguindo a mesma lógica dos cálculos anteriores, são estimados o incremento de receita e de custos decorrentes do investimento. A diferença entre estes é dividida pelo valor a ser desembolsado no investimento para obter-se a taxa de retorno. Entretanto, no caso da criação de uma nova *Usina* os cálculos não são feitos todos em valores absolutos, mas em relação a mil toneladas de cana-de-açúcar.

O preço da terra corresponde ao custo para a compra de terras para o *Canavial*. O valor deste parâmetro representa o preço a ser pago por uma área de terra capaz de produzir uma tonelada de cana-de-açúcar por safra. Os valores de custo variável agrícola, custo fixo da *Usina* e potencial de produção do *Canavial* são parâmetros e variáveis associados a objetos que ainda não existem no modelo, a *Usina* a ser criada e um *Canavial* sob esta *Usina*. Assim sendo, seus valores são definidos no momento do cálculo. O custo variável agrícola e o custo fixo da *Usina* são definidos por sorteio com os mesmos critérios que definiram os valores desses parâmetros para as outras *Usinas* do modelo. O potencial de produção do novo *Canavial* é definido como sendo a média do potencial dos *Canaviais* existentes no modelo.

São descartadas as opções cujo retorno esperado não atingir um patamar mínimo exigido pelo *Proprietário*, representada pelo parâmetro *II*. As demais são ordenadas para compor a lista de opções de investimento a ser executada sequencialmente. A execução de um investimento do tipo renovação de *Canavial* no modelo exige somente a redefinição do montante

da produção agrícola do *Canavial*, igualando-o ao seu potencial de produção<sup>12</sup> e a redução das disponibilidades financeiras do *Proprietário* no montante dos custos correspondentes.

	Parte do Modelo	Tipo	Localização no Modelo	Unidade	Bem de capital A	Bem de capital B
A	Preço do produto final	Variável	<i>Mercado</i>	R\$ / kg açúcar	0,50	
B	Custo variável industrial	Parâmetro	<i>Bem de Capital no Fornecedor</i>	R\$ / kg açúcar produzido	0,15	0,14
C	Produtividade	Parâmetro	<i>Bem de Capital no Fornecedor</i>	Kg açúcar / t cana processada	120	135
D	Preço do Bem de Capital	Parâmetro	<i>Bem de Capital no Fornecedor</i>	1.000 R\$ / unidade	20.000	38.000
E = (A-B)*C/D	Cálculo simplificado de retorno para escolha do Bem de Capital			—	0,0021	0,0013
F	Know-how público	Variável	<i>Mercado</i>	—	0,90	
G	Custo variável agrícola	Parâmetro	<i>Canavial</i>	R\$ / t cana produzida	30	
H	Preço da terra	Parâmetro	<i>Mercado</i>	R\$ / t cana produzida por safra	50	
I	Custo de renovação do Canavial	Parâmetro	<i>Mercado</i>	R\$ / 1.000 t cana aumento produção	30	
J	Capacidade Bem de Capital	Parâmetro	<i>Bem de Capital no Fornecedor</i>	1.000 t cana / safra	600	
K	Custo fixo da Usina	Parâmetro	<i>Usina</i>	1.000 R\$	100	
L	Potencial de Produção	Variável	<i>Canavial</i>	1.000 t cana / safra	1.020	
M=C*F*A	Incremento de receita estimada por mil toneladas de cana			R\$ / 1.000 t cana	54	
N = C*F*B+G	Incremento de custo estimada por mil toneladas de cana			R\$ / 1.000 t cana	46	
O = H+I+D/J	Investimento por mil toneladas de cana			R\$ / 1.000 t cana	113	
P = K/(L*O)	Rateio do custo fixo			—	0,0009	
Q = (M-N)/O-P	Taxa de retorno da nova Usina	Variável	<i>Proprietário</i>	—	0,07	

**Tabela 19:** Retorno estimado da construção de uma nova *Usina* na primeira iteração

Fonte: Elaboração própria

### 3.3.5.4 A escolha pelo *Proprietário* de como investir

No exemplo, o *Proprietário* tem um total de cinco opções de investimento em cada uma das duas iterações apresentadas. Ele pode renovar o *Canavial C*, renovar o *Cana-*

<sup>12</sup> O *Proprietário* altera um parâmetro booleano localizado no *Canavial* correspondente. A variável que representa a produção agrícola do *Canavial* lê o parâmetro booleano e iguala a produção ao potencial de produção do *Canavial*

vial *D*, comprar um *Bem de capital A* para sua *Usina*, comprar um *Bem de capital B* para sua *Usina* e construir uma nova *Usina*. Ele estima o retorno de cada uma dessas opções, conforme demonstrado nas Tabelas 17, 18 e 19, monta uma lista ordenada das opções e investe sequencialmente. Sendo o parâmetro *II* igual a 0,2, ele investirá em todas as opções cujo retorno esperado for superior a 0,2 enquanto ele tiver caixa suficiente para tal.

A lista de opções ordenadas para cada iteração assim como o interesse do *Proprietário* em investir, o custo dos investimentos e a disponibilidade de caixa para tal estão representados na Tabela 20.

Na primeira iteração, somente duas opções apresentam retorno esperado acima do valor de *II*. São elas a renovação dos *Canaviais C* e *D*. O *Proprietário* faz a renovação do *Canavial C*, primeira opção na lista, e segue para o próximo item. O segundo item da lista é a renovação do *Canavial D*. Essa opção tem custo zero porque este *Canavial* foi renovado na iteração imediatamente anterior. Assim sendo, sua produção efetiva já se iguala a sua produção potencial, não existindo no modelo espaço para sua renovação.

O retorno estimado do terceiro item da lista, a criação de uma nova *Usina*, apresenta retorno esperado abaixo do mínimo estabelecido por *II* e, portanto, este item e os seguintes são ignorados. O caixa restante após esta operação é o caixa inicial da segunda iteração. Estes recursos, somados ao resultado do fluxo de caixa da segunda iteração, são os recursos disponíveis para o investimento na segunda iteração.<sup>13</sup>

Na segunda iteração a dinâmica é um pouco mais complexa. A opção com maior retorno esperado é a compra do *Bem de capital A*. Uma vez feito este investimento, é necessário rever o retorno esperado da compra de *Bens de capital*. Na Tabela 20 vê-se que os retornos esperados da compra eram 0,46 para o *Bem de capital A* e 0,28 para o *Bem de capital B*, fazendo deles, respectivamente, a primeira e a terceira melhores opções de investimento. Entretanto, conforme explicado na Tabela 18, uma vez feita a compra do *Bem de capital A* o cenário é alterado. A cana-de-açúcar disponível para processamento pelo novo *Bem de*

---

<sup>13</sup> Como os recursos disponíveis para o investimento na segunda iteração são inferiores aos recursos disponíveis após os investimentos na primeira iteração é possível perceber que a segunda iteração apresentou um fluxo de caixa negativo. Isto deve-se à produção muito excessiva de cana-de-açúcar. O aumento na receita resultante da maior produção total é mais que compensado por um aumento significativo dos custos agrícolas. Com a compra de mais *Bens de capital*, o *Proprietário* volta a ter resultados positivos na terceira iteração.

*capital* a ser comprado passa de 807 mil toneladas para 207 mil toneladas. Como resultado disso, o retorno estimado dos *Bens de capital A* e *B* passam a ser, respectivamente, 0,16 e 0,07.

Opção de Investimento ordenada	Retorno estimado na primeira iteração	Custo do Investimento (R\$)	Interesse em investir	Caixa disponível após investimento
	—	—	—	58.551
<b>1</b> Renovação do <i>Canavial C</i>	0,42	29.700	Sim	28.851
<b>2</b> Renovação do <i>Canavial D</i>	0,25	0	Sim	28.851
<b>3</b> Nova <i>Usina</i>	0,07	115.600	Não	28.851
<b>4</b> Compra do <i>Bem de Capital A</i>	0	20.000	Não	28.851
<b>5</b> Compra do <i>Bem de Capital B</i>	0	38.000	Não	28.851

Opção de Investimento ordenada	Retorno estimado na Segunda iteração	Custo do Investimento (R\$)	Interesse em investir	Caixa disponível após investimento
	—	—	—	20.359
<b>1</b> Compra do <i>Bem de Capital A</i>	0,46	20.000	Sim	359
<b>2</b> Renovação do <i>Canavial C</i>	0,42	0	Sim	359
<b>3</b> Compra do <i>Bem de Capital B</i> (antes da compra do <i>Bem de Capital A</i> )	0,28	38.000	—	359
<b>4</b> Renovação do <i>Canavial D</i>	0,25	4.050	Sim	359
<b>5</b> Compra do <i>Bem de Capital A</i> (Segunda unidade)	0,16	20.000	Não	359
<b>6</b> Nova <i>Usina</i>	0,08	113.700	Não	359
<b>7</b> Compra do <i>Bem de Capital B</i> (depois da compra do <i>Bem de Capital A</i> )	0,07	38.000	Não	359

**Tabela 20:** Retornos estimados das opções de investimentos

Fonte: Elaboração própria

Assim sendo, o *Proprietário* compra uma unidade do *Bem de capital A*, prossegue para a renovação sem custo do recém renovado *Canavial C* e segue para o quarto item da lista, a renovação do *Canavial D*. Apesar de considerar esta opção como interessante, o *Proprietário* não dispõe mais de recursos suficientes para implementá-la. Consequentemente, as opções des-

te ponto em diante da lista são ignoradas e os recursos restantes são deixados como caixa para a próxima iteração.

A compra de um *Bem de capital* exige a criação de uma nova instância deste tipo de objeto, copiada a partir do modelo existente no *Fornecedor*, além da redução das disponibilidades do *Proprietário* no valor do preço do *Bem de capital*.

O investimento em uma nova *Usina* exige também a criação de instâncias novas de objetos. É necessário criar uma nova *Usina* e seu respectivo *Canavial*. Tendo em vista que o potencial de produção agrícola do *Canavial* cresce ao longo das iterações, este é igualado, para o novo *Canavial*, ao potencial agrícola médio de todas as iterações de *Canavial* do modelo. Os custos fixos da *Usina* e variável agrícola do *Canavial* são definidos por sorteios aleatórios de uma distribuição uniforme com limites inferiores e superiores definidos por parâmetros a serem determinados pelo pesquisador.

A parte industrial da *Usina* não é instalada de imediato. A compra de *Bem de capital* para equipá-la passa a compor o conjunto de investimentos possíveis. Caso seja criada uma *Usina* em uma iteração, um *Bem de capital* para ela poderá ser comprado na iteração seguinte e sua produção somente poderá ter início em ainda mais uma iteração. Desta forma, o cronograma de investimento no modelo assemelha-se ao real, visto que, certo período de espera é necessário até que a produção de cana-de-açúcar seja suficiente para iniciar a operação de uma nova *Usina* (ver seção 1.1) e que é necessário algum tempo de espera entre a compra do *Bem de capital* e sua operação.

Independente da opção escolhida não existem formas de desfazê-la. Isto está em linha com a irreversibilidade do investimento, de forma que o custo do investimento representa um *sunk-cost*.

No exemplo apresentado neste capítulo é possível ver a dinâmica completa de uma iteração do modelo. São apresentados parcialmente dois momentos,  $t=1$  e  $t=2$ , e duas iterações, a primeira iteração, que se segue a  $t=1$ , e a segunda iteração, que se segue a  $t=2$ .

No lado do *Fornecedor*, tem-se a evolução da produtividade dos *Bens de capital* disponíveis para investimento, mostrada nas Tabelas 9 e 10. No lado do *Proprietário* tem-se, primeiro, a produção de cana-de-açúcar nos *Canaviais*, apresentada nas Tabelas 11 e 12. Em seguida, com base nas características percebidas de seus *Bens de capital*, a *Usina* distribui essa cana-de-açúcar para a produção, conforme as Tabelas 13 e 14. A produção do produto final

pelos *Bens de capital* dá-se, então, de acordo com a Tabela 15. Finalmente, o *Proprietário* concentra o fluxo de caixa, detalhado na Tabela 16, e conhece suas disponibilidades para investimento.

Deste ponto em diante, o modelo foca-se na decisão de investimento, tomada pelo *Proprietário*. Ele calcula os retornos esperados de suas opções de investimento, a saber, a renovação dos *Canaviais* (Tabela 17), a compra de *Bens de capital* (Tabela 18) e a construção de uma nova *Usina* (Tabela 19). De posse dessas informações, o *Proprietário* toma as decisões de investimento, conforme apresentado na Tabela 20.

### **3.4 Considerações sobre o modelo**

Como qualquer tentativa de modelagem, o modelo aqui proposto exige simplificações e adaptações. Como estas não são sempre facilmente visíveis, é necessário destacar algumas das mais importantes. A compreensão de como o modelo aproxima-se e afasta-se da realidade é de suma importância para o adequado uso deste e deve ser sempre insumo para a parametrização do modelo e para análise de seus resultados.

Conforme discutido em seções anteriores deste capítulo, o modelo desenvolvido busca incorporar um conjunto de hipóteses sobre a agroindústria canavieira e seus tomadores de decisão, em especial hipóteses sobre os fatores relevantes à decisão de investimento. A Tabela 21 apresenta um resumo das hipóteses e fatores elencados por Piacente (2010) e o paralelo dessas no modelo, de acordo como este foi elaborado.

As usinas representadas no modelo produzem um único produto final. Essa simplificação elimina a necessidade de definir funções de comportamento referentes à decisão de qual composição de produtos produzir. Está implícito o pressuposto de que o número de usinas capazes de alterar significativamente a proporção de seus produtos finais é o suficiente para garantir alguma correlação entre os preços do açúcar e do etanol. Fica também implícito que os outros produtos cujos preços não são fortemente impactados pelos ciclos da agroindústria canavieira, como por exemplo a energia elétrica, são pouco relevantes no faturamento das usinas, sendo portanto insuficientes para atenuar o impacto das flutuações de preço do etanol e do açúcar.

Fator para escolha entre tecnologias segundo Piacente (2010)	Forma de apresentação no modelo	Comentário
Simplicidade de operação	Know-how	Um menor valor de know-how resulta em menor capacidade de operar eficientemente e aumenta o tempo necessário para aprendizado
Eficiência na extração	Produtividade do <i>Bem de capital</i>	Maior eficiência de extração implica maior volume de açúcar para um mesmo volume de cana-de-açúcar, similar ao efeito de uma maior produtividade do <i>Bem de capital</i>
Eficiência de custos	Custo variável industrial do <i>Bem de capital</i>	Maior eficiência de custos implica menores custos para o mesmo volume de açúcar, similar ao efeito de menor custo variável do <i>Bem de capital</i>
Flexibilidade de escala de operação	—	Fator não representado no modelo pois nele todos os Bens de capital são completamente flexíveis.
Sinergias com outras etapas	Produtividade do <i>Bem de capital</i>	Dado que a produtividade do <i>Bem de capital</i> reflete a produtividade total de todo o processo da cana-de-açúcar ao produto final, menores sinergias refletem em uma redução desta produtividade
Capacidade de processamento de cana-de-açúcar	Capacidade do <i>Bem de capital</i>	Um dos <i>Bens de capital</i> do tipo terno de moenda tem capacidade muito inferior aos outros <i>Bens de capital</i> , permitindo o ajuste de capacidade e o fracionamento do investimento
Facilidade de fracionamento do investimento		
Disponibilidade de mão-de-obra capacitada para a tecnologia	—	Fatores relacionados ao forte ciclo de expansão fora das áreas tradicionais. O modelo somente representa o período prévio a esse.
Acesso a manutenção e serviços	—	
Disponibilidade e prazo de entrega do bem de capital	—	
<i>Sunk-costs</i> envolvidos	Preço do <i>Bem de capital</i> e irreversibilidade do investimento	O preço do Bem de capital representa um valor que, quando feito o investimento, não pode ser recuperado e, portanto, caracteriza um sunk-cost. Apesar de mais produtivo, o maior preço do difusor pesa negativamente na decisão de investimento. A menor capacidade do terno de moenda pesa positivamente na decisão de investimento por permitir o fracionamento deste.
Incerteza envolvida	Preço do Bem de capital, irreversibilidade do investimento e preço do produto final	O preço do produto final pode reproduzir a volatilidade dos preços reais pelo uso de uma série temporal. Isso dá relevância à possibilidade de fracionar o investimento.

**Tabela 21:** Fatores relevantes à decisão de investimento e sua representação no modelo.

Fonte: Elaboração própria

A estrutura de custos do processo produtivo foi resumida a um custo fixo por *Usina* e custos variáveis de acordo com a produção total de *Canavial* e de *Bem de capital*. O custo fixo deverá incluir a depreciação das instalações da *Usina* e o custo de remunerar o capital necessário à instalação da *Usina* e do *Canavial*. Somente são precificados separadamente o custo de compra de terra, incorrido no momento de criação de uma nova usina, e o custo compra de *Bem de capital*.

A configuração do parâmetro *P2*, responsável pelo limite inferior de produtividade aceita pela *Usina* na produção, deve levar em consideração o retorno do investimento. Dado um tempo máximo de retorno do investimento exigido pelo *Proprietário* é possível calcular a produtividade mínima por ele aceita antes de considerar necessário substituir um *Bem de capital*, definindo assim o valor que ele exigirá de *P2*. De forma similar, se for determinada uma taxa mínima de retorno do investimento exigida pelo *Proprietário*, resultado, por exemplo, de seu custo de captação de recursos financeiros, será possível determinar um valor adequado para *P2*

Como o retorno mínimo exigido do investimento pelo *Proprietário* é representado pelo parâmetro *II*, existe uma ligação entre valores deste e de *P2*. *II* também está ligado à estratégia adotada pelo *Proprietário*. Uma estratégia de mercado mais agressiva estará associada a valores menores de *II*, enquanto que estratégias mais conservadoras a valores maiores.

Devido à dificuldade de modelar realisticamente esses fatores, não foram incluídos no modelo o setor financeiro e o arrendamento de terras. De forma implícita eles foram incorporados a outros parâmetros. Considera-se que o custo financeiro de endividamento da *Usina* esteja refletido no parâmetro *II*. De forma similar, o custo variável do *Canavial* deve ser uma média ponderada dos custos de produção própria e de arrendamento. Não está representado o poder de alavancagem propiciado pelo setor financeiro.

Enquanto o processo produtivo da agroindústria canavieira é cíclico, determinado pelo ciclo agrícola da cana-de-açúcar, o processo produtivo representado no modelo é discreto, mas não cíclico. Cada iteração do modelo é um ciclo completo de produção agrícola e industrial e de investimentos, mas não existem representações de ociosidade e de

pico ou diferentes etapas da produção agrícola (trato, crescimento, maturação, colheita, etc) como existe nos processos reais. Essa divergência não é relevante se cada iteração do modelo representar um ciclo produtivo real, portanto um período de um ano. Essa informação é importante para a definição de parâmetros do modelo como volume de produção agrícola do canavial e capacidade do bem de capital, que devem equivaler a valores anualizados.

Finalmente, este modelo diverge na representação do progresso técnico usualmente encontrada em modelos de simulação evolucionários. Com foco no processo de difusão de uma tecnologia incorporada ao bem de capital, a única representação endógena do progresso técnico é o crescimento da produtividade dos tipos de *Bem de capital* ofertados.



## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES**

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas e os resultados obtidos. A primeira seção contém uma descrição da inicialização do modelo, incluindo parâmetros, valores de variáveis defasadas e instâncias iniciais de cada objeto. A segunda parte apresenta alguns resultados obtidos das simulações e uma análise destes.

O modelo contém mais de quarenta parâmetros e variáveis distribuídos em sete tipos de objetos. Cada instância de cada objeto exige sua própria inicialização e produz suas próprias séries de dados. Disso decorre que a inicialização do modelo exige a definição de milhares de valores iniciais e os resultados obtidos de cada simulação incluem centenas de milhares de pontos de dados. Assim sendo, o foco do capítulo não estará no detalhamento dos valores e das séries de dados, mas estará em apresentar os métodos de definição dos valores de inicialização, explicar os cenários elaborados e ajudar na compreensão dos resultados obtidos.

### **4.1 Inicialização**

Um modelo de simulação parte de um conjunto de informações, denotado estado inicial. As funções que definem o comportamento das variáveis do modelo configuram um conjunto de cálculos a serem executados a partir deste estado inicial, resultando em um novo estado da constelação de variáveis e parâmetros. A execução completa de todos esses cálculos caracteriza uma iteração. Ao término de uma iteração o estado obtido das variáveis e parâmetros passa a ser o estado inicial para uma próxima iteração. Este ciclo é repetido por quantas vezes julgar-se necessário ou relevante.

Um estado é um conjunto completo de informações, contendo todos os dados de que o modelo precisa para computar uma iteração. Dependendo da estrutura e das funções do modelo, este conjunto pode conter valores de parâmetros, valores prévios de variáveis e número de repetições de cada objeto em sua estrutura hierárquica. Também pode ser necessário fornecer uma forma de obtenção de números pseudoaleatórios. Em geral isso é feito por um algoritmo que, dado um número denotado semente aleatória, gera uma sequência de números pseudoaleatórios. A cada semente corresponde uma sequência única de números.

Dados um estado contendo estas informações e um modelo, com a definição de sua estrutura e suas equações, o resultado a ser obtido é único, o que significa que, com informação suficiente, os resultados obtidos devem ser replicáveis.

Em modelos de simulação baseados em agentes, devido à existência de relações não lineares e ciclos de realimentação das variáveis, muitas vezes os resultados não são previsíveis a partir das configurações iniciais. Disso decorre a importância de se estudar o modelo desenvolvido em diversas condições e de se observar o comportamento deste nestas condições. A alteração controlada de algumas definições do estado inicial pode gerar diferentes simulações a serem comparadas.

A realização de diversas simulações com os mesmos parâmetros e variáveis alterando somente a semente aleatória permite avaliar a estabilidade dos resultados. Evita-se, assim, que um resultado extremamente improvável, devido à semente aleatória utilizada, seja tomado como resultado representativo. O estudo de uma rodada de simulação cuja semente aleatória tenha resultado em séries significativamente divergentes daquelas obtidas com outras sementes aleatórias pode levar a *insights* interessantes, principalmente ao permitir identificar as condições a partir das quais e mecanismos pelos quais se obtém essa excepcionalidade (VALENTE, 2002). Apesar disso, para o estudo proposto a consistência do resultado obtido pelo uso de diversas sementes aleatórias é mais interessante, uma vez que ela indica que o resultado deriva da estrutura do modelo (PEREIRA, M., 2012).

Por outro lado, a realização de diversas simulações alterando um parâmetro ou variável ou um conjunto de parâmetros e variáveis permite avaliar a sensibilidade do sistema a este parâmetro ou variável ou este conjunto de parâmetros e variáveis específicos. Uma variável ou parâmetro pode afetar o comportamento de agentes do modelo e pode redefinir os efeitos de realimentação ao longo das simulações, acarretando em um novo resultado não previsível a priori. A forma como o modelo responde a essas alterações de parâmetros e variáveis ajuda a identificar a relevância destes nos processos representados no modelo.

Enquanto a maior parte dos parâmetros e variáveis deste modelo têm restrições impostas pelo mundo real ou pelo próprio modelo, alguns são de determinação livre. As restrições impostas pelo mundo real incluem, por exemplo, a impossibilidade de preços ou de volumes

negativos. As restrições impostas pelo modelo incluem valores para variáveis que levariam à explosão ou implosão dos valores das variáveis do modelo. Dentro dessas limitações impostas, o escopo da maior parte dos parâmetros é ainda mais reduzido por dados disponíveis. Por exemplo, informações de custos de usinas permitem determinar uma faixa válida para estes valores.

Finalmente, alguns parâmetros têm significado na determinação dos padrões de comportamento dos agentes tomadores de decisão. Estes parâmetros não possuem paralelo nos dados coletados sobre o mundo real e não são abordados na análise tomada como base para elaboração do modelo. Assim, seus valores são determinados de forma a configurar cenários. O objetivo é que o exame dos resultados destes cenários, em suas similitudes e diferenças, permita entender se estes parâmetros serão relevantes na difusão da nova tecnologia no modelo. A existência de divergência significativa entre os resultados dos cenários indicará que estes parâmetros representam fatores relevantes à difusão de tecnologias de extração de sacarose na agroindústria canvieira. Por outro lado, a inexistência desta divergência indicará que esses fatores não são determinantes para tal difusão, com o resultado observado nas simulações sendo decorrente da estrutura do modelo e, portanto, das hipóteses que o embasaram.

A maior parte das decisões acerca da inicialização do modelo foram feitas baseadas em dados do mundo real. Parâmetros relacionados à produção e a fatores técnicos foram retirados principalmente de BNDES e CGEE (2008) e de CGEE (2009). Informações sobre o fluxo de caixa das usinas, volumes de produção, custos fixos e de oportunidade e retorno esperado do capital foram baseados majoritariamente em Pecege (2009a, 2009b) e Oliveira e Nachiluk (2011).

A maior parte das variáveis e parâmetros foi inicializada com um único valor em todas suas instâncias. Por exemplo, o parâmetro de crescimento da produção potencial dos *Canaviais* é sempre  $1,015$ , o que significa que a produtividade latente de todos os *Canaviais* cresce  $1,5\%$  ao ano no modelo. Outras variáveis e parâmetros foram inicializados individualmente para cada instância. Nestes casos, foi utilizada uma inicialização aleatória por uma distribuição uniforme, dados um máximo e um mínimo. Por exemplo, cada *Canavial* tem seu próprio custo variável agrícola, determinado aleatoriamente entre  $30$  e  $40$ . Diverge desta lógica somente a inicialização do *know-how*. Cada *Usina* pode ter *know-how* inicial  $0,90$  ou  $0,95$  para uma tec-

nologia. *Usinas* que utilizem desde a primeira iteração ternos de moenda terão *know-how* associado a esta tecnologia igual a 0,95 e *know-how* associado a difusores igual a 0,90. Para *Usinas* que iniciem utilizando difusores os valores se invertem.

Diversas rodadas de simulação foram feitas para eliminar as configurações de parâmetros iniciais que resultavam em colapso ou comportamento explosivo do modelo. Este teste é importante principalmente para os parâmetros de comportamento, cujos valores não podem ser comparados com séries reais de dados.

A partir dos resultados obtidos, uma inicialização básica foi definida e alguns itens de sua configuração podem ser vistos na Tabela 22.

Parte do Modelo	Tipo	Localização no modelo	Exemplo de uso	Valores	
				Mínimo	Máximo
Preço da terra	Parâmetro	<i>Mercado</i>	Taxa de retorno de criação de uma nova <i>Usina</i>	25	
Multiplicador da produtividade mínima	Parâmetro	<i>Usina</i>	Decisão de <i>scrapping</i> de <i>Bem de capital</i>	0,95	
Variância da percepção de produtividade	Parâmetro	<i>Usina</i>	Ordenamentos dos <i>Bens de capital</i> para alocação de cana	0,01	
Custo de renovação	Parâmetro	<i>Mercado</i>	Renovação do <i>Canavial</i>	27,50	
Crescimento da produção potencial dos <i>Canaviais</i>	Parâmetro	<i>Canavial</i>	Produção potencial dos <i>Canaviais</i>	1,015	
Decrescimento da produção efetiva dos <i>Canaviais</i>	Parâmetro	<i>Canavial</i>	Produção efetiva dos <i>Canaviais</i>	0,88	
Custo fixo por <i>Usina</i>	Parâmetro	<i>Usina</i>	Fluxo de caixa	28.000	34.000
Custo variável agrícola	Parâmetro	<i>Canavial</i>	Fluxo de caixa	30	40
Caixa	Variável	<i>Proprietário</i>	Fluxo de caixa	50.000	
<i>Know-how</i> ternos de moendas	Variável	<i>Usina</i>	Produção do produto final	0,90	0,95
<i>Know-how</i> difusores	Variável	<i>Usina</i>	Produção do produto final	0,90	0,95
Produção potencial de cana-de-açúcar	Variável	<i>Canavial</i>	Renovação do <i>Canavial</i>	2.000	
Produção efetiva de cana-de-açúcar	Variável	<i>Canavial</i>	Produção de cana-de-açúcar	1.800	
Variância do crescimento da produtividade	Variável	<i>Fornecedor</i>	Crescimento da produtividade dos <i>Bens de capital</i> no <i>Fornecedor</i>	1,8	

**Tabela 22:** Itens selecionados da inicialização básica do modelo

Fonte: Elaboração própria.

Cada simulação tem início com 300 instâncias de *Usina*, distribuídas em 135 instâncias de *Proprietário*. O menor *Proprietário* começa com uma *Usina*, representando uma usina que é unidade produtiva e administrativa. O maior *Proprietário* começa com 15 instâncias de *Usina*, representando um grupo econômico de usinas. A distribuição inicial é de 90% das instâncias de *Usina* operando com moedas e 10% delas operando com difusores, sendo que a maior parte das instâncias de *Proprietário* tem sob si somente um tipo de tecnologia.

	<i>Mercado</i>	<i>Fornecedor</i>	<i>Proprietário</i>	<i>Usina</i>	<i>Canavial</i>	<i>Bem de Capital</i>
<b>Parâmetros</b>	16	5	5	7	1	5
<b>Variáveis</b>	10	1	7	7	2	2
<b>Total</b>	26	6	12	14	3	7
Dados que compõe a estrutura do modelo (Variáveis + Parâmetros)						
<b>68</b>						

<b>Cada simulação tem início com a seguinte configuração:</b>						
<i>Fornecedor</i> <sup>2</sup>					Número inicial de	
Tipos de <i>Bem de Capital</i>		Número total de	Número inicial	Número inicial	<i>Bem de Capital</i>	
Moenda	Difusor	<i>Proprietário</i> <sup>3</sup>	de <i>Usina</i>	de <i>Canavial</i>	Moenda	Difusor
2	2	135	300	300	540	30

1 Simulação total prevê 8 rodadas X 8 cenários (Tabela25). Foram feitas 20 iterações (20 anos)

2 O setor fornecedor dispõe de número ilimitado de *Bem de capital* de ambas as tecnologias

3 O menor *Proprietário* começa com apenas uma *Usina* e o maior com 15 *Usinas*.

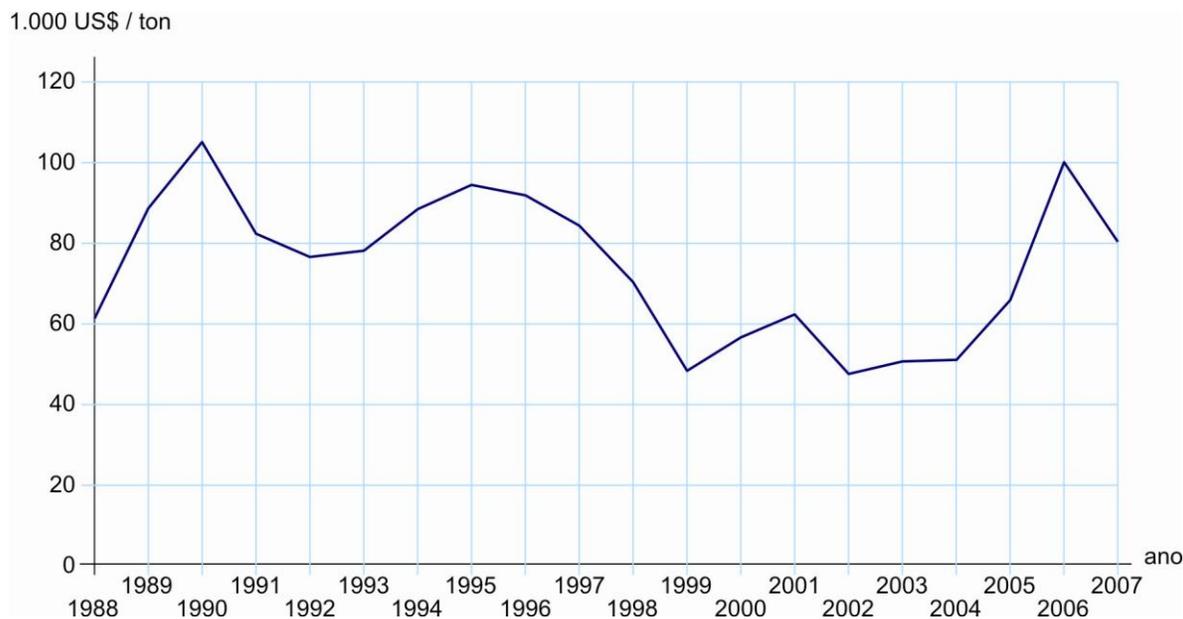
### **Tabela 23:** Elementos que compoem o estado inicial do modelo

Fonte: Elaboração própria

A maior parte dos parâmetros dos objetos *Usina* e *Bem de capital* não é definida igualmente para todas as instâncias destes objetos. Ao invés disso, são determinadas faixas dentro das quais estes parâmetros devem estar. No início da simulação ou no momento em que o objeto for criado<sup>14</sup> é feito, para cada parâmetro, um sorteio aleatório de uma distribuição uniforme dentro da respectiva faixa para determinar seu valor.

<sup>14</sup> Isso aplica-se para objetos criados após o início da simulação. Neste caso, novas unidades de *Usina* ou um novo *Bem de capital*.

O preço de venda do produto final foi determinado de acordo com uma série histórica de preços (FUNCEX, 2012) conforme pode ser visto na Figura 13. O valor da variável preço se altera a cada iteração, mas o valor em cada iteração é pré-definido na inicialização do modelo.



**Figura 13:** Preço das exportações brasileira de açúcar (2006=100)

Fonte: FUNCEX (2012). Elaboração própria

Definida a parametrização básica do modelo, é necessário voltar para as hipóteses a serem avaliadas. Parte dessas hipóteses estão representadas na estrutura do modelo construído (ver seções 3.1 e 3.2), mas parte deve ser representada na inicialização deste. Uma destas hipóteses é o fracionamento do investimento que, a título de exemplo será tratado a seguir.

A possibilidade de fracionamento do investimento trazida pelo terno de moedas é representado pela inicialização do *Fornecedor*.

Quatro opções de *Bem de capital* estão disponíveis no *Fornecedor*, duas de cada tecnologia. Em linha com as hipóteses discutidas e com as comparações entre as tecnologias (ver capítulos 1 e 3), ao serem comparadas aos pares as opções de *Bem de capital*,  $A \times C$ , ou seja os de menor capacidade de cada tecnologia, e  $B \times D$ , os de maior capacidade de cada tecnologia, as opções que representam moedas possuem menor capacidade máxi-

ma, maior preço por capacidade, menor produtividade e maiores custos operacionais. Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 24.

Característica	<i>Bem de capital A</i>	<i>Bem de capital B</i>	<i>Bem de capital C</i>	<i>Bem de capital D</i>
<b>Tipo</b>	Terno de moenda	Terno de moenda	Difusor	Difusor
<b>Produtividade</b>	135,00	135,10	136,80	137,00
<b>Custo variável industrial</b>	85	80	70	65
<b>Capacidade</b>	650	1.300	1.200	1.800
<b>Preço</b>	18.850	36.400	32.400	46.800

**Tabela 24:** Caracterização dos *Bens de capital* no *Fornecedor* no início da simulação

Fonte: Elaboração própria

A partir da Tabela 24 também decorre que, enquanto as opções *C* e *D* de *Bem de capital*, que representam difusores, têm grande capacidade máxima de operação, a opção *A* de *Bem de capital*, representando um dos ternos de moenda, é relativamente pequena. Isto permite a um *Proprietário* escolher expandir a capacidade de uma *Usina* com vários pequenos investimentos ou fazer ajustes finos na capacidade.

O aprendizado necessário para se utilizar eficientemente uma tecnologia é representado por uma diferença no valor inicial do parâmetro *know-how*. Cada *Usina* começa com um valor maior no *know-how* relativo à tecnologia que utiliza. O parâmetro para externalidades e *spillovers*, o *know-how público*, começa igual para ambas as tecnologias e menor que os valores de *know-how* usados nas *Usinas*. Desta forma, a dinâmica do modelo determinará quando o *know-how* público afetará a difusão e com que assimetria entre as tecnologias.

Por fim, há parâmetros que não possuem correspondência nem com dados reais, nem com as hipóteses testadas. A influência destes parâmetros foi estudada por meio de cenários. Há três parâmetros que se enquadram nesta categoria, aos quais foram atribuídos dois valores iniciais diferentes cada, resultando em um total de oito cenários. Todos os ce-

nários foram simulados, mas a compreensão do significado de alguns é mais fácil que de outros.

O primeiro parâmetro foi  $P3$ , que limita a taxa de *learn-by-using*, determinando qual é o máximo possível aprendizado em uma única iteração. O aprendizado pode ser fácil, com  $P3=0,20$ , ou difícil, com  $P3=0,10$ .

O segundo parâmetro foi  $P4$ , que regula externalidades e *spillovers*, controlando o atraso de *know-how* público em relação à média de *know-how*. A propagação de um para o outro pode ser rápida, com  $P4=1$  ou lenta, com  $P4=0,25$ . Isso representa não somente a facilidade com que o conhecimento torna-se público, mas também outras externalidades como a fácil obtenção de peças de reposição ou serviços de suporte.

O último parâmetro utilizado foi  $II$ , que define o retorno mínimo do investimento que o *Proprietário* considera aceitável. Em uma simulação, o *Proprietário* pode ter um comportamento de investimento agressivo, com  $II=0,30$ , ou ter um comportamento mais conservador, com  $II=0,60$ .

Os valores de  $P3$  e  $P4$  foram determinados de acordo com o comportamento observado das funções quando testado as fronteiras do modelo. Os valores para  $II$  foram configurados para manter a compatibilidade com as outras variáveis do modelo. Dada a série de preços e a distribuição de produtividades e custos, a definição  $II=0,30$  resulta que o *Proprietário* mediano decidirá não investir somente nas iterações que correspondem a momentos de crise severa do setor, mas manterá a propensão a investir em momentos de crise amena. Por outro lado, a configuração  $II=0,60$  irá resultar em o *Proprietário* mediano não investir em qualquer iteração de preços mais baixos, mesmo que não significativamente baixos.

Em cada cenário, todos os *Proprietários* têm o mesmo valor de  $P3$ ,  $P4$  e  $II$ , ou seja, enfrentam as mesmas condições de aprendizado e apropriabilidade e têm a mesma agressividade. Isso, entretanto, não significa que tomarão as mesmas decisões. O ambiente microeconômico ao redor de cada *Proprietário*, definido por seu micro-estado, é único, levando cada um deles a tomar decisões únicas. Assim, a análise do deslocamento do *Pro-*

*prietário* mediano feita para definir os valores de *II* avalia o deslocamento da distribuição dos comportamentos dos *Proprietários* conforme altera-se *II*.

Parâmetro	Cenários							
	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>P3</b>	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
<b>P4</b>	1,00	1,00	0,25	0,25	1,00	1,00	0,25	0,25
<b>II</b>	0,30	0,60	0,30	0,60	0,30	0,60	0,30	0,60
<b>learnig-by-doing</b>	fácil	fácil	fácil	fácil	difícil	difícil	difícil	difícil
<b>externalidades positivas</b>	forte	forte	fraca	fraca	forte	forte	fraca	fraca
<b>comportamento de investimento</b>	agressivo	conservador	agressivo	conservador	agressivo	conservador	agressivo	conservador

**Tabela 25:** Cenários e respectivos valores de parâmetros.

Fonte: Elaboração própria.

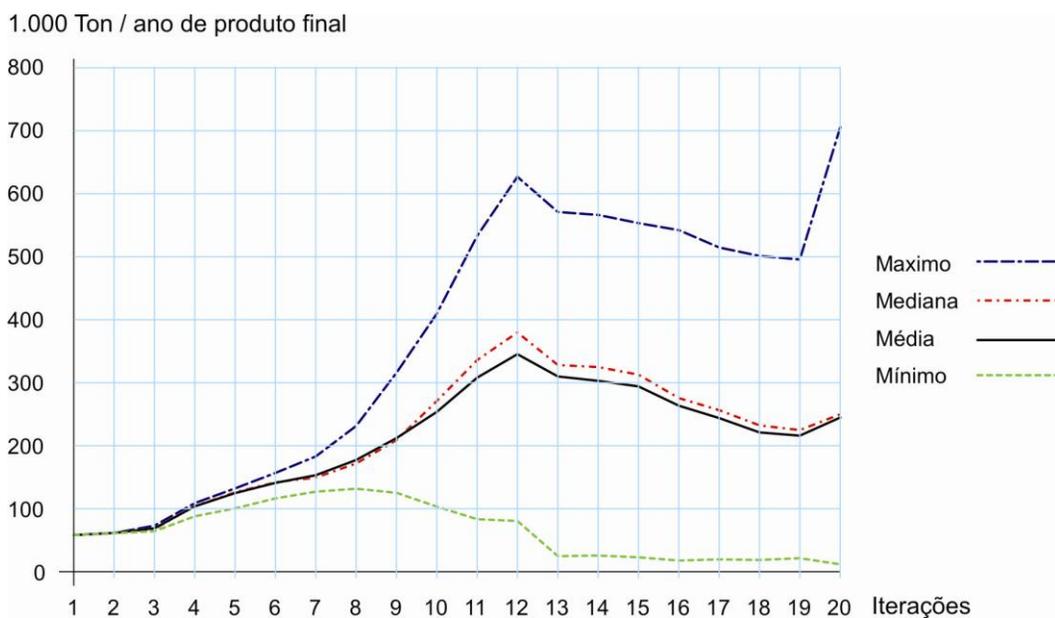
Os cenários foram definidos pelo resultado de todas as combinações possíveis dos valores dos parâmetros considerados, como pode ser visto na Tabela 25. Os cenários *A* e *B* são ambientes onde o aprendizado é fácil tanto por *learn-by-doing* quanto por receber *know-how* externo. Nesse sentido, são os cenários de fácil entrada para a nova tecnologia, cenários “fácil entrada”. Os cenários *G* e *H* estão no outro extremo, com o aumento de *know-how* difícil. Assim, esses são os cenários “difícil entrada”. Os cenários *C* e *D* são de fácil aprendizado, mas esse gera poucos efeitos de *spillover*. Assim, estes cenários são cenários de “alta apropriabilidade”. Em contraponto, os cenários *E* e *F* agregam o difícil aprendizado interno com o fácil aprendizado externo, caracterizando um cenário de “baixa apropriabilidade”. Em cada uma destas quatro categorias de cenários tem-se dois cenários, diferentes entre si somente na agressividade das instâncias de *Proprietário* contidas.

Cada cenário foi rodado oito vezes com valores diferentes de semente aleatória, totalizando 64 simulações. Cada simulação foi rodada por 20 iterações, representando 20 anos.

## 4.2 Resultados

O modelo parece, a princípio, capaz de reproduzir a dinâmica do setor. Heterogeneidade entre os agentes resulta em diferenciais de rentabilidade, incluindo perdas, e diferentes capacidades de sobreviver a baixos preços e expandir. Como mostra a Figura 14, diferente do esperado, o uso dos dois tipos de *Bem de capital* que representam os difusores difundiu-se entre as *Usinas*, atingindo *market shares* relevantes. Entre as muitas séries obtidas a partir das simulações realizadas, algumas são destacadas a seguir para a avaliação dos cenários produzidos.

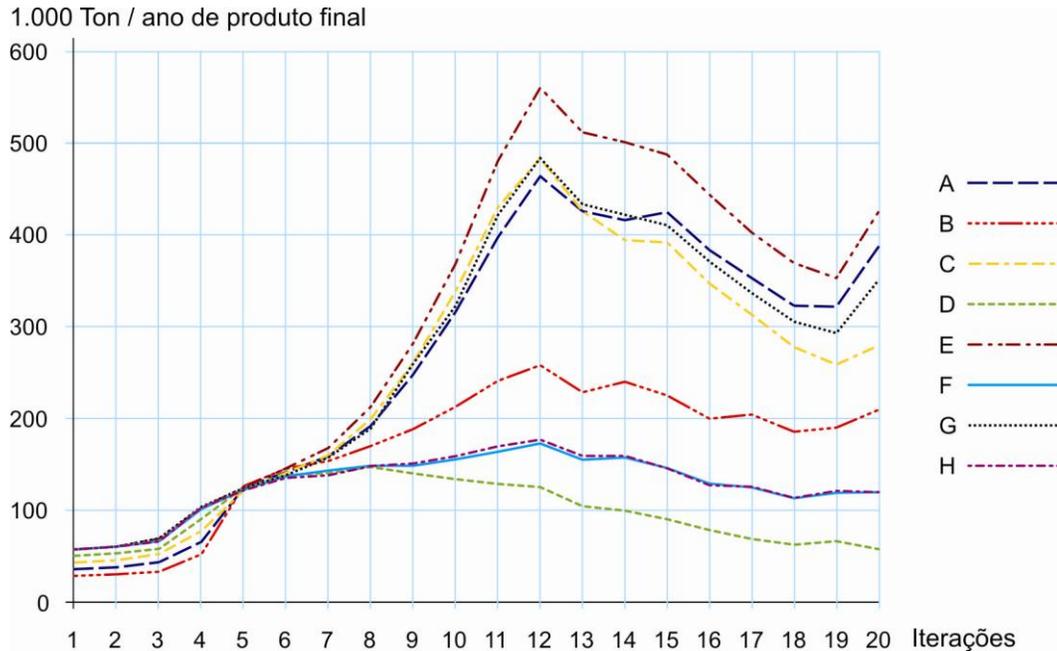
A Figura 14 mostra o resultado mais geral das simulações. São apresentadas séries de volume total de produto final produzido. Cada uma das 64 simulações rodadas gerou uma série de volume total de produto final produzido. Estão presentes na figura a série da simulação que obteve o maior volume de produção ao final das iterações, a série da simulação que obteve o menor volume e a evolução da média e da mediana das 64 séries. Pode-se ver que em geral o modelo foi capaz de reproduzir uma agroindústria canavieira dinâmica.



**Figura 14:** Produção total – todas as simulações.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 15 apresenta as médias de volume total produzido por cenário. Cada série desta figura é a média de 8 séries inicializadas exatamente da mesma forma, divergentes somente pela raiz aleatória utilizada.



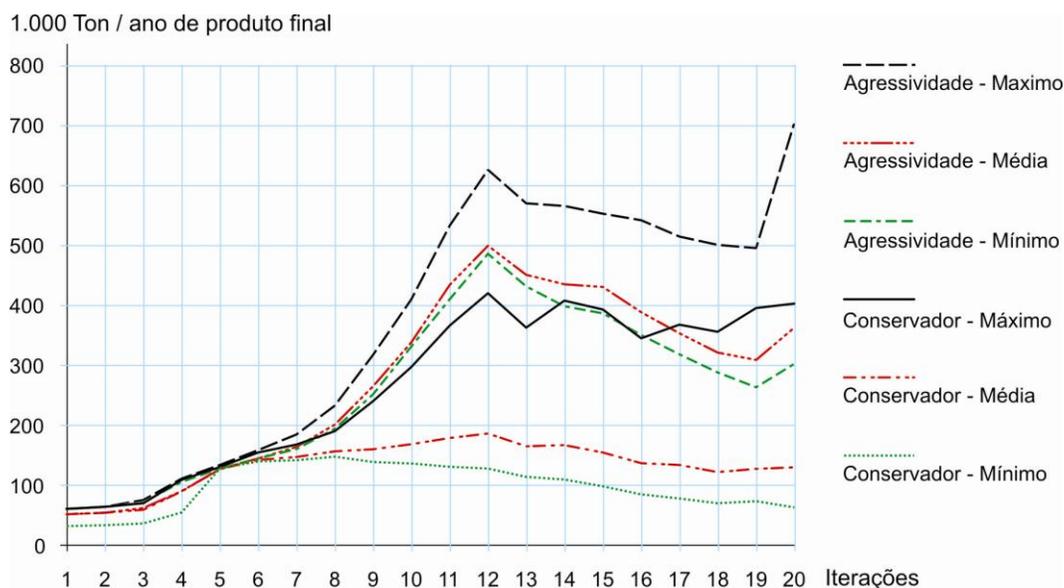
**Figura 15:** Produção total: média por cenário.

Fonte:Elaboração própria.

Estas figuras mostram que a produção total cresce com o tempo para a maioria das simulações. Entretanto, esse comportamento não é idêntico entre elas. Nos cenários A, C, E e G houve um crescimento muito mais forte que nos cenários B, D, F e H. Isto indica que o parâmetro  $II$ , cujo valor é baixo no primeiro grupo e alto no segundo, tem papel relevante na definição do diferencial de performance da produção total.

A figura 16 discrimina as simulações por seus valores de  $II$ . Simulações com um baixo valor de  $II$  são denominadas “agressivas”, incluindo-se as séries correspondentes aos cenários A, C, E e G. Simulações com um alto valor de  $II$  são denominadas “conservadoras”, incluindo-se as séries correspondentes aos cenários B, D, F e H. Desta forma, cada conjunto, “agressivas” e “conservadoras”, tem um total de 32 séries, metade do total de 64

séries. Novamente, as séries indicadas como máximo e mínimo são as séries com maior e menor volumes produzidos na última iteração em seus respectivos grupos. As séries indicadas como média são as médias de seus respectivos grupos.



**Figura 16:**Produção total: efeito de diferentes valores de  $I_1$ .

Fonte:Elaboração própria.

Relutância em investir durante períodos de baixa lucratividade barrou investimentos necessários para manter a alta produtividade e para responder à subsequente subida nos preços. Tendo em vista que a manutenção da produtividade demanda investimentos constantes - frequente renovação do *Canavial* e substituição de *Bens de capital* antigos - a volatilidade observada nos preços e a possibilidade de um período continuado de vários anos de preços deprimidos ou inflados mostram-se um desafio para os tomadores de decisão.

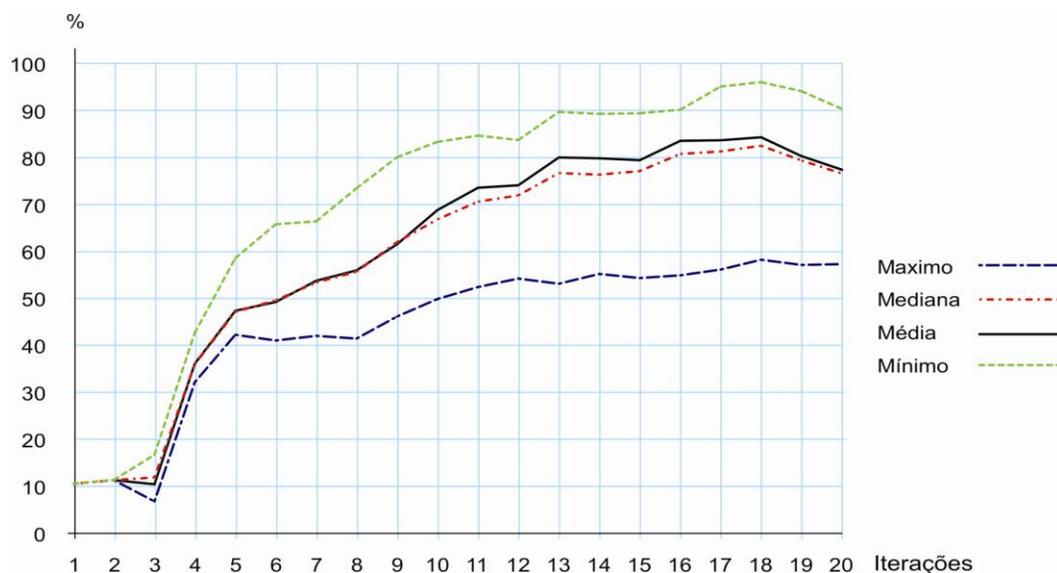
Tendo em vista os mecanismos construídos no modelo, uma *Usina* que não receba investimentos por muitas iterações seguidas exige grandes investimentos para voltar a produzir eficientemente. Seus *Canaviais* estarão muito defasados, tendo custo de renovação alto. Parte de seus *Bens de capital* pode ter caído abaixo do limite de *scrapping*, sendo necessária a compra de novos *Bens de capital* após a renovação do *Canavial*. Neste contexto, um *Proprietário* com poucas *Usinas* pode não ter caixa suficiente para recuperá-la. Caso ele tenha, ainda é possível que uma *Usina* que tenha concentrado os investimentos durante os períodos de pouco

investimento apresente retornos maiores. As formas como são estimados os retornos dos investimentos fazem com que um *Proprietário* considere mais interessante renovar um *Canavial* de uma *Usina* com *Bens de capital* mais eficientes e compre *Bens de capital* para uma *Usina* mais frequentemente se esta tiver renovações de *Canavial* mais frequentes.

O único cenário de baixa agressividade dos decisores no qual houve um crescimento expressivo da produção foi no *B*, um cenário de “fácil entrada”. Neste cenário, o rápido e razoavelmente generalizado avanço de *know-how* tornou as opções de investimento mais atrativas, mitigando o efeito do valor elevado de *II*.

Apesar de ser um resultado interessante, isso tem pouco impacto na difusão da nova tecnologia. Em linha com os modelos apresentados na seção 2.2, o processo de difusão é avaliado utilizando-se o *market share* da nova tecnologia como *proxy*. Um processo de difusão de uma nova tecnologia com sucesso deve apresentar a característica curva em forma *S* mostrada na referida seção. No modelo, o *market share* de uma tecnologia é a participação da produção de produto final utilizando esta tecnologia no total da produção de produto final utilizando ambas as tecnologias.

Como pode ser visto nas Figuras 17 e 18, a tecnologia que representa os difusores ganha parcelas significativas de *market share* em todos os cenários.

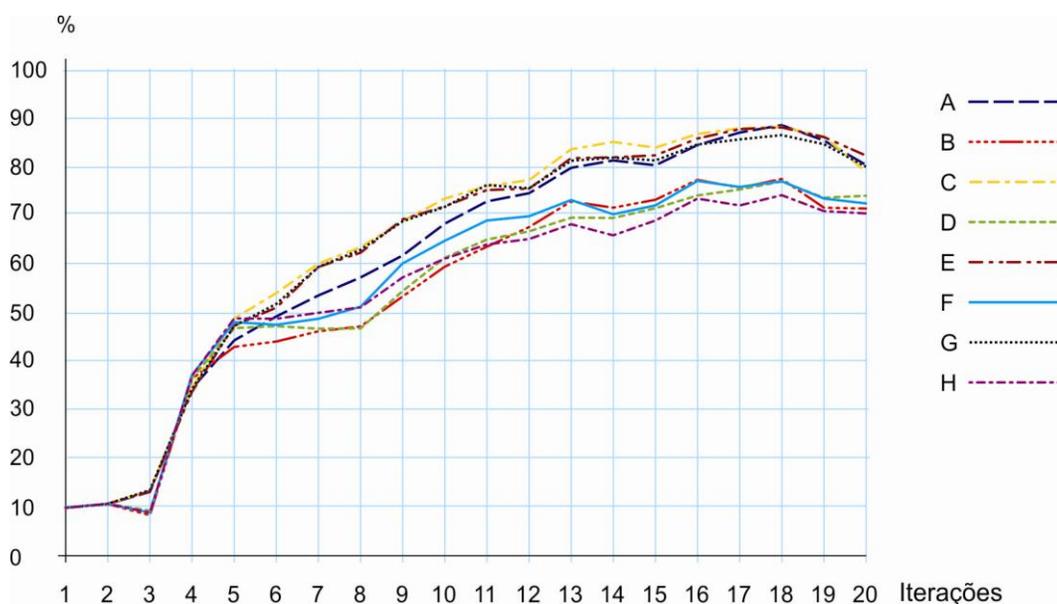


**Figura 17:** *Market share* dos difusores: todas as simulações.

Fonte:Elaboração própria.

A Figura 17 apresenta a evolução do *market share* dos difusores em todas as 64 simulações. As séries indicadas como mínimo e máximo correspondem às séries nas quais, findas as 20 iterações, os difusores detinham, respectivamente, o menor e o maior *market share* dentre todas as simulações. As séries indicadas como média e mediana representam estas estatísticas para todas as 64 simulações.

A Figura 18 apresenta a evolução do *market share* dos difusores segregada por cenário. Cada série apresentada representa a média das 8 séries correspondentes a um cenário, cujas inicializações diferem somente na raiz aleatória utilizada.



**Figura 18:** *Market share* dos difusores: média por cenário.

Fonte: Elaboração própria.

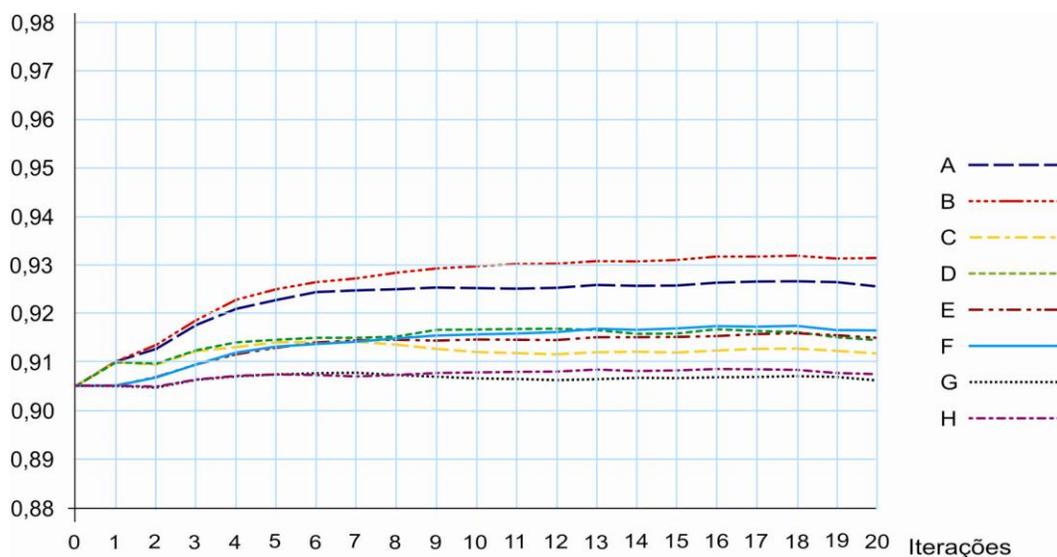
Levando em consideração que a troca de tecnologias implica necessariamente em investimento, visto que esta está materializada no *Bem de capital*, seria de se esperar que cenários marcados por poucos investimentos apresentassem pouca difusão da nova tecnologia. Entretanto, mesmo nos cenários onde houve poucos investimentos e, portanto, pouco crescimento da produção total (cenários *B*, *D*, *F* e *H*) observa-se a difusão da nova tecnologia.

O que os resultados mostram é que a sobrevivência do *Proprietário* em um mercado onde os preços oscilam tão fortemente depende de as instâncias de *Usina* sob ele serem capazes de operar a baixos custos. Em um cenário onde os *Proprietários* têm comportamento de

investimento mais agressivo, a maior parte deles aceita fazer os investimentos necessários à manutenção da eficiência (compra de *Bens de capital* e renovação de *Canaviais*). A parcela destes que optam pela nova tecnologia é maior que a participação inicial desta no estoque de *Bens de capital*. A parcela das *Usinas* que se mantém eficiente o suficiente para sobreviver é maior entre as adotantes dos difusores que entre as adotantes dos ternos de moendas. Esses dois fatores somados alimentam o processo de difusão da nova tecnologia.

Em um cenário onde os *Proprietários* têm comportamento pouco agressivo, poucos deles aceitam fazer os investimentos necessários para a manutenção da eficiência. Assim, poucos sobrevivem e a produção não cresce. Os que não investem em trocar de tecnologia perdem eficiência mais acentuadamente e a sua falência seletiva faz com que a difusão da nova tecnologia ocorra. Isto indica que a agressividade dos *Proprietários* tem impacto assimétrico sobre as tecnologias. As chances de uma *Usina* que utilize difusores conseguir manter-se eficiente sob um *Proprietário* conservador é maior que as chances de uma *Usina* que utilize ternos de moendas.

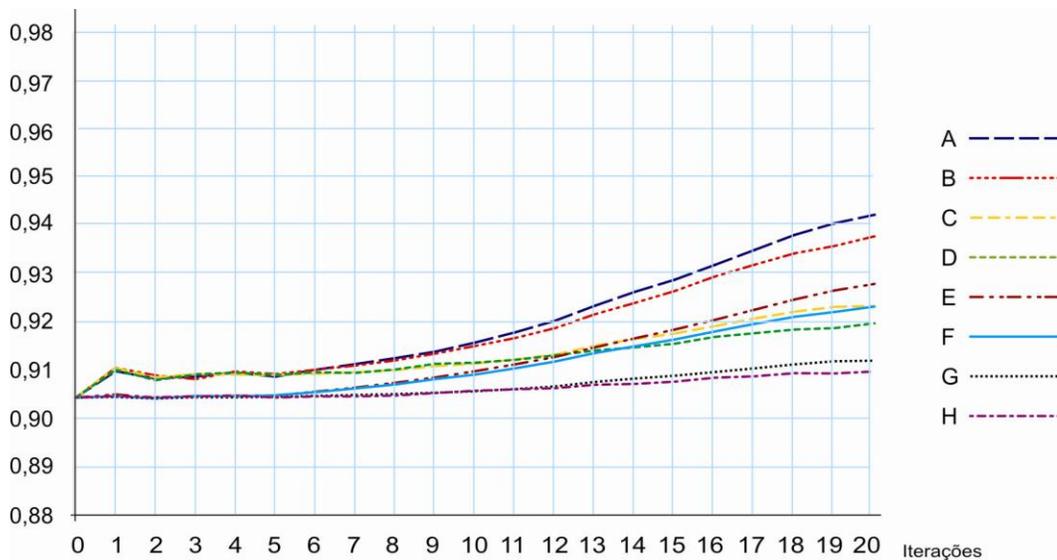
Para entender como o processo de difusão da nova tecnologia pôde ocorrer em todos os cenários, mesmo que com intensidades diferentes, é necessário considerar a dinâmica nas simulações dos *know-hows* público e privado. As Figuras 19 e 20 mostram a evolução por cenário do *know-how* privado associado, respectivamente, aos ternos de moendas e aos difusores.



**Figura 19:** Média de *know-how* dos ternos de moendas por cenário.

Fonte: Elaboração própria.

Para obter-se as séries apresentadas na Figura 19, toma-se, em uma simulação, a média dos *know-hows* associados aos ternos de moendas das *Usinas*. Assim, obtém-se a média aritmética, para essa simulação, do *know-how* desta tecnologia. A média das 8 séries de *know-how* em ternos de moendas em um mesmo cenário compõe uma série da figura. Desta forma são construídas as 8 séries apresentadas, incorporando as informações das 64 simulações feitas.<sup>15</sup> Utilizando a mesma lógica, mas aplicada ao *know-how* associado aos difusores, obtém-se as séries apresentadas na Figura 20.<sup>16</sup>



**Figura 20:** Média de *know-how* dos difusores por cenário.

Fonte: Elaboração própria.

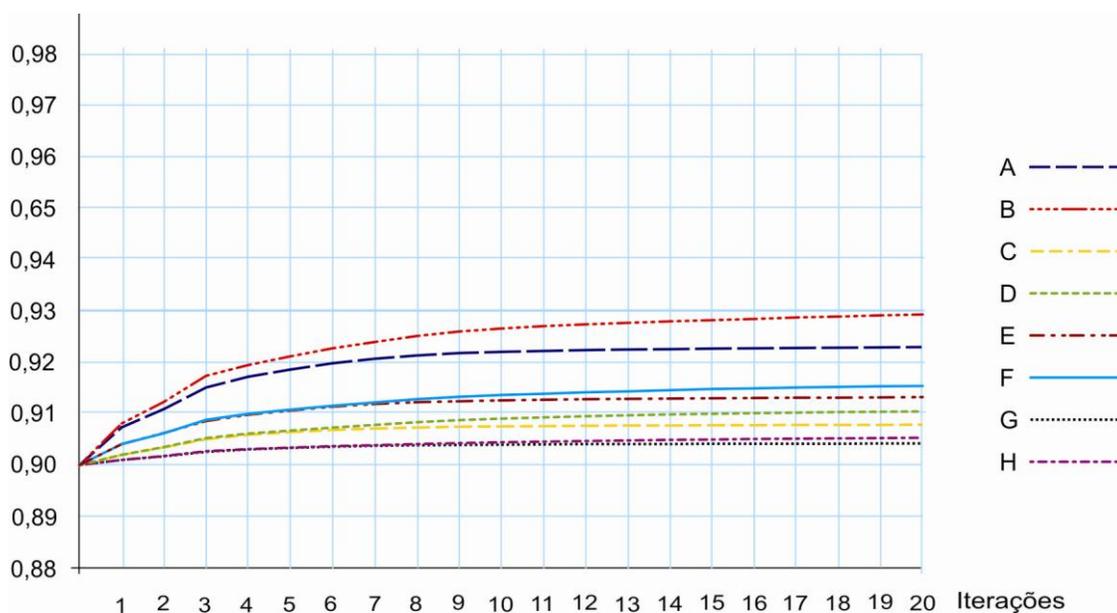
O *know-how* para os ternos de moendas começa mais dinâmico, mas perde fôlego conforme se aproxima do ponto de saturação e conforme a nova tecnologia ganha *market share*. A distribuição dos cenários revela a importância dos parâmetros *P3* e *P4* na definição da velocidade à qual o *know-how* privado evolui. Tanto para os ternos de moen-

<sup>15</sup> Deve-se considerar que a informação de *know-how* médio não reflete a diversidade de *know-hows* entre as *Usinas*. Como apresentado no capítulo 3, as *Usinas* iniciam com *know-how* com valor 0,90 ou 0,95 para cada tecnologia. Conforme a simulação evolui, o *know-how* médio pode se alterar pelo aprendizado das *Usinas*, pela entrada de novas *Usinas* ou pela saída de *Usinas* do modelo. Além disso, o aprendizado pode estar disseminado entre as *Usinas* ou concentrado em algumas delas.

<sup>16</sup> A variável *know-how* é, por sua definição, adimensional. Assim, nenhum dos gráficos de *know-how* apresentados possui unidade de medida.

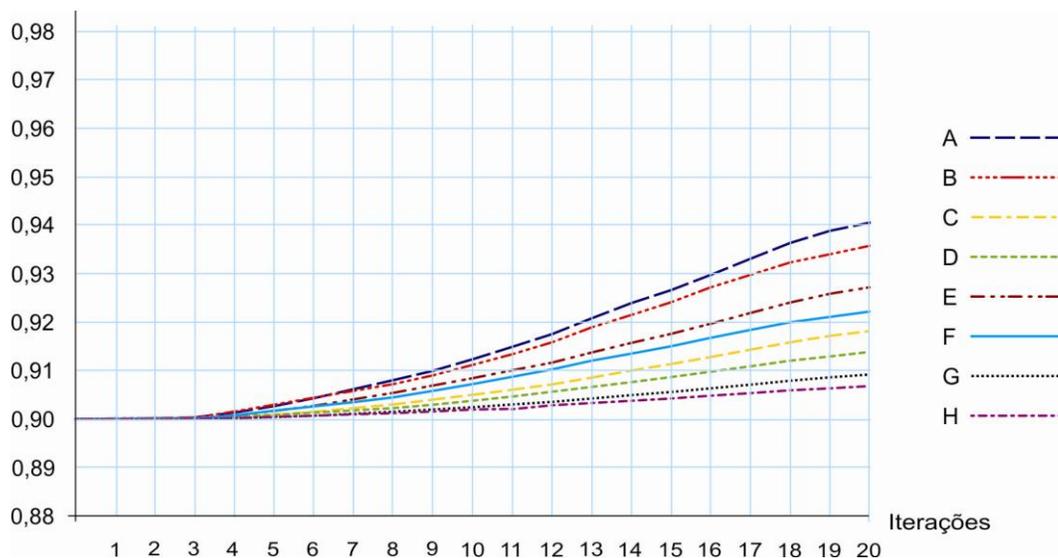
das quanto para os difusores, o *know-how* tem a melhor evolução nos cenários de “fácil entrada” (A e B) e a pior nos cenários de “difícil entrada” (G e H).

As Figuras 21 e 22 apresentam a evolução do *know-how* público médio por cenário. Cada uma das 64 simulações gera duas séries de *know-how* público, uma para ternos de moendas e uma para difusores. Essas séries são geradas de acordo como o explicado em a variável *know-how* (seção 3.3.4.1). Cada série apresentada na Figura 21 é a média das 8 séries de *know-how* público associados a ternos de moenda de um mesmo cenário. As séries da Figura 22 são médias das 8 séries de *know-how* público associado aos difusores de um mesmo cenário.



**Figura 21:** *Know-how* público dos ternos de moendas: média por cenário.

Fonte:Elaboração própria.



**Figura 22:** *Know-how público* dos difusores: média por cenário.

Fonte:Elaboração própria.

Os cenários de “fácil entrada” (A e B) destacam-se pela acentuada evolução do *know-how* público. Os cenários de “difícil entrada” (G e H) destacam-se pela pouca evolução do *know-how* público. Ambos estes movimentos são explicados pelas dinâmicas dos *know-hows* privados nestes cenários, conforme apresentadas nas Figuras 21 e 22. Embora não muito diferentes, os cenários de “baixa apropriabilidade” (E e F) apresentaram um crescimento maior de *know-how* público que os cenários de “alta apropriabilidade” (C e D), como era esperado. Isso mostra que, apesar de afetar a evolução do *know-how*, o parâmetro *P4* parece ter impacto reduzido.

A análise dos dados de produção total e *market share*, apresentados nas Figuras 14, 15, 16, 17, 18, mostra que o difusor resulta em um diferencial competitivo para as *Usinas* que os usam. Assim, no início das simulações, essas *Usinas* são mantidas e ampliadas por seus *Proprietários* e podem acumular mais *know-how* para operar seus *Bens de capital*. Conforme avança o tempo do modelo, dois processos têm lugar. Por um lado, conforme flutuam os preços, as *Usinas* de menor produtividade são eliminadas do mercado. Por outro, conforme o *know-how* associado aos difusores cresce e se torna público, ele viabiliza a um número crescente de *Usinas* migrar dos ternos de moendas para os difusores. Isso configura um ciclo de retroalimentação que se conforma em todos os cenários.

A importância deste ciclo é especialmente visível no cenário *B*. De forma geral, ambos a eliminação seletiva contra os ternos de moendas via mercado e a crescente adoção dos difusores pelo extravasamento de *know-how* atuam para alimentar o processo de difusão. Entretanto, como foi visto, o primeiro mecanismo tem impacto importante no volume total produzido nos cenários onde o *Proprietário* é mais relutante a investir (cenários *B*, *D*, *F* e *H*). Neste quesito destaca-se o cenário *B*. Neste cenário, a evolução dos *know-hows* privados e públicos de ambas as tecnologias é tão acentuada, devido aos valores de *P3* e *P4*, que o mecanismo de extravasamento de *know-how* age como um forte incentivador do investimento. O resultado final destas duas forças é uma posição intermediária deste cenário no volume total produzido, como pode ser visto na Figura 15.

### 4.3 CONCLUSÃO

No capítulo 3 foram apresentadas as hipóteses que se pretende testar no âmbito deste trabalho e foi descrito como estas hipóteses balizaram a construção do modelo a ser utilizado para tal. No presente capítulo foi mostrado como estas hipóteses, em conjunto com dados do mundo real balizaram a inicialização do modelo construído e foram apresentados os resultados obtidos das simulações rodadas.

Uma conclusão importante da análise dos resultados obtidos é que os parâmetros comportamentais para os quais não se tinha uma base que permitisse a definição de valores de inicialização não se mostraram determinantes do processo de difusão. Para avaliar isso, foram construídos cenários que se diferem somente pela inicialização destes parâmetros. Conforme discutido em 4.1, a manutenção do processo de difusão da nova tecnologia em todos os cenários indica que ele resulta da estrutura do modelo construído, e não da inicialização dos parâmetros em questão.

Outro ponto relevante é o entendimento do processo pelo qual a difusão se dá. Foram identificados dois mecanismos que atuam em conjunto. Um primeiro mecanismo é a falência seletiva das *Usinas* com menor produtividade, que afeta desproporcionalmente aquelas que usam os ternos de moendas. O outro é o crescimento e extravasamento de *know-how* associado aos difusores, conforme as *Usinas* que usam esta tecnologia ampliam a produção, passando a viabilizar para outras *Usinas* migrarem para esta tecnologia.

A atuação em conjunto desses dois mecanismos levou, em todas as simulações, à difusão da nova tecnologia. Assumindo que o modelo elaborado e as inicializações utilizadas refletem as hipóteses que se pretendia testar, os resultados mostram que essas hipóteses não são suficientes para explicar o processo de difusão de nova tecnologia de extração de sacarose na agroindústria canavieira.

O esforço despendido para o desenvolvimento e inicialização do modelo foi balizado pelo foco do estudo proposto. As hipóteses testadas não somente definiram a estrutura do modelo, como também reduziram o escopo do universo de inicialização. Como complementação ao estudo aqui desenvolvido, mostra-se interessante realizar testes mais extensivos de inicialização, independente das hipóteses aqui testadas.

Esses testes, como escopo de outro estudo, poderiam evidenciar o comportamento do modelo desenvolvido em outros cenários fictícios. Apesar de ainda restrito às hipóteses que definiram a estrutura do modelo, esses testes permitiram explorar melhor o comportamento do modelo e, assim, sugerir novos insights e novas linhas de pesquisa.

As derivações desta conclusão, retomando as considerações feitas nos capítulos 1 e 2, serão discutidas no próximo capítulo.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS**

O arcabouço teórico desenvolvido nesta dissertação mostra que a construção e utilização de um modelo de simulação baseado em agentes com o intuito de avaliar um conjunto de hipóteses acerca do funcionamento do processo de extração da sacarose na agroindústria canavieira, pode contribuir ao estudo da difusão de nova tecnologia para esta etapa produtiva. Na medida em que o modelo construído refletir as hipóteses em questão, a análise dos resultados dele obtidos permite avaliar essas hipóteses e identificar caminhos para futura pesquisa na área.

Entende-se que, em última instância, a expansão deste conhecimento poderá contribuir para a difusão de outras tecnologias e inovações neste setor. Tendo em vista a importância do setor, principalmente como fonte alternativa de energia, e o volume hoje investido em pesquisas voltadas a ele, esta questão ganha relevância.

Para construir o modelo de simulação que correspondesse ao objetivo proposto, primeiro foi necessário estudar os processos, características e peculiaridades da agroindústria canavieira de forma a obter um entendimento global do processo produtivo. Este conhecimento é de fundamental importância tanto para situar a relevância do processo de extração de sacarose no desempenho do setor, quanto para conseguir obter os dados necessários à construção do modelo. Foram incluídas nesse estudo a etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar, a etapa industrial de processamento desta e as diversas formas como integram as etapas e atividades realizadas no processo produtivo. Em seguida, foi necessário estudar a teoria sobre o processo de difusão e os modelos que dela decorrem, incluindo um estudo dos modelos evolucionários de difusão e dos modelos de simulação baseados em agentes.

Elencadas as hipóteses sobre os fatores responsáveis pela não difusão da nova tecnologia de extração de sacarose, os difusores, pode-se constituir as bases teóricas que balizaram a construção de um modelo de simulação baseado em agentes. A definição do modelo buscou incorporar as características do setor e as teses aventadas. A partir das próprias hipóteses a serem testadas e de dados obtidos do setor o modelo foi inicializado e diversas rodadas de simulação foram realizadas.

Os resultados obtidos são consistentes com o esperado pela teoria de difusão. Tem-se, ao longo do tempo, a progressiva adoção por parte dos agentes de uma tecnologia que, ao menos no modelo, oferece vantagens competitivas. Entretanto, isso não é compatível com o observado nessa indústria no período em questão e é divergente do esperado, dadas as hipóteses utilizadas na formulação do modelo. Assumindo que o modelo elaborado seja adequado ao proposto, a divergência entre os resultados das simulações, que resultaram na difusão da nova tecnologia, e o que de fato se observou na realidade, a não difusão da nova tecnologia, implica na insuficiência das hipóteses para explicar a realidade observada.

As hipóteses que embasaram o modelo reconheciam uma maior produtividade do difusor, entretanto esta não era suficiente para vencer as forças contrárias à adoção desta tecnologia. Como apresentado na seção 4.1, as características do modelo refletem os fatores que supostamente pesam a favor da moenda. São esses fatores o fracionamento do investimento, as sinergias com outras etapas, a simplicidade de operação e a experiência acumulada com esses equipamentos.

O que de fato foi observado é que, as usinas que de partida usavam o difusor, tiveram uma vantagem competitiva significativa. Este diferencial foi suficiente para que elas tivessem mais disponibilidades de caixa para investir e, assim, ganhar *market share*. Uma vez atingido certo *market share*, como mostrado na seção 4.2, os mecanismos que deveriam reforçar o domínio da moenda configuraram um ciclo retroalimentado de apoio à expansão do difusor.

A contribuição do modelo para a pesquisa proposta decorre do processo de desenvolvimento deste e dos resultados obtidos, mesmo sendo estes divergentes do esperado. Os estudos necessários para o desenvolvimento do modelo, apresentados nos capítulos 1 e 2, levaram a um melhor entendimento do setor e de seus agentes, destacando-se a complexidade do processo produtivo na agroindústria canavieira e a complexidade do ambiente institucional que define as inovações neste setor. Além disso, assumindo que o modelo e os cenários de inicialização utilizados são uma representação adequada do conhecimento que se pretendia avaliar, então os resultados apontam para a existência de algum fator importan-

te no processo de difusão de tecnologias nessa indústria que foi ignorado ou descartado. Finalmente, o modelo, seu desenvolvimento e os resultados obtidos trazem indicações de quais podem ser esses pontos falhos.

Uma das simplificações assumidas pelo modelo decorre das hipóteses que se pretende testar. Conforme explicitado nas tabelas 7 e 21, refletindo a análise de Piacente (2010), foram minimizadas as influências das complexidades de modularidade do processo produtivo e da cadeia inovativa setorial, expostas nos capítulos 1 e 2.

Este modelo parte do pressuposto de que as sucessivas atividades no processo produtivo são independentes. Isto é, quando uma usina substitui seu terno de moendas por um difusor, nenhuma adaptação é necessária em outras partes do processo produtivo. Além disso, a produtividade e o funcionamento de outras atividades, anteriores e posteriores a esta que foi modificada, não são afetados. Nos termos explicados no capítulo 1, isso implica assumir que o sistema produtivo da usina é decomponível em partes compatíveis com a representação feita no modelo.

Ao entender o *Bem de capital* como responsável por toda a etapa industrial de produção contorna-se em parte esta questão. Considera-se, assim, todo o processo produtivo da etapa industrial como uma única parte, independente de esta ser ou não decomponível. Um difusor precisa que a cana-de-açúcar seja mais bem preparada que um terno de moendas e gera um bagaço excessivamente úmido para a produção de eletricidade. Entretanto, isso significa somente que a vantagem de produtividade e de custo operacional do *Bem de capital* que representa o difusor sobre o qual representa o terno de moendas será ligeiramente menor. Na produtividade do *Bem de capital* estará inclusa a produção de energia e no seu custo de operação estarão inclusos os custos de preparo da cana-de-açúcar e de redução da umidade do bagaço.

Entretanto, ignoram-se pontos importantes da interação entre atividades. Um deles é a interação entre as etapas industrial e agrícola. Como exemplo disso, diferentes técnicas de colheita resultam em cana-de-açúcar mais ou menos limpa, o que tem pouco impacto na eficácia do terno de moendas, mas pode ter grande impacto na produtividade do difusor. A colheita mecanizada, ao cortar o colmo em gomos, deixa uma maior área de cor-

te exposta, ampliando as perdas de sacarose resultantes da lavagem. Como resultado, a difusão da colheita mecanizada levou à adoção em paralelo da limpeza a seco. Uma solução a esta questão seria simplificar o modelo, eliminando os objetos *Canavial* e *Bem de capital*. Com a *Usina* representando todo o processo produtivo, incluindo as atividades agrícolas e as industriais, sua parametrização refletiria também o resultado líquido das interações destas.

Outro lado ignorado é a compatibilidade das escalas das etapas produtivas. Em um sistema produtivo linear a capacidade produtiva total do sistema é igual à capacidade da atividade de menor capacidade dentro do sistema. Isso significa que a substituição de um terno de moendas por um difusor de capacidade maior pode ampliar a capacidade de extração de sacarose, mas não terá efeito na capacidade total da usina se os fermentadores não tiverem condições de processar o insumo extra que será produzido. Esse problema pode ser incorporado ao modelo caso adote-se uma representação mais detalhada das atividades executadas na usina, caso estejam representados todos os subprocessos, todos os equipamentos. Essa solução, além de significativamente mais complexa que o modelo aqui proposto, é diametralmente oposta à solução indicada ao problema anterior.

Uma representação mais fiel dos processos produtivos dentro da usina e de suas interfaces implica em uma representação mais precisa da estrutura de modularidade desses processos. Conforme discutido nos capítulos 1 e 2, o processo produtivo na agroindústria canavieira não é de fato decomponível, mas é modular. Enquanto algumas atividades têm poucas interações relevantes com outras, há atividades que têm muitas interações relevantes. Isso faz com que o impacto sobre o sistema de mudanças em uma atividade seja diferente do impacto de mudanças em outra atividade.

Segundo Frenken,

“What is important to note is that the high-pleiotropy elements mediating the interactions of other elements need not be considered as pure technical standards in terms of interface standards in the conventional sense. These high-pleiotropy elements can also refer to particular “core components” in the system, which happen to affect many functions. For example, the type of engine used in a car is expected to affect many functions of a car in conjunction with other elements that only affect one function. As such, the choice of engine resembles the choice for a technical standard in the sense

that it is the yardstick for the choice of other elements. Once a choice of allele of high-pleiotropy elements is made, the system can be optimised by local search in low-pleiotropy elements. Hereafter, mutation in a high-pleiotropy element is no longer likely to be successful since many functions in the system will be simultaneously affected, the net result in system fitness generally being a loss” (2006, pg. 299)

O estudo preliminar feito mostra que a extração de sacarose pode ser um elemento de grande pleiotropia pelo número de interfaces que ele tem com diferentes elementos do sistema. Se um estudo mais aprofundado do assunto mostra que esta constatação preliminar se sustenta, então essa passa a ser uma questão de suma importância para a discussão de difusão de inovação nesta atividade produtiva. As hipóteses que este trabalho visava testar não abordavam a questão da modularidade do sistema produtivo na agroindústria canavieira e, assim, esta questão não foi representada no modelo. Isso seria um motivo de divergência entre os resultados do modelo e o processo de difusão real.

A hipótese de ter o sistema de extração de sacarose como um elemento de grande pleiotropia é compatível com o histórico e com o debate acerca de ternos de moendas e difusores. Frenken explica como, na alteração de um elemento de grande pleiotropia, o resultado final no sistema pode ser mais impactado pelas interações desse elemento com outros elementos do que pela alteração de produtividade deste elemento em si. Dessa forma, a comparação da produtividade dos ternos de moendas com a dos difusores pode não refletir adequadamente o impacto na produtividade da usina da substituição de um pelo outro. Além disso, fica difícil estabelecer a priori qual será este impacto. Conforme descrito por Piacente (2010), diversas usinas adotaram o difusor com expectativa de obter ganhos de produtividade e, uma vez frustradas essas expectativas, retornaram aos ternos de moendas. Como apresentado no capítulo 1, existe um debate de resultado indefinido entre agentes do setor sobre qual tecnologia é, de fato, mais vantajosa.

É importante destacar que um elemento de grande pleiotropia ainda pode sofrer modificações. Sua função de componente núcleo do sistema, similar a um padrão técnico, como destacado por Frenken, implica em uma dinâmica especial de implementação de alterações. Serão necessárias adaptações em diversos outros elementos do sistema, ampliando os custos e a incerteza do investimento. Pode ser necessário um esforço de otimização do

sistema em seu novo contexto definido pelo novo núcleo utilizado. Entretanto, esses esforços são recorrentemente despendidos por empresas, a exemplo do desenvolvimento de novos modelos de veículos, com novos motores como componentes núcleos.

Na agroindústria canavieira observou-se recentemente a difusão de tecnologias mais eficientes de geração de energia elétrica. Este elemento do sistema também aparenta ser um elemento de grande pleiotropia, devido ao grande número de interações com outros elementos. A difusão de novos equipamentos foi acompanhada de uma mudança de paradigma que passou a enxergar a usina como uma fábrica de energia em diversas formas – etanol, açúcar e eletricidade. Na prática, essa mudança de paradigma implicou em alterações e adaptações em diversos elementos do sistema produtivo, semelhante ao processo de otimização do sistema após a alteração de um elemento núcleo.

A perspectiva interessante de estudo que se abre é identificar quais os elementos do sistema produtivo da agroindústria canavieira e suas respectivas pleiotropias, mapeando toda a estrutura de modularidade do sistema. A partir deste levantamento, pode-se tentar identificar quais são os fatores relevantes à difusão de inovações em elementos de pouca e de grande pleiotropia. Caso seja constatado que tanto o sistema de extração de sacarose quanto o sistema de geração de energia elétrica são elementos de grande pleiotropia, mostra-se interessante explorar os fatores que diferenciam as histórias de difusão de tecnologias nesses sistemas.

Um ponto que merece destaque é que existe uma dinâmica associada à estrutura de modularidade do sistema. Um importante caso em que isso ocorreu foi a venda de eletricidade. Um aumento nos preços pagos pela eletricidade, a conexão de usinas na rede elétrica e incentivos governamentais para investimentos neste sentido levou as usinas a investir em melhores geradores e melhorar o balanço energético geral da produção. Desta forma, podem-se gerar maiores volumes de energia para venda. A redefinição da eletricidade de subproduto a produto final resultou em uma mudança nos padrões de modularidade da usina. A partir desta redefinição, processos passam a ser avaliados também por seus impactos no balanço energético, pois este afeta a produtividade como um todo da usina.

Isto deve ser levando em consideração quando se estudar a modularidade da usina. Um conjunto relevante de inovações potenciais ainda não implementadas pode criar novos produtos ou novas formas de se produzirem os produtos tradicionais. Exemplos disso são a produção de polímeros, de butanol e de etanol de segunda geração. Dessas inovações provavelmente resultarão novas mudanças na modularidade da usina. De certa forma, a difusão de uma inovação é afetada pela modularidade do ambiente onde ela se inserire, mas a própria inovação tem potencial de impactar a modularidade em questão.

Todas essas observações destacam a necessidade de um estudo relativo à interdependência entre as diferentes atividades executadas ao longo do processo produtivo, tanto as atividades da etapa agrícola quanto as da etapa industrial. Fica evidente que não será possível entender a dinâmica da difusão da tecnologia de extração de sacarose sem um estudo mais profundo da usina e de seus processos. Mas esse estudo deve também estender-se, na medida do possível, ao entendimento de como as perspectivas tecnológicas podem afetar essa modularidade.

Enquanto a modularidade parece ser uma linha de pesquisa mais promissora, ela não é a única que aparece. Outra simplificação adotada no desenvolvimento do modelo é de um único agente decisor cujos interesses estão perfeitamente alinhados com os interesses do proprietário da usina e que detém conhecimento técnico completo das opções de investimento. Na realidade, as decisões de investimento não são feitas pelos técnicos responsáveis pelos processos de produção, porém, se os técnicos assessoram os tomadores de decisão com uma análise técnica das opções, existe espaço para problemas do tipo principal-agente. Tendo em vista que ternos de moendas são mais fáceis de operar e que pausas não programadas resultam em perdas menores quando comparado com difusor, é do interesse do técnico, que operará o equipamento, favorecer o terno de moenda mesmo que este não seja a melhor opção para o decisor. Isto indica para a necessidade de pesquisa mais aprofundada do processo de tomada de decisão e das partes envolvidas, levando em consideração a teoria da agência.

A construção do modelo configura, em si, uma contribuição relevante ao estudo da difusão de tecnologias na agroindústria canavieira. O modelo materializa parte do co-

nhecimento existente e testa-o. A organização das hipóteses sob um modelo expõe estas de forma mais explícita. Além disso, ele pode ser utilizado para outras pesquisas similares e sua forma de desenvolvimento pode ser um *roadmap* para auxiliar desenvolvimentos similares.

Os estudos desenvolvidos para permitir a elaboração do modelo definem outra contribuição relevante. Apresentados nos capítulos 1 e 2, estes estudos permitem uma compreensão mais clara do complexo ambiente onde ocorre a difusão, configurado por características técnicas e institucionais específicas do setor. Fica identificada a importância da interação de diversos agentes diferentes – produtores, fornecedores, institutos de pesquisa, universidades, governo – para o desenvolvimento de inovações para a agroindústria canavieira, cada qual com motivadores, competências e modos de ação específicos. A partir destas constatações, foi apontada a adequação do uso de modelos de simulação baseados em agentes e de metodologia *history-friendly* para o estudo deste setor.

Os resultados obtidos representam mais uma contribuição relevante deste trabalho. O uso de um modelo de simulação demanda a organização e explicitação das hipóteses utilizadas e a análise dos resultados produzidos por este modelo permite identificar a relevância das hipóteses para explicar os processos que se pretendia representar. Diferentemente da análise meramente descritiva dos eventos, os resultados de um modelo de simulação evidenciam a consequência das interações das hipóteses que o embasam. Um modelo de simulação permite a manifestação de propriedades emergentes resultantes destas interações e permite, também, identificar a relevância destas. Os resultados permitiram identificar a insuficiência das hipóteses aventadas para explicar o processo de difusão estudado.

Finalmente, derivadas do trabalho desenvolvido, tem-se as perspectivas de pesquisa futura. O potencial do modelo desenvolvido foi parcialmente explorado, na medida em que as inicializações utilizadas limitaram-se pelas hipóteses que se pretendia testar. A ampliação deste escopo pela realização de simulações com um amplo leque de inicializações permitirá explorar o comportamento do modelo fora deste escopo. Os resultados assim obtidos poderão trazer *insights* sobre o processo de difusão aqui debatido e sobre contextos alternativos.

Outro caminho de continuidade de pesquisa seria o estudo mais aprofundado da estrutura de modularidade do processo produtivo na agroindústria canavieira. O contraste entre, de um lado as hipóteses que se pretendia testar e os resultados, apresentados nos capítulos 3 e 4, e, de outro, as características do setor descritas nos capítulos 1 e 2, indicam para o potencial desta direção de pesquisa. Os estudos sobre o setor apresentados definem um ponto de partida para essa pesquisa. Uma vez aprofundado o conhecimento em questão, as hipóteses resultantes desta pesquisa poderiam ser novamente testadas por modelos de simulação. O modelo desenvolvido no âmbito deste trabalho pode servir de base para este novo modelo, que poderá incorporar suas estrutura e parte das soluções adotadas. Além disso, a experiência e metodologia descritas no escopo deste trabalho podem servir de *roadmap* para esse aperfeiçoamento.



## Referências

- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (Org.); CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Org.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.
- BALDWIN, Carliss. Y.; CLARK, Kim. B. *The Option Value of Modularity in Design: An Example from Design Rules, Volume 1: The Power of Modularity*. Boston : Harvard NOM Working Paper No. 02-13; Harvard Business School Working Paper No. 02-078. Disponível para download em: < <http://ssrn.com/abstract=312404> > ou <<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.312404>>
- BASSANINI, Andrea; DOSI, Giovanni. Heterogenous agents, complementaries, and diffusion. Do increa-sing returns imply convergence to international technological monopolies? In: GATTI,D.D et al . *Interaction and Market Structure*, Berlin: Springer Verlag, 2000. (Book Series: Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, v. 484). p. 185-206.
- BASTOS, Valéria Delgado. Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 25, p. 5-38, mar. 2007.
- BRUSONI, Stefano; MARENCO, Luigi; PRENCIPE, Andrea; VALENTE, Marco. *The value and costs of modularity: a cognitive perspective*. Brighton: SPRU Eletronic Working Paper Series, paper n. 123, 2004.
- BRUSONI, Stefano; FONTANA, Roberto. *Modularity as an entry strategy: the invasion of a new niches in the LAN equipment industry*. Milano: CESPRI, Università Commerciale “Luigi Bocconi”, WP n.171, 2005.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil*. Brasília: CGEE, 2009.
- \_\_\_\_\_. *Avaliação da expansão da produção de etanol no Brasil*. Brasília: CGEE, 2004.
- CHIAROMONTE, Francesca; DOSI, Giovanni; ORSENIGO, Luigi. Innovative learning and institutions in the process of development: on the microfoundations of growth regimes. In: THOMSON, R (Ed.). *Learning and Technological Change*, New York: St. Martin´s Press, cap 8, p.117-149, 1993.
- DAVID, Paul A. *A Contribution to the Theory of Diffusion*. Stanford : SIEPR Stanford University, 1969.

- DAVIES, Stephen W. *The diffusion of process innovations*. London: Cambridge University Press, 1979.
- DE FELÍCIO, Marcelo. Plantio direto de soja sobre palha de Cana-de-Açúcar colhida mecanicamente crua. *Revista Canavieiros*, mar 2007
- DE OLIVEIRA, André Bello. *Análise prospectiva da utilização de uma usina como plataforma para uma biorrefinaria*. Dissertação de Mestrado, Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2010.
- DE OLIVEIRA, Marcos. Opção produtiva. Sorgo é plantado para produzir etanol na entressafra da cana. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 193, mar/2012, p.62-65.
- DEDINI SA Indústrias de Base. Sistemas de extração do caldo: moenda e difusor. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL E MOSTRA DE TECNOLOGIA E ENERGIA CANAVIEIRA, 2011. Piracicaba, 2011. Palestra dia 16/jun/2011. Disponível para download em <[http://www.simtec.com.br/Web/port/palestras/palestras\\_2011.asp](http://www.simtec.com.br/Web/port/palestras/palestras_2011.asp)>
- DIXON, Robert. Hybrid corn revisited. *Econometrica.*, The Econometric Society, v. 48, n.6, p. 1451-1461, sep/1980.
- DOSI, Giovanni. The research on innovation diffusion: An assessment. In: NAKICENOVIC, Nebojsa; GRÜBLER, Arnulf (Ed.). *Diffusion of technologies and social behavior*, Berlin: Springer Verlag, 1991. p. 179-208.
- DOSI, Giovanni; FAGIOLO, Giorgio; ROVENTINI, Andrea. Lumpy investment and endogenous business cycles in an evolutionary multi-agent model. In: *Cybernetics and Systems: An International Journal*. Taylor & Francis, 2007, v. 38, p. 631-666.
- DWECK, Esther. *A Formalização da interação micro-macrodinâmica: ABM e simulações em ciências sociais*. XV Encontro Nacional de Economia Política. 2010 . Artigo submetido às Sessões Ordinárias.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Avaliação da oferta e da demanda hídrica para o cultivo de cana-de-açúcar no estado de Goiás*. IX Simpósio Nacional Cerrado: Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agrogênero e recursos naturais. Brasília, 2008
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *A importância da lignina para a produção de etanol de segunda geração*. Documento 108, Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, 2010.
- FAOSTAT. Statistical databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

- FONSECA, Maria da Graça Derengowski; SILVEIRA, José Maria Jardim da; CHAGAS, Roberta de Souza Bruno; PEREIRA, Caroline Nascimento; MORAIS, Eduardo Martins. *The evolution of the bioethanol industry in Brazil: could Brazilian ethanol production stay competitive without innovating?* XIV International Joseph A. Schumpeter Society Conference, 2012. Artigo submetido a Sessão paralela.
- FREEMAN, Christopher; CLARK, John; SOETE, Luc. *Unemployment and technical innovation: a study of long waves and economic development*. London: Greenwood Press, 1982.
- FREEMAN, Christopher; DOSI, Giovanni; ORSENIGO, Luigi; FREEMAN, Christopher; PEREZ, Carlota; BOYER, Robert; ALLEN, Peter. Part II - Evolution, technology, and institutions: a wider framework for economic analysis. In DOSI, Giovanni; FREEMAN, Christopher; NELSON, Richard; SILVERBERG, Gerald; SOETE, Luc. (eds). *Technical Change and Economic Theory*, Laboratory of Economics and Management (LEM), Sant'Anna School of Advanced Studies, Pisa, Italy, ch. 2-5, p. 9-119, 1988. Disponível em:  
<<http://EconPapers.repec.org/RePEc:ssa:lemchs:dosietal-1988-2>>
- FRENKEN, Koen. A fitness landscape approach to technological complexity, modularity, and vertical disintegration. *Structural Change and Economic Dynamics*. v. 17, n.3, p. 288-305, set/2006.
- FUNCEX. Fundação Centro de Estudos de Comércio Exterior
- FURTADO, André, PELAEZ, Victor; SZMRECSANYI, Tamás. Difusão tecnológica: um debate superado. In: PELAEZ, V.; SZMRECSANYI, Tamás. *Economia da inovação tecnológica*. São Paulo: Hucitec, 2006.
- GARAVAGLIA, Christian; MALERBA, Franco; ORSENIGO, Luigi. Entry, market structure and innovation in a history-friendly model of the evolution of the pharmaceutical industry. In: MAZZUCATO, Mariana; DOSI, Giovanni (Eds). *Knowledge Accumulation and Industry Evolution. The Case of Pharma-Biotech*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006, p. 163–207.
- GARUD, Raghuram; MUNIR, Kamal. *Socio-technical dynamics underlying radical innovation: the case of Polaroid's SX70 camera*. In: Working paper series of University of Cambridge, Judge Business School ; n. 05, 2006.
- GIMENEZ, André Berto. *A simulation of technology diffusion in the Brazilian sugarcane agroindustrial complex*. XIV International Joseph A. Schumpeter Society Conference, 2012, Brisbane, Australia. Anais do XIV International Joseph A. Schumpeter Society Conference, 2012.
- GRILICHES, Zvi. (1957). Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change, *Econometrica*, The Econometric Society, v. 25, n.4, p. 501-522, oct/1957.

- HALL, Bronwyn H. *Innovation and diffusion*. National Bureau of Economic Research, NBER Workink Paper n. 10212, 2004.
- HASSUANI, Suleiman José; VERDE Manoel Regis Lima; MACEDO, Isaías de Carvalho. *Biomass power generation, sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba: PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento; CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, 2005. Série Caminhos para sustentabilidade.
- IBGE. *Pesquisa Agrícola Mensal*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012 a.
- IBGE. *Produção agrícola municipal*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012 b.
- MANSFIELD, Edwin. Technical change and the rate of imitation, *Econometrica*, The Econometric Society, v. 29, n.4, p. 741-766, oct/1961.
- METCALFE, John Stanley. Impulse and diffusion in the study of technical change. *Futures*. v. 13, n. 5, p. 347-359, oct/1981.
- MORONE, Piergiuseppe; TAYLOR, Richard. Modelling knowledge and its diffusion patterns: a pathway towards complexity. In: \_\_\_\_\_. *Knowledge diffusion and innovation: modelling complex entrepreneurial behaviours*. Cheltenham: Edward Elgar Pub, cap 3, 2010.
- \_\_\_\_\_. Knowledge diffusion and innovation: an agent-based approach. In: \_\_\_\_\_. *Knowledge diffusion and innovation: modelling complex entrepreneurial behaviours*. Cheltenham: Edward Elgar Pub, cap 4, 2010.
- NAZATO, C.; SILVA, D. F. C.; FERRAZ, S. C. U.; HARDER, Márcia Nalesso Costa. Moenda x difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto. *Bioenergia em revista: Diálogos*. v. 1, n. 1, jan-jun/2011.
- NELSON, Richard; WINTER, Sidney. *An evolutionary theory of economic change*. Belknap Press of Harvard University Press, 1982.
- OLIVEIRA, Marli Dias Mascarenhas; NACHILUK, Katia. Custo de produção de cana-de-açúcar nos diferentes sistemas de produção nas regiões do Estado de São Paulo. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 5-33, jan/2011.
- PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS. *Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008*. ESALQ-USP, 2009a.
- PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS. *Custo de produção agrícola e industrial de açúcar e etanol no Brasil na safra 2008/2009*. ESALQ-USP, 2009b.

- PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS. *Custo de produção agrícola e industrial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: fechamento da safra 2010/2011*. ESALQ-USP, 2011.
- PEDRO, Edilson da Silva. *Estratégias para a organização da pesquisa em cana-de-açúcar: Análise de governança em sistemas de inovação*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- PEREIRA, Caroline Nascimento. *Análise exploratória da eficiência produtiva das usinas de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil com o método Análise Envoltório de Dados (DEA) – Índice Malmquist*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- PEREIRA, Marcelo de Carvalho. *O setor de internet no Brasil: uma análise da competição no mercado de acesso*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- PIACENTE, Fabrício José. *Inovação e Trajetórias Tecnológicas: o caso dos dois sistemas para extração de sacarose no Brasil*. Tese de Doutorado, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- PROCKNOR, Celso; FERREIRA, Sérgio Luiz; HENDLER, Bernardo. Dúvida cruel. *Revista STAB*, Sociedade dos Técnicos Açucareiros Alcooleiros do Brasil. Jan-fev/2006.
- REYNOL, Fabio. Bagaço de qualidade. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 167, jan/2010, p.72-73
- RICHERSON, Peter J.; VILA, Bryan. J.; MULDER, Monique Borgerhoff. Diffusion of innovations. In: \_\_\_\_\_. *Principles of human ecology*, Simon & Schuster Custom Pub, 1996, cap 19, p. 350-364.
- RIPOLI Tomaz Caetano Cannavam; RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. Terminologia Técnica. In: \_\_\_\_\_. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba: T. C. Cannavam Ripoli, 2004, 2ª. Ed.
- ROSENBERG, Nathan. *Tecnologia y economia*. Tradução: Esther Labarta. Barcelona: Gustavo Gili, 1979,
- SALTER, Wilfred E. G.; REDDAWAY, William Brian. *Productivity and technical change*. Cambridge: University Press, 1969.2ª. Ed.
- SCHUMPETER, Joseph Alois. *Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico*. Introdução de Rubens Vaz da Costa; tradução de Maria Silvia Possas. Série: Os Economistas. São Paulo: Abril Cultural, 1985

- SILVERBERG, Gerald. Adoption and diffusion of technology as a collective evolutionary process, In: NAKICENOVIC, N; GRÜBLER, A (Ed.). *Diffusion of technologies and social behavior*, Berlin: Springer Verlag, 1991. Cap 8, p. 209-229.
- SILVERBERG, Gerald; DOSI, Giovanni; ORSENIGO, Luigi. Innovation, diversity and diffusion: a self-organisation model. *The Economic Journal*, dec/1988, v. 98, n. 393, p. 1032 - 1054.
- STONEMAN, Paul. *The economic analysis of technological change*. Oxford: University Press, 1983.
- VALENTE, Marco. *Evolutionary Economics and Computer Simulation: a model for the evolution of markets*, Department of Business Studies. Aalborg: University of Aalborg, 1999.
- VALENTE, Marco. *Simulation methodology: an example in modelling demand*. L'Aquila: Università dell'Aquila, 2002, mimeo.
- VERDI, Adriana Renata; AOUN, Samira; TORQUATO, Sérgio Alves. Globalização do agronegócio brasileiro: estratégias do grupo Cosan. *Informações Econômicas*. São Paulo, v. 42, n.1, p. 27-40, jan-fev/2012.
- WWF-Brasil. Análise da expansão do complexo agroindustrial canavieiro no Brasil. Documento aberto para consulta pública, maio/2008. Disponível em <[http://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/reducao\\_de\\_impactos2/lep/lep\\_news/?14200](http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/lep/lep_news/?14200)>
- YOON, Minho; LEE, Keun. Agent-based and a history-friendly a models for explaining industrial evolution. *Evolutionary and Institutional Economics Review* , v. 6, n.1, p. 45-70, 2009

## Apêndice A: Código fonte do modelo de simulação em linguagem própria do Laboratory for Simulation Development 6.1

```
#include "fun_head.h"
```

```
/**/
```

```
//PARAMETERS
```

```
/**/
```

```
/*
```

MARKET

AvKnowhow\* - Represents: average know-how on technology \* weighted by market share (ms\*Sucrose)

Used by: TotalProduction

Initialization: 0

CostFixMin/Max - Represents: minimum/maximum fix cost per mill

Used by: Decide

Initialization: >0

CostVarAgricMin/Max - Represents: minimum/maximum variable cost per kiloton of sugar-cane harvested

Used by: Decide

Initialization: >0

KnowhowLeak - Represents: Control the rate at which private know-how leaks to public know-how

Used by: KnowhowInit0

Initialization: =0, no leakage

>0, leakage

LandPrice - Represents: price of land as a proxy for extra costs when making greenfield investment

Used by: ComputeValueNewMill, Decide

Initialization: >0

\*\*\*PS: should be upgraded and become a variable

LearningFactor - Represents: speed of learning to use a technology

Used by: ProductionKg, as maximum for a uniform draw

Initialization: =1, can at one step learn perfect usage

<1, maximum of yet to learn that can be learned at one step

MinProdMult - Represents: minimum accepted productivity for a capital good to be used as a proportion of the average productivity of capital goods on supply

Used by: MinimumProductivity

Initialization: <1

\*\*\*PS: can be moved to Owner to define strategy.

ms\*SucroseX - Represents: market-share of total sucrose extraction of technology \* in context X

Used by: TotalProduction

Initialization: 0

PerceptionVar - Represents: perception mistakes

Used by: PerceivedProdKg

Initialization: =0, no mistake, perfect evaluation

>0, perceived value is a draw from normal with average on true value and variance PerceptionVar

\*\*\*PS: can be moved to Owner or Mill

\* Price - Represents: price for selling final product

Used by: CashFlow, ExpectedPrice

Initialization: >0

\*\*\*PS: should be upgraded and become a variable

RenovationCosts - Represents: Costs associated with renovation of a unit of area

Used by: ComputeValueNewMill, ComputeValueSC, Decide

Initialization: >0

SCGrowth - Represents: agricultural productivity advances

Used by: SCPotential, as multiplier

Initialization: =1, no growth

>1, exponential growth equal to 1-SCGrowth

SCReduction - Represents: productivity loss over the harvests

Used by: SCProduction, as multiplier

Initialization: =1, no loss

<1, fall equal to 1-SCReduction

## OWNER

CashOwner - Represents: Cash available to owner

Used by: CashFlow, Decide

Initialization: as desired

written by Decide

ScrappingValue - Represents: minimum return on investment accepted, incorporate finance costs and market strategy

Used by: Decide

Initialization: >0

low values, low financial costs and/or market share seeking agresive market strategy

high values, high financial costs and/or profitability managing market strategy

## MILL

CostFix - Represents: fix costs per mill

Used by: CashFlow

Initialization: >0

written by Decide for new instances

CostVarAgric - Represents: variable cost per kiloton of sugar-cane harvested

Used by: CashFlow

Initialization: >0

written by Decide for new instances

Knowhow\* - Represents: know-how accumulated by mill on operating capital goods of type \*

Used by: PerceivedProdKg, ProductionKg, ComputeValueKg

Initialization: =1, perfect use

<1, some learning to be done

overwritten by ProductionKg, as learning takes place

NewCapacity - Represents: capacity resulting of investments made in the iteration

Used by: ComputeValueKg, Decide

Initialization: 0

written by Decide, TotalProduction

NewMill - Represents: boolean to indicate if Mill was created during simulation run

Used by: -

Initialization: 0

written by Decide

## SC

Renovation - Represents: boolean if investment in renovation has been done in the period

Used by: SCProduction, Decide, as boolean in both

Initialization: 0

written by Decide, TotalProduction

## KG

CapacityKg - Represents: capacity of the capital good

Measure unit: kilotonnes of sugar-cane

Used by: ProductionKg, SCEExcess

Initialization: according to type

written by Decide for new instances

CostVarInd - Represents: variable industrial cost per ton of sucrose extracted

Measure unit: Reais (R\$) per ton of sugar equivalent sucrose

Used by: Decide

Initialization: >0

written by Decide for new instances

ProductivityKg - Represents: productivity of the capital good

Used by: PerceivedProdKg, ProductionKg, SCEExcess

Initialization: according to type

written by Decide for new instances

SCInput - Represents: sugar-cane assigned to the capital good as input

Used by: ProductionKg

Initialization: 0

written by SCEExcess

TypeKg - Represents: index for type of capital good

Used by: PerceivedProdKg, ProductionKg, as index

Initialization: 0, press rolls

1, diffusion

3, ghost capital good, no production

written by Decide for new instances

## KSUPPLIER

ProdGrowth - Represents: growth of new capital good productivity

Used by: ProductivityKgS

Initialization: =0, no growth in productivity

>0, growth

## TECHNOLOGY

CapacityKgS - Represents: capacity of the capital good

Measure unit: kilotonnes of sugar-cane

Used by: Decide

Initialization: ComputeValueNewMill, ComputeValueKg, Decide

CostVarIndS - Represents: variable industrial cost per kilogram of sucrose extracted

Measure unit: Reais (R\$) per ton of sugar equivalent sucrose

Used by: CashFlow

Initialization: >0

written by Deide for new instances

PriceKgS - Represents: price of capital good for sale  
 Measure unit: Reais (R\$) per ton of sugar equivalent sucrose  
 Used by: ComputeValueNewMill, ComputeValueKg, Decide  
 Initialization: according to type

TypeKgS - Represents: index for type of capital good  
 Used by: ComputeValueKg  
 Initialization: 0, press rolls  
 1, diffusion

```
*/
//*****/
//*****/
```

MODELBEGIN

```
//*****/
//MARKET
//*****/
```

EQUATION("TotalProduction")

```
/*
Sum of the total production, zero NewCapacity and Renovation (for new iteration) and
check market shares
*/
```

```
v[0]=SUM("ProductionOwner");
v[1]=0;
v[2]=0;
v[4]=0; //market share of technology 0 in sucrose extracted
v[5]=0; //market share of technology 1 in sucrose extracted
v[8]=0; //average know-how for technology 0 weighted by market share in sucrose ex-
tracted
v[9]=0; //average know-how for technology 1 weighted by market share in sucrose ex-
tracted
```

```
CYCLE(cur1,"Owner")
{
  CYCLES(cur1,cur2,"Mill")
```

```

{
v[6]=VS(cur2,"Knowhow0");
v[7]=VS(cur2,"Knowhow1");
WRITES(cur2,"NewCapacity",0);
CYCLES(cur2,cur3,"SC")
{
WRITES(cur3,"Renovation",0);
}
CYCLES(cur2,cur3,"Kg")
{
v[3]=VS(cur3,"TypeKg");
if(v[3]==0)
{
v[1]+=VS(cur3,"ProductionKg");
v[8]+=VS(cur3,"ProductionKg")*v[6];
}
else if(v[3]==1)
{
v[2]+=VS(cur3,"ProductionKg");
v[9]+=VS(cur3,"ProductionKg")*v[7];
}
}
}
}

```

```

if((v[1]+v[2])>0) //avoid division by zero

```

```

{
v[4]=v[1]/(v[1]+v[2]); //market share of technology 0 in sucrose extracted
v[5]=v[2]/(v[1]+v[2]); //market share of technology 1 in sucrose extracted
}

```

```

if(v[1]>0) //avoid division by zero

```

```

v[8]=v[8]/v[1]; //average know-how for technology 0 weighted by market share in sucrose
extracted

```

```

if(v[2]>0) //avoid division by zero

```

```

v[9]=v[9]/v[2]; //average know-how for technology 1 weighted by market share in sucrose
extracted

```

```
WRITE("ms0Sucrose",v[4]);
WRITE("ms1Sucrose",v[5]);
WRITE("AvKnowhow0",v[8]);
WRITE("AvKnowhow1",v[9]);
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("AvKgProductivityS")
```

```
/*
```

```
Calculate the average productivity of capital goods on supply
```

```
*/
```

```
v[1]=0;
v[2]=0;
CYCLE(cur1,"KSupplier")
{
  CYCLES(cur1,cur2,"Technology")
  {
    v[1]+=VS(cur2,"ProductivityKgS");
    v[2]+=1;
  }
}
```

```
v[0]=v[1]/v[2];
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("AvSCPotential")
```

```
/*
```

```
Calculate the average SCPotential
```

```
*/
```

```
v[1]=0;
v[2]=0;
CYCLE(cur1,"Owner")
{
  CYCLES(cur1,cur2,"Mill")
```

```

{
CYCLES(cur2,cur3,"SC")
{
v[1]+=VS(cur3,"SCPotential");
v[2]+=1;
}
}
}
v[0]=v[1]/v[2]; //average SCPotential

```

RESULT(v[0])

EQUATION("Price")

/\*

Price per ton of sugar

\*/

```
v[0]=VL("Price",20);
```

RESULT(v[0])

EQUATION("PubKnowhow0")

/\*

Public know-how for technology 0

Represents the spilling of private know-how into public know-how

\*/

```
V("TotalProduction");
```

```
v[1]=VL("PubKnowhow0",1); //public know-how, between 0 and 1
```

```
v[2]=V("AvKnowhow0"); //average know-how, between 0 and 1
```

```
v[3]=v[2]-v[1]; //initial difference
```

```
v[4]=V("ms0Sucrose");
```

```
v[5]=V("KnowhowLeak");
```

```
v[6]=v[3]*(1-v[5]*v[4]*v[4]); //new difference
```

```
v[0]=v[2]-v[6]; //new public know-how
```

RESULT(v[0])

EQUATION("PubKnowhow1")

/\*

Public know-how for technology 1

Represents the spilling of private know-how into public know-how

\*/

V("TotalProduction");

v[1]=VL("PubKnowhow1",1); //public know-how, between 0 and 1

v[2]=V("AvKnowhow1"); //average know-how, between 0 and 1

v[3]=v[2]-v[1]; //initial difference

v[4]=V("ms1Sucrose");

v[5]=V("KnowhowLeak");

v[6]=v[3]\*(1-v[5]\*v[4]\*v[4]); //new difference

v[0]=v[2]-v[6]; //new public know-how

RESULT(v[0])

EQUATION("ComputeValueNewMill")

/\*

Compute the scrapping value of buinding a new mill for the owner that called it

\*/

v[0]=0;

v[1]=VS(c,"ExpectedPrice");

v[2]=0;//V("KnowhowInit");

v[3]=V("LandPrice");

v[4]=V("RenovationCosts");

v[14]=UNIFORM(V("CostVarAgricMin"),V("CostVarAgricMax")); //v[14]=VS(c,"CostVarAgric");

v[17]=0;//VS(c,"CostFix");

v[18]=V("AvSCPotential");

v[5]=0; //productivity of best capital good on supply

```

v[6]=0; //price of best capital good on supply
v[7]=0; //capacity of best capital good on supply
v[11]=0; //best (simple) scrapping value
CYCLE(cur4,"KSupplier")
{
  CYCLES(cur4,cur5,"Technology")
  {
    v[8]=VS(cur5,"ProductivityKgS");
    v[9]=VS(cur5,"PriceKgS");
    v[15]=VS(cur5,"CostVarIndS")/1000;
    v[10]=(v[1]-v[15])*v[8]/v[9]; //simple scrapping value of capital good on supply, only for
ranking
    if(v[10]>v[11]) //if this is the best option available
    {
      v[11]=v[10]; //scrapping value of best capital good on supply
      v[5]=v[8]; //productivity of best capital good on supply
      v[6]=v[9]; //price of best capital good on supply
      v[7]=VS(cur5,"CapacityKgS"); //capacity of best capital good on supply
      v[16]=VS(cur5,"CostVarIndS")/1000; //variable cost of production with best capital
good on supply
      if(VS(cur5,"TypeKgS")==0) //public know-how to use
        v[2]=VL("PubKnowhow0",1);
      else if(VS(cur5,"TypeKgS")==1)
        v[2]=VL("PubKnowhow1",1);
    }
  }
}

if(v[11]==0)
  END_EQUATION(0);

v[12]=(v[5]*(1-v[2])*(v[1]-v[16])-v[14])/(v[3]+v[4]+v[6]/v[7]);
v[13]=v[17]/(v[18]*(v[3]+v[4]+v[6]/v[7]));

v[0]=v[12]-v[13]; //scrapping value of new mill

RESULT(v[0])

```

```
EQUATION("ComputeValueKg")
```

```
/*
```

```
Compute the scrapping value of buying new capital good for the mill that called it. Should  
allways be called by a Mill
```

```
*/
```

```
v[0]=0;  
v[1]=VS(c,"ExpectedPrice");  
v[2]=VS(c,"SCExcess");  
v[3]=VS(c,"NewCapacity");  
v[4]=v[2]-v[3]; //available SC  
v[11]=VS(c,"CostVarAgric");  
v[12]=0;//VS(c,"CostFix");
```

```
CYCLE(cur1,"KSupplier")
```

```
{
```

```
  CYCLES(cur1,cur2,"Technology")
```

```
  {
```

```
    v[5]=VS(cur2,"TypeKgS");  
    v[6]=0;  
    if(v[5]==0)  
      v[6]=VS(c,"Knowhow0");  
    else if(v[5]==1)  
      v[6]=VS(c,"Knowhow1");  
    v[7]=VS(cur2,"CapacityKgS");  
    v[8]=VS(cur2,"PriceKgS");  
    v[9]=VS(cur2,"ProductivityKgS");  
    v[13]=VS(cur2,"CostVarIndS")/1000;
```

```
    v[10]=((v[1]-v[11]/v[9]-v[13])*min(v[7],v[4])*(1-v[6])*v[9]-v[12])/v[8];
```

```
    if(v[10]>v[0]) //if this technology is better than the previously better
```

```
    {
```

```
      v[0]=v[10]; //scrapping value of the best option of capital good to buy  
      c->hook=cur2; //technology of the best option of capital good to buy
```

```
    }
```

```
  }
```

```
}
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("ComputeValueSC")
```

```
/*
```

```
Compute the scrapping value of renovating the sugar cane area that called it. Should always  
be called by a SC
```

```
*/
```

```
v[1]=VS(c,"ExpectedPrice");
```

```
v[2]=VS(c,"AvKgProductivity");
```

```
v[3]=V("RenovationCosts");
```

```
v[4]=VS(c,"CostVarAgric");
```

```
v[5]=VS(c,"AvCostVarInd")/1000;
```

```
v[6]=0;//VS(c,"CostFix");
```

```
v[7]=VS(c,"SCPotential");
```

```
v[8]=VS(c,"SCProduction");
```

```
v[9]=v[7]-v[8]; //delta SC from renovation
```

```
if(v[2]==0||v[9]==0)
```

```
END_EQUATION(0);
```

```
v[0]=(v[1]-v[4]/v[2]-v[5])*v[2]/v[3]-v[6]/(v[9]*v[3]);
```

```
RESULT(v[0])
```

```
/***/
```

```
/***/
```

```
/***/
```

```
//OWNER
```

```
/***/
```

```
EQUATION("TypeOwner")
```

```
/*
```

Type of Owner, according to technologies used. Return 0 if only use technology 0, 1 if only use technology 1, 2 if uses both and 4 otherwise

```
*/
```

```
v[0]=4;
```

```
CYCLE(cur,"Mill")
```

```
{
```

```
  if(v[0]!=2)
```

```
  {
```

```
    v[1]=VS(cur,"TypeMill");
```

```
    if(v[0]==4)
```

```
      v[0]=v[1];
```

```
    else if(v[0]!=v[1])
```

```
      v[0]=2;
```

```
  }
```

```
}
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("NumberMills")
```

```
/*
```

```
Number of Mills under Owner and calculate market-shares within Owner
```

```
*/
```

```
V("ProductionOwner");
```

```
v[0]=0;
```

```
CYCLE(cur,"Mill")
```

```
{
```

```
  v[0]++;
```

```
}
```

```
v[1]=0;
```

```
v[2]=0;
```

```
v[3]=0;
```

```
v[4]=0;
```

```

v[5]=0;
v[6]=0;
v[7]=0;
v[8]=0;
v[9]=0;

```

```

CYCLE(cur1,"Mill")

```

```

{
v[6]=VS(cur1,"Knowhow0");
v[7]=VS(cur1,"Knowhow1");
CYCLES(cur1,cur2,"Kg")
{
v[3]=VS(cur2,"TypeKg");
if(v[3]==0)
{
v[1]+=VS(cur2,"ProductionKg");
v[8]+=VS(cur2,"ProductionKg")*v[6];
}
else if(v[3]==1)
{
v[2]+=VS(cur2,"ProductionKg");
v[9]+=VS(cur2,"ProductionKg")*v[7];
}
}
}

```

```

if((v[1]+v[2])>0) //avoid division by zero

```

```

{
v[4]=v[1]/(v[1]+v[2]); //market share of technology 0 in sucrose extracted
v[5]=v[2]/(v[1]+v[2]); //market share of technology 1 in sucrose extracted
}

```

```

if(v[1]>0) //avoid division by zero

```

```

v[8]=v[8]/v[1]; //average know-how for technology 0 weighted by market share in sucrose
extracted

```

```

if(v[2]>0) //avoid division by zero

```

```

v[9]=v[9]/v[2]; //average know-how for technology 1 weighted by market share in sucrose
extracted

```

```
WRITE("ms0SucroseOwner",v[4]);
WRITE("ms1SucroseOwner",v[5]);
WRITE("AvKnowhow0Owner",v[8]);
WRITE("AvKnowhow1Owner",v[9]);
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("SCOwner")
```

```
/*
```

```
Sum the total production of sugar-cane under one owner
```

```
*/
```

```
v[0]=SUM("SCMill");
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("ProductionOwner")
```

```
/*
```

```
Sum of the production under the owner
```

```
*/
```

```
v[0]=SUM("ProductionMill");
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("CashFlow")
```

```
/*
```

```
Manage cash flow
```

```
Production is sold, costs are paid and all revenue is centralized at the owner and invest-  
ments are decided
```

```
Returns total income minus cost under the owner
```

```
*/
```

```
v[1]=V("ProductionOwner");
```

```
v[2]=V("Price");
```

```
v[3]=V("CashOwner");
```

```

//v[6]=V("CostFix");
//v[7]=V("CostVarAgric");
//v[8]=V("CostVarInd")/1000;
//v[10]=V("SCOwner");
//v[11]=V("ProductionOwner");
v[9]=0; //total fix cost under the owner
v[12]=0; //variable agricultural cost
v[13]=0; //variable industrial cost

CYCLE(cur1,"Mill")
{
  v[9]+=VS(cur1,"CostFix"); //sum fix cost for all mills
  v[12]+=VS(cur1,"CostVarAgric")*VS(cur1,"SCMill"); //variable agricultural cost
  CYCLES(cur1, cur2,"Kg")
  {
    v[13]+=VS(cur2,"CostVarInd")*VS(cur2,"ProductionKg")/1000; //variable industrial
cost
  }
}
//v[12]=v[7]*v[10]; //variable agricultural cost
//v[13]=v[8]*v[11]; //variable industrial cost

v[0]=v[1]*v[2]-v[9]-v[12]-v[13]; //cash flow
v[4]=v[3]+v[0]; //new cash

WRITE("CashOwner",v[4]);

do{ //while there are good investment options, call Decide
  v[5]=V("Decide");
  if((v[5]+4)<0) //if Decide returns value smaller than -4
    END_EQUATION(-99999); //there has been a problem while computing Decide, return
warning value
}while(v[5]>0);

RESULT(v[0])

EQUATION("ExpectedPrice")

```

```

/*
Price the owner expects to receive for production
*/

v[0]=V("Price");

RESULT(v[0])

EQUATION("Decide")
/*
Select the best investment option available and implement it. Return the kind of option cho-
sen: 1 for sugar cane renovation, 2 for investment in existing mill (buy capital good), 3 for
create new mill and -1 when no available options are good enough (scrapping value below
minimum limit) or not affordable for the owner
*/

V("TotalProduction"); //make sure investment is only made after all production

v[0]=0; //investment option (description above)
v[1]=0; //scrapping value of the best investment option available
v[2]=V("ScrappingValue");

v[3]=V("ComputeValueNewMill"); //owner calls ComputeValueNewMill
if(v[3]>v[1]) //if this option is new best
{
v[1]=v[3];
v[0]=3;
}
CYCLE(cur1,"Mill")
{
v[3]=V_CHEAT("ComputeValueKg",cur1); //as if Mill cur1 calls ComputeValueKg
if(v[3]>v[1]) //if this option is new best
{
v[1]=v[3];
v[0]=2;
cur3=cur1; //cur3 = Mill where to invest
cur4=cur1->hook; //cur4 = Technology of capital good to buy

```

```

}
CYCLES(cur1,cur2,"SC")
{
v[3]=V_CHEAT("ComputeValueSC",cur2); //as if SC cur2 calls CoputeValueSC
v[4]=VS(cur2,"Renovation");
if(v[3]>v[1]&&v[4]==0) //if this option is new best and renovation has not yet been made
{
v[1]=v[3];
v[0]=1;
cur3=cur2; //cur3 = SC where to renovate
}
}
}

if(v[1]<v[2])
END_EQUATION(-4); //if no options are above scrapping value, stop and return -4

v[5]=V("RenovationCosts");
v[6]=V("ExpectedPrice");
v[7]=V("LandPrice");
v[8]=V("AvSCPotential");
v[9]=V("CashOwner");

switch(int(v[0])) //investment is made according to option chosen
{
case 1: //invest in renovation of sugar cane
v[10]=VS(cur3,"SCPotential");
v[11]=VS(cur3,"SCProduction");
v[12]=v[5]*(v[10]-v[11]); //total costs of renovation
v[13]=v[9]-v[12]; //updated cash of owner value, after investment is paid for
if(v[13]<0)
END_EQUATION(-1); //if this is the chosen investment but owner cant pay for it, no
investment is made
WRITE("CashOwner",v[13]); //update cash owner
WRITES(cur3,"Renovation",1); //makes investment
break;

```

```

case 2: //invest in new capital good
v[10]=VS(cur4,"PriceKgS"); //cost of investment
v[11]=v[9]-v[10]; //updated cash of owner value, after investment is paid for
if(v[11]<0)
  END_EQUATION(-2); //if this is the chosen investment but owner cant pay for it, no
investment is made
  WRITE("CashOwner",v[11]); //update cash owner
  cur5=ADDOBJs(cur3,"Kg"); //makes investment
  v[12]=VS(cur4,"CapacityKgS");
  WRITES(cur5,"CapacityKg",v[12]);
  v[13]=VS(cur3,"NewCapacity");
  v[14]=v[13]+v[12];
  WRITES(cur3,"NewCapacity",v[14]); //adds investment capacity to NewCapacity
  v[15]=VS(cur4,"ProductivityKgS");
  WRITES(cur5,"ProductivityKg",v[15]);
  v[16]=VS(cur4,"TypeKgS");
  WRITES(cur5,"TypeKg",v[16]);
  WRITES(cur5,"SCInput",0);
  v[17]=VS(cur4,"CostVarIndS");
  WRITES(cur5,"CostVarInd",v[17]);
  break;

case 3: //invest in new mill
v[10]=(v[5]+v[7])*v[8]; //cost of investment
v[11]=v[9]-v[10]; //updated cash of owner value, after investment is paid for
if(v[11]<0)
  END_EQUATION(-3); //if this is the chosen investment but owner cant pay for it, no
investment is made
  WRITE("CashOwner",v[11]); //update cash owner
  cur3=ADDOBJ("Mill"); //creates new mill
  WRITES(cur3,"NewCapacity",0);
  WRITES(cur3,"NewMill",1);
  v[12]=V("PubKnowhow0");
  v[13]=V("PubKnowhow1");
  WRITES(cur3,"Knowhow0",v[12]);
  WRITES(cur3,"Knowhow1",v[13]);
  v[14]=UNIFORM(V("CostVarAgricMin"),V("CostVarAgricMax"));

```

```

WRITES(cur3,"CostVarAgric",v[14]);
v[15]=UNIFORM(V("CostFixMin"),V("CostFixMax"));
WRITES(cur3,"CostFix",v[15]);
CYCLES(cur3,cur4,"SC") //go to created SC
{
  WRITES(cur4,"Renovation",1);
  WRITES(cur4,"SCProduction",0);
  WRITES(cur4,"SCPotential",v[8]);
}
CYCLES(cur3,cur5,"Kg") //cycle through created Kg and zero all
{
  WRITES(cur5,"CapacityKg",0);
  WRITES(cur5,"ProductivityKg",0);
  WRITES(cur5,"SCInput",0);
  WRITES(cur5,"TypeKg",3); //type 3 for zeroed Kg
}
break;

default:
  END_EQUATION(-10); //model should never reach this point
}

```

```

RESULT(v[0])

```

```

/*****/
/*****/

/*****/
//MILL
/*****/

```

```

EQUATION("TypeMill")

```

```

/*

```

```

Type of Mill, according to technologies used. Return 0 if only use technology 0, 1 if only
use technology 1, 2 if uses both and 4 otherwise

```

```

*/

```

```
v[0]=4;
```

```
CYCLE(cur,"Kg")
```

```
{  
  if(v[0]!=2)  
  {  
    v[1]=VS(cur,"TypeKg");  
    if(v[0]==4)  
      v[0]=v[1];  
    else if(v[0]!=v[1])  
      v[0]=2;  
  }  
}
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("SCMill")
```

```
/*  
Sum of all sugar-cane production under the mill  
*/
```

```
v[0]=SUM("SCProduction");
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("MinimumProductivity")
```

```
/*  
Minimum accepted productivity for a capital good to be used  
*/
```

```
v[1]=V("MinProdMult");  
v[2]=V("AvKgProductivityS");
```

```
v[0]=v[1]*v[2];
```

```
RESULT(v[0])
```

```

EQUATION("SCEExcess")
/*
Amount of sugar-cane not processed
Is influenced by sugar-cane production and capacity of capital goods
First, it absorbs public know-how
Rank capital goods by productivity and supply them with sugar-cane input (write SCIm-
put). Control for disposal of old capital goods
*/

v[0]=V("SCMill");

v[12]=V("Knowhow0");
v[13]=VL("PubKnowhow0",1);
if(v[13]>v[12]) //if public know-how is better than own know-how
WRITE("Knowhow0",v[13]); //absorb public know-how
v[14]=V("Knowhow1");
v[15]=VL("PubKnowhow1",1);
if(v[15]>v[14]) //if public know-how is better than own know-how
WRITE("Knowhow1",v[15]); //absorb public know-how

SORT("Kg","PerceivedProdKg","DOWN"); //rank capital goods of the mill by their prod-
uctivity
CYCLE(cur,"Kg") //go through all capital goods in the mill
{
v[1]=VS(cur,"CapacityKg");
v[2]=max(0,min(v[0],v[1])); //if there is no more sugar-cane, becomes 0. min(sugar-
cane,capacity) otherwise
v[3]=VS(cur,"ProductivityKg");
v[4]=V("MinimumProductivity");
if(v[3]<v[4]) //if capital good productivity is too low
v[2]=0; //assign it no inputs
WRITES(cur,"SCInput",v[2]); //assign the remaining sugar-cane to the capital good up to
its capacity
v[0]-=v[2]; //reduce remaining sugar-cane by amount assigned to capital good
}

RESULT(v[0])

```

EQUATION("ProductionMill")

/\*

Summ of all capital goods productions under the mill

\*/

V("SCEExcess"); //execute SCEExcess first to update values of SCInput

v[0]=SUM("ProductionKg");

/\*

v[0]=0;

CYCLE(cur,"Kg")

{

v[0]+=VS(cur,"ProductionKg");

}

\*/

RESULT(v[0])

EQUATION("AvKgProductivity")

/\*

Average productivity of all capital good under the mill

Is influenced by the productivity of capital goods

\*/

v[1]=V("SCMill");

v[2]=0;//V("SCEExcess");

v[3]=V("ProductionMill");

v[4]=v[1]-v[2];

if(v[4]==0)

END\_EQUATION(0);

v[0]=v[3]/v[4];

RESULT(v[0])

EQUATION("AvCostVarInd")

```

/*
Average variable cost of all capital good under the mill
*/

v[1]=0;
v[2]=0;

CYCLE(cur,"Kg")
{
v[1]+=VS(cur,"CostVarInd");
v[2]+=1;
}

if(v[2]==0)
END_EQUATION(0);

v[0]=v[1]/v[2];

RESULT(v[0])

//*****
//*****

//*****
//SC
//*****

EQUATION("SCPotential")
/*
Potential production of sugar-cane of the mill
Is influenced by the area and by agricultural productivity
Grows exponetilly over time, representing agricultural productivity advances
Measure unit: kilotonnes of sugar-cane
*/

v[1]=VL("SCPotential",1);

```

```
v[2]=V("SCGrowth");
```

```
v[0]=v[1]*v[2]; //potential grows over time
```

```
RESULT(v[0])
```

```
EQUATION("SCProduction")
```

```
/*
```

```
Actual production of sugar-cane of the mill
```

```
Is influenced by area, agricultural productivity, sugar-cane productivity loss over the harvests and by investments in renovation
```

```
Falls over time. When renovation is made, increases to equal SCPotential
```

```
*/
```

```
v[1]=VL("SCProduction",1);
```

```
v[2]=V("SCReduction");
```

```
v[3]=V("Renovation");
```

```
v[4]=V("SCPotential");
```

```
v[0]=v[1]*v[2]; //production falls over time
```

```
if(v[3]) //if renovation is made
```

```
v[0]=v[4]; //production raises to potential
```

```
RESULT(v[0])
```

```
/***/
```

```
/***/
```

```
/***/
```

```
//KG
```

```
/***/
```

```
EQUATION("PerceivedProdKg")
```

```
/*
```

```
Productivity of the capital good as perceived by the owner
```

```
Is influenced by the actual productivity of the capital good, the know-how in the mill and some mistake in perception
```

```

*/

v[1]=V("TypeKg");
v[2]=V("PerceptionVar");
v[3]=V("ProductivityKg");
v[4]=1000; //set know-how to absurd value
if(v[1]==0) //set know-how to correct value
  v[4]=V("Knowhow0");
else if (v[1]==1)
  v[4]=V("Knowhow1");
else
  END_EQUATION(0);

v[5]=v[3]*(1-v[4]); //effective productivity, taking into account know-how
v[0]=norm(v[5],v[2]); //perceived productivity, taking into account actual productivity and
perception error

RESULT(v[0])

EQUATION("ProductionKg")
/*
Sacarose extracted from sugar-cane
Is influenced by productivity, know-how and input
After production, proportional to usage, increases know-how for its type
*/

// V("SCExcess"); //execute SCExcess first to update values of SCInput
/*
v[12]=V("Knowhow0");
v[13]=VL("PubKnowhow0",1);
if(v[13]>v[12]) //if public know-how is better than own know-how
  WRITES(p->up,"Knowhow0",v[13]); //absorb public know-how
v[14]=V("Knowhow1");
v[15]=VL("PubKnowhow1",1);
if(v[15]>v[14]) //if public know-how is better than own know-how
  WRITES(p->up,"Knowhow1",v[15]); //absorb public know-how
*/

```

```

v[1]=V("TypeKg");
v[2]=V("ProductivityKg");
v[3]=1000; //set know-how to absurd value
if(v[1]==0) //set know-how to correct value
  v[3]=V("Knowhow0");
else if (v[1]==1)
  v[3]=V("Knowhow1");
else
  END_EQUATION(0);
v[4]=V("CapacityKg");
v[5]=V("SCInput");
v[6]=V("SCMill");
v[7]=V("LearningFactor");

v[0]=min(v[4],v[5])*v[2]*(1-v[3]); //production

v[8]=v[5]/v[6]; //normalize the amount produced
v[9]=UNIFORM(0,1);
v[10]=UNIFORM(0,v[7]); //learning to be obtained
v[11]=v[3]*(1-v[10]); //new know-how
if(v[9]<v[8]) //if there is learning
{
  if(v[1]==0)
    WRITES(p->up,"Knowhow0",v[11]); //write new know-how
  else if (v[1]==1)
    WRITES(p->up,"Knowhow1",v[11]);
}

RESULT(v[0])
//*****/
//*****/
//*****/
//TECHNOLOGY
//*****/

EQUATION("ProductivityKgSBase")
/*

```

Basic growth of productivity of capital good available to new investment

\*/

v[0]=0;

v[1]=V("ProdGrowth");

v[2]=norm(v[0],v[1]);

if(v[2]>v[0])

v[0]=v[2];

RESULT(v[0])

EQUATION("ProductivityKgS")

/\*

Productivity of capital good available to new investment

Grows over time according to ProductivityKgSBase

\*/

v[1]=VL("ProductivityKgS",1);

v[2]=V("ProductivityKgSBase");

v[0]=v[1]+v[2];

RESULT(v[0])

/\*\*\*/

/\*\*\*/

/\*\*\*/

//TEMP

/\*\*\*/

/\*\*\*/

/\*\*\*/

MODELEND

void close\_sim(void)

{

}