**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO**

**RESILIÊNCIA E APRENDIZAGEM NA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA
CANA-DE-AÇÚCAR: UM MODELO DE ANÁLISE ATRAVÉS DE CUSTOS E
MARGENS**

Henrique de Senna Mota

Orientador: Prof. Dr. Abraham Sin Oih Yu

SÃO PAULO

2017

Prof. Dr. Marco Antonio Zago
Reitor da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Adalberto Américo Fischmann
Diretor da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade

Prof. Dr. Roberto Sbragia
Chefe do Departamento de Administração

Prof. Dr. Moacir de Miranda Oliveira Júnior
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Administração

HENRIQUE DE SENNA MOTA

**RESILIÊNCIA E APRENDIZAGEM NA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA
CANA-DE-AÇÚCAR: UM MODELO DE ANÁLISE ATRAVÉS DE CUSTOS E
MARGENS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo para Obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Abraham Sin Oih Yu

Versão Corrigida

(versão original disponível na Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade)

SÃO PAULO

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção de Processamento Técnico do SBD/FEA/USP

Mota, Henrique de Senna

Resiliência e aprendizagem na cadeia de suprimentos da cana-de-
Açúcar: um modelo de análise através de custos e margens / Henrique
de Senna Mota. – São Paulo, 2017.

270 p.

Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2017.

Orientador: Abraham Sin Oih Yu.

1. Cadeia de Suprimentos 2. Simulação (Estatística) 3. Custo Indus-
trial 4. Cana-de-Açúcar 5. Aprendizagem Tecnológica I. Universidade de
São Paulo. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade.
II. Título.

CDD – 658.7

A todos aqueles que me estenderam a mão,
Minha gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos nem sempre são tarefas fáceis ou justas, uma página será pouco para agradecer a tantas pessoas que me tomaram pela mão e me ajudaram a dar passos importantes nesta trajetória. Este trabalho é um resultado de uma longa caminhada, apesar da dificuldade de expressar com absoluta clareza e simplicidade a vivência desta jornada, tenho a certeza que um novo caminho foi aberto e percorrido. É uma história de dificuldades e conquistas, a qual jamais será esquecida.

Meu primeiro agradecimento vai para todos aqueles que têm no íntimo, a sabedoria e orientações as quais conduziu-me pelos caminhos do saber e aqueles ausentes, cuja memória e ensinamentos continuam vivos. Agradeço pela paciência e dedicação.

A agradeço à minha família, fonte de inspiração, estímulo e incondicional apoio. É impossível não citar minha mãe Sueli, João Milton, tio Roque, Paulinha, tia Rosa e Breno, que além do apoio mais que “ponta firme”, também foram muito compreensivos com as renúncias que uma tese implica.

Estendo, também, estes agradecimentos à minha família como um todo, que constituiu a base necessária para a busca desse objetivo. Antes do esforço que empreendi, tive a sorte de nascer com uma base material e afetiva que podem ser consideradas enormes privilégios diante da dura realidade brasileira. Tarsa, Vó Penha, Tidedé e Mary, Meire e Turminha do Barulho, Bia, tia Lígia, tio Carlos, tio Robinson, Rosa, Rinaldo, Akio e Tamires.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Abraham Sin Oih Yu, pelos ensinamentos, ideias, discussões e elucidações. Me aceitou como aluno e me deixou livre para desenvolver o trabalho. Aprendi muito.

Ao Prof. Dr. Alceu Salles Camargo Júnior, que me abriu as portas e pelas proveitosas sugestões ao longo trabalho desenvolvido.

Ao Prof. Dr. Paulo Tromboni Nascimento, por suas críticas severas e valiosas contribuições de forma e conteúdo durante a etapa de qualificação e defesa desta tese.

Ao Prof. Dr. Pedro Valentim Marques pelos pertinentes exames quanto a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar e seus custos, além do Haroldo Torres, do PECEGE, que auxiliaram, ao abrir dados tão úteis na construção deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Celio Bermann, por seu valioso olhar sobre as questões políticas que permeiam as questões energéticas.

À Faviana Rôa e Alexander Alberto pela grande ajuda, guiamento e suporte nos meandros da resiliência.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Administração (PPGA) da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade (FEA), do Instituto de Energia e Ambiente (IEE), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), da Universidade de São Paulo (USP), com quem convivi nesta etapa e que me ensinaram o quanto ainda tenho que aprender.

Especialmente ao Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, por ter me aceito como aluno e ter me propiciado as condições de finalizar um projeto que foi e continuará sendo importante em minha trajetória profissional e acadêmica.

À Comissão de Pós-Graduação (CPG) nas figuras do Prof. Dr. Moacir de Miranda Oliveira Júnior e Prof. Dr. Martinho Isnard Ribeiro de Almeida e demais professores.

À toda equipe da secretaria, pelo apoio. Cida, Ana Paula, Adriana, Luigi e Carlos. Ao HU da USP nas figuras de seus médicos e toda equipe de atendimento. À Biblioteca e ao COMUT, pela disponibilidade e grande quantidade de artigos “garimpados”.

Aos colegas das turmas das disciplinas e amigos com os quais convivi, dividindo expectativas, ansiedades e ideias e debatendo, muitas vezes, acaloradamente, minhas convicções e minhas crenças profissionais. Saio melhor do que quando entrei. Especialmente aos amigos, “Heltão”, Evandro, Diego, Gabriel, Bassiro e Ana Lucia.

A todos vocês devo agradecer pelo momento. Espero que este trabalho possa contribuir, significativamente, para o entendimento de como avaliar e construir cadeias de suprimentos mais resilientes e que afetam, de alguma forma, tudo o que fazemos em nosso cotidiano: nossa energia, nossa economia, nosso futuro, nossa existência.

Finalizo com as palavras de meu orientador:

- “Você só sairá daqui quando se tornar um verdadeiro pesquisador.”

Não posso dizer que cumpri a tarefa, mas apenas que a comecei.

RESUMO

Resiliência e Aprendizagem na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-açúcar: um Modelo de Análise através de Custos e Margens

Henrique de Senna Mota

A resiliência, conceitualmente, tem sendo vista como a capacidade de reinventar dinamicamente os modelos de negócios e as estratégias, na mesma frequência com que as circunstâncias mudam, ou seja, um recurso para antecipar e se adaptar continuamente às mudanças que ameaçam a capacidade financeira ou o núcleo de poder das empresas. Levando em consideração o contexto da cana-de-açúcar e o conceito de resiliência foi estabelecido como objetivo principal, desta pesquisa, contribuir para o entendimento de como reconhecer ou identificar uma cadeia de suprimentos resiliente. Para tal, a abordagem metodológica municiou-se da construção de um modelo de simulação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, para os elos agrícola e industrial. Avaliou-se empiricamente o conceito de resiliência na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, por meio do Triângulo da Resiliência, proposto por Bruneau *et al.* (2003). Para este fim, utilizaram-se margens econômicas extraídas do modelo de simulação construído. Foi adaptado e estabelecido uma definição de cadeia de suprimentos resiliente compatíveis com Eventos Perturbadores Identificados de Longo Efeito. Analisou-se a relação da resiliência com os fatores de capacidades e fatores de vulnerabilidades na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil. Criou-se uma curva de experiência partilhando as reduções de custos específicos, dentro dos elos agrícola e industrial, procurando identificar avanços tecnológicos e caracterizar a aprendizagem responsável. Os resultados apontaram que foi possível identificar uma cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar resiliente pelo método proposto. Identificaram-se as Razões de Progressão, os eventos deflagradores mais significativos, as estratégias adotadas e os resultados das estratégias. Finalmente, compararam-se as fontes de resiliência e alteração de custos e margens identificadas, criando um quadro onde se agregava três naturezas de fatores de influência: tecnológicos, políticos e mercadológicos. Para cada um deles foi detalhado e examinado, criando uma tipologia de fatores capazes de influenciar os custos e margens da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Os resultados, também, retratam uma redução de custos ao longo do tempo, com efeitos de curto prazo para a cadeia. O trabalho se destaca pela inovação no método de uso da resiliência, além de sua aplicação inédita na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, uma ampliação do conhecimento no desenvolvimento de um modelo capaz de gerar margens econômicas, dada certas tecnologias, dentro de uma usina produtora de etanol, açúcar e bioenergia, assim como uma extensiva identificação retrospectiva de todas as influências que podem afetar os custos e margens, contribuindo para o maior entendimento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Palavras-Chave: Resiliência; Cadeia de suprimentos; Energia; Cana-de-Açúcar; Etanol; Modelagem; Gestão Energética; Curva de Experiência; Gestão de Operações; Custos; Margem; Cadeia Agroindustrial.

ABSTRACT

Resilience and Learning in the Sugarcane Supply Chain: An Analysis Model through Costs and Margins

Henrique de Senna Mota

Conceptually resilience has been seen as the ability to dynamically reinvent business models and strategies at the same frequency as circumstances change, that is, a resource to continually anticipate and adapt to changes that threaten financial capacity or the core of business power. Taking into account the context of sugarcane and the concept of resilience it was established as the main objective of this research is to contribute to the understanding of how to recognize or identify a resilient supply chain. Therefore, the methodological approach was based on the construction of model of simulation of the sugarcane supply chain in Brazil, for the agricultural and industrial links. The concept of resilience in the sugarcane supply chain was empirically evaluated through the Resilience Triangle proposed by Bruneau et al. (2003). For this purpose, economic margins extracted from the constructed simulation model were used. A resilient supply chain definition that is compatible with Long-Term Identified Disturbing Events has been adapted and established. The relationship among resilience, capacity factors and vulnerability factors in the sugarcane supply chain in Brazil was analyzed. An experience curve has been created by sharing the specific cost reductions within the agricultural and industrial links, seeking to identify technological advances and characterize responsible learning. The results showed that the proposed method can identify the sugarcane supply chain resilience. The Progression Ratios, the most significant triggers, the strategies adopted and the results of the strategies were identified. Finally, the resilience sources, the changes in costs, and the identified margins were compared, creating a framework where three types of influence factors were added: technological, political and market. Each one of them was detailed and examined, creating a typology of factors capable of influencing the costs and margins of the sugarcane supply chain. The results also portray a cost reduction over time, with short-term effects for the chain. The work stands out for its innovation in the method of using resilience, as well as its unprecedented application in the sugarcane supply chain. That means, an expansion of knowledge in the model of a development capable of generating economic margins, due to certain technologies in an ethanol, sugar and bioenergy plant, as well as an extensive retrospective identification of all influences that may affect costs and margins. This contributes to a better understanding of the supply chain of sugarcane.

Keywords: Resilience; Supply Chain; Energy; Sugar cane; Ethanol; Modeling; Energy Management; Experience Curve; Operations Management; Costs; Margin; Agroindustrial Chain.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Problema e Justificativa da Pesquisa	28
1.2	Objetivos da Pesquisa	31
1.3	Contribuições da Pesquisa	31
1.4	Estruturação e Delineamento da Pesquisa	34
1.4.1	Descrição do Capítulos	35
2	REVISÃO DA LITERATURA	37
2.1	Resiliência	37
2.1.1	Definição de Vulnerabilidade e Capacidade	44
2.1.2	Habilidades de Resiliência: Flexibilidade e Redundância.....	44
2.1.3	Estratégias Reativas e Proativas na Resiliência.....	46
2.1.4	Ampliação e Adaptação do Triângulo da Resiliência	48
2.1.5	Métodos de Pesquisas Dominantes sobre a Resiliência	50
2.2	Modelos de Simulação	51
2.2.1	Validação de Modelos de Simulação	54
2.2.2	Modelos de Simulação na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar.....	55
2.3	Curva de Experiência.....	57
2.3.1	Utilização das Curvas de Experiência	61
2.3.2	Curvas de Experiência no Setor Energético e na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar	65
2.4	Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar	68
2.4.1	Histórico	68
2.4.2	Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar e seus Elos	72
2.4.3	Elo Agrícola.....	72
2.4.3.1	Preparo do Solo	73
2.4.3.2	Plantio.....	74
2.4.3.3	Tratos Culturais da Cana Planta	76
2.4.3.4	Tratos Culturais da Cana Soca.....	77
2.4.3.5	Colheita.....	77
2.4.3.6	Transporte.....	79
2.4.4	Elo Industrial	80
2.4.4.1	Etapas Comuns do Processo da Cana-de-Açúcar	81
2.4.4.1.1	Recepção, Limpeza e Preparo da Cana	81
2.4.4.1.2	Moagem ou Extração do Caldo	82
2.4.4.1.3	Tratamento do Caldo	82
2.4.4.1.4	Filtração e Torta de Filtro.....	82
2.4.4.2	Produção de Etanol em uma Usina de Cana-de-Açúcar (A)	83
2.4.4.2.1	Fermentação	83
2.4.4.2.2	Destilação e Desidratação.....	83

2.4.4.3 Produção de Açúcar em uma Usina de Cana-de-Açúcar (B)	84
2.4.4.3.1 Evaporação, Cozimento, Centrifugação e Secagem	84
2.4.4.4 Produção de Bioeletricidade em uma Usina de Cana-de-Açúcar (C) ...	84
2.4.4.4.1 Uso do Bagaço de Cana-de-Açúcar	85
2.4.4.4.2 Cogeração, Caldeiras e Geradores	86
2.4.4.4.3 Evolução das Caldeiras e Níveis Tecnológicos	87
2.4.4.5 Atividades de Suporte (D)	92
2.4.4.5.1 Laboratórios, Oficinas e Estação de Tratamento de Água	92
2.4.4.5.2 Suporte Administrativo	92
2.4.5 Produtividade Agrícola da Cana-de-Açúcar	93
2.4.6 Insumos	94
2.4.7 ATR e sua Remuneração	94
2.4.8 Tributos aplicáveis à cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar	96
2.5 Considerações sobre Custos e Margens na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar	98
2.5.1 Definição de custo de produção	99
2.5.2 Custos Diretos e Indiretos	100
2.5.3 Custos Fixos e Variáveis	100
2.5.4 Definição de Custo Implícito e Custo Explícito	100
2.5.5 Definição de Custo Operacional	101
2.5.6 Margens	103
2.6 Dificuldades, Desafios e Problemas da Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar	103
2.7 Conclusões do Capítulo – Referencial Teórico	105
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	107
3.1 Método Indutivo e Proposição de Pesquisa	107
3.2 Tipo de Pesquisa	107
3.3 Enquadramento Metodológico da Simulação	109
3.4 Enquadramento Metodológico da Análise Qualitativa	109
3.5 Concepção do Modelo de Simulação	113
3.6 Estruturação do Modelo de Simulação para Custos e Margens	114
3.7 Ferramentas de apoio ao desenvolvimento dos processos do modelo	115
3.8 Simbologia	115
3.9 Recolhimento de Dados	116
3.9.1 Detalhamento das Fontes no Recolhimento de Dados	117
3.10 Característica Detalhadas do Modelo Simulação	118
3.11 Fazenda Padrão	120
3.12 Usina Padrão	124
3.13 Detalhamento das Características da Modelagem das Usinas Padrão	125
3.14 Usinas de etanol, de açúcar e de tipo misto	131
3.15 Índice de Mecanização e Operações Mecanizadas	133
3.16 Eficiências do Processo	134
3.17 Cálculo dos Tributos	135
3.18 O Modelo Completo e seus Subsistemas	136
3.18.1 O Modelo de Simulação para Elo Agrícola	136
3.18.2 O Modelo de Simulação para Elo Industrial	139
3.18.2.1 O Modelo de Simulação para o Sistema de Cogeração	142

3.18.3 O Modelo Simplificado Completo	144
3.19 Execução da Simulação	145
3.20 Análise de Sensibilidade e Validação do Modelo	146
3.20.1 Análise de Sensibilidade do Elo Agrícola	146
3.20.2 Análise de Sensibilidade do Elo Industrial	148
3.20.3 Validação do Modelo de Simulação Desenvolvido	150
3.21 Aspectos Metodológicos e Limitações da Curva de Experiência	152
3.22 Aspectos Metodológicos da Resiliência e o E.P.I.L.E de desempenho	154
3.22.1 Cálculo da Integral na Resiliência	156
3.23 Limitações Metodológicas	157
3.23.1 Limitações do Modelo de Simulação	157
3.23.2 Limitação de Estudo de Caso	158
3.23.3 Limitação de dados da resiliência	159
3.24 Conclusões do Capítulo – Metodologia	159
4 RESULTADOS	160
4.1 Cronologia dos Eventos Deflagradores	161
4.1.1 Período Pré-Desregulamentação	161
4.1.2 Período Pós-Desregulamentação	166
4.2 Resultados da Curva de Experiência	175
4.2.1 Curva de Experiência do Elo Agrícola	177
4.2.2 Curva de Experiência do Elo Industrial	178
4.2.3 Curva de Experiência: Custos Totais	180
4.2.4 Curva de Experiência: Custos Totais por Tendências	181
4.2.5 Razão de Progressão (PR) das Curvas de Experiência	186
4.2.6 Discussão com Trabalhos Similares	187
4.3 Resultados da Resiliência	189
4.3.1 Fatores de Capacidade e Vulnerabilidade da Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar	189
4.3.2 Resiliência e Aprendizagem: Fatores Identificados	196
4.3.2.1 Tecnologias do Elo Agrícola e Industrial	198
4.3.2.1.1 Tecnologias do Elo Agrícola	201
4.3.2.1.2 Tecnologias do Elo Industrial	202
4.3.2.2 Instrumentos Políticos e Opinião Pública	203
4.3.2.3 Reações do Mercado	206
4.3.3 Medição da Resiliência	213
4.3.4 Discussão de Aspectos do Comportamento da Resiliência	222
4.3.5 Eventos Deflagradores, Estratégias e seus Resultados	224
5 CONCLUSÕES	228
5.1 Conclusões do Modelo de Simulação	228
5.2 Conclusões da Resiliência	229
5.3 Conclusões da Curva de Experiência	231
5.4 Relações de Causa-Efeito e Causalidade	232
5.5 Conclusões Metodológicas	232
5.6 Trabalhos Futuros	233
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	236
APÊNDICE I	261

APÊNDICE II.....	264
APÊNDICE III	265
APÊNDICE IV	267
APÊNDICE V	268
APÊNDICE VI.....	269

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPMP	<i>Association of Business Process Management Professionals</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
API	Interface de Programação de Aplicativos
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
BA	Brasil Açucareiro
BCG	<i>Boston Consulting Group</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BP	<i>British Petroleum</i>
CENAL	Comissão Executiva Nacional do Alcool
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
CIDE	Contribuições de Intervenção no Domínio Econômico
CIMA	Conselho Interministerial do Açúcar do Alcool
CINAL	Comissão Interministerial do Alcool
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CNAL	Conselho Nacional do Alcool
COE	Custo Operacional Efetivo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONSECANA	Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado São Paulo
COSAN	Centro-Oeste S/A Açúcar e Alcool
COT	Custo Operacional Total
CRES	Crescimento
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
CT	Custo Total
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DVU	Desfibrador Vertical Único
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
E.P.I.L.E.	Evento Perturbador Identificado de Longo Efeito
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>

FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FFV	<i>Flex-fuel vehicles</i>
FHC	Fernando Henrique Cardoso
GEE	Gases do Efeito Estufa
ha	hectare
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IGP – DI	Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna
IR	Imposto de Renda
FGV	Fundação Getúlio Vargas
F&A	Fusões e Aquisições
JIT	<i>Just in Time</i>
kg	Quilogramas
km	Quilômetros
M	Mega ou milhão
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MEG	Mistura de Metanol, Etanol e Gasolina
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mt.p.ano	Milhões de toneladas por ano
MW	Mega Watts
MW/h	Mega Watts/hora
PBE	<i>Population Balance Equations</i>
PCTS	Pagamento da Cana-de-Açúcar pelo Teor de Sacarose
PECEGE	Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas
PER	Ponto de Equilíbrio da Rede
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PIB	Produto Interno Bruto
PLANALSUCAR	Programa de Melhoramento da Cana-de-Açúcar
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> ou Controlador Lógico Programável
Pa	Nível Mínimo Aceitável de Performance
Po	Nível de Performance Normal
PR	<i>Progress Ratio</i> ou Razão de Progressão

PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
OMC	Organização Mundial do Comércio
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ORPLANA	Organização dos Plantadores de Cana do Centro-Sul do Brasil
kW	Quilowatt
kW/h	Quilowatt/hora
REC	Recuperação
RES	Resistência
RESI	Resiliência
SCRES	<i>Supply Chain Resilience</i> ou Cadeia de Suprimentos Resiliente
S.I.	Sistema Internacional de Unidades
SIN	Sistema Elétrico Interligado Nacional
SPE	Sociedade de Propósito Específico
t	tonelada
tc	tonelada de cana
t/ha	toneladas por hectare
TCD	Toneladas de Cana Diárias
TGS	Teoria Geral dos Sistemas
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRS	Sacarose por Tonelada Totais Redutíveis de Açúcar
TUST	Tarifas de Uso dos Sistemas de Transmissão
TUSD	Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição
TVH	Toneladas de Vapor Hora
UDOP	União dos Produtores de Bioenergia
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
USP	Universidade de São Paulo
VPL	Valor Presente Líquido
v/v	volume por volume

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Triângulo da Resiliência proposto por Bruneau <i>et al.</i> (2003)	28
FIGURA 02 – Estrutura de Capítulos	36
FIGURA 03 – Perfil da Perturbação	37
FIGURA 04 – Estratégias para desenvolver Resiliência às Perturbações da Cadeia de Suprimentos	47
FIGURA 05 – Operacionalizando a Resiliência na Cadeia de Suprimento (SCRES) ...	49
FIGURA 06 – As Quatro fases da Curva de Experiência da BCG	59
FIGURA 07 – Duas Maneiras de se visualizar uma Curva de Experiência em escala (a) linear e (b) log-log com uma redução de custo de 20% para cada duplicação do total de unidades produzidas	63
FIGURA 08 – Cadeia de Suprimentos simplificada da Cana-de-Açúcar	72
FIGURA 09 – Macroprocesso simplificado de produção de Cana-de-Açúcar	73
FIGURA 10 – Composições de Transporte mais usuais para a Cana-de-Açúcar	80
FIGURA 11 – Processo simplificado de Produção de Açúcar, Etanol e Eletricidade em uma Usina de Cana-de-Açúcar	81
FIGURA 12 – Evolução do Uso das Caldeiras	90
FIGURA 13 – Evolução dos Impostos ao Consumidor	97
FIGURA 14 – Esquema simplificado do CT, COT e COE.....	102
FIGURA 15 – Tipo de Pesquisa Adotada	109
FIGURA 16 – Modelo Elo Agrícola	139
FIGURA 17 – Modelo Elo Industrial sem detalhamento da Cogeração	142
FIGURA 18 – Modelo de Cogeração	143
FIGURA 19 – Modelo Completo Simplificado	144
FIGURA 20 – Exemplo do Simulador da Cana-de-Açúcar – Etanol para ano de 2004 - 100 bar	145
FIGURA 21 – Representação da Função $y=f(x)$ segmentada em diversas áreas sob a curva de base dx e altura y , para compor a área A	157
FIGURA 22 – Cronologia pré e pós desregulamentação	174

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 – Consumo Específico x Pressão e Temperatura	88
GRÁFICO 02 – Evolução da Produtividade em t/ha ao longo dos anos.....	94
GRÁFICO 03 – Volume de Cana-de-Açúcar por Custo Agrícola (log-log) – tendências	178
GRÁFICO 04 – Volume de Etanol por Custo Industrial (log-log) – tendências	179
GRÁFICO 05 – Volume de Etanol por Custo Total (log-log) – 1975 a 2014	181
GRÁFICO 06 – Volume de Etanol por Custo Total (log-log) – três tendências – 1975 a 1982; 1982 a 2010; 2011 a 2014	186
GRÁFICO 07 – Resiliência na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar – Curva de Desempenho	216
GRÁFICO 08 – Evolução do Volume de Etanol (m ³ /ano)	265
GRÁFICO 09 – Evolução do Volume da Cana-de-Açúcar (t/ano)	265
GRÁFICO 10 – Evolução do Volume de Produção de Açúcar (t/ano).....	265
GRÁFICO 11 – Evolução da Área Plantada de Cana-de-Açúcar (ha/ano).....	266
GRÁFICO 12 – Distribuição do Volume de ATR – Açúcar e Etanol (%)	266
GRÁFICO 13 – Evolução do Volume de ATR por tonelada de Cana-de-Açúcar/ano	266
GRÁFICO 14 – Entrada, Fechamento e Reativação de Usinas	268

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – Fatores do Construto da Vulnerabilidade	25
QUADRO 02 – Fatores do Construto da Capacidade	26
QUADRO 03 – Resiliência em Modelos de Negócios	42
QUADRO 04 – Proposta do Estudo de Caso correlacionando-o com Eisenhardt (1989)	111
QUADRO 05 – Simbologia / Unidade Etapa Produtiva / Indicador	115
QUADRO 06 – Opções do Modelo de Negócio Adotado para Simulação – Elo Agrícola	122
QUADRO 07 – Detalhamento de Alguns dados Técnicos e Considerações de Desenvolvimento do Modelo das Usinas Padrão	127
QUADRO 08 – Detalhamento das Características da Modelagem das Usinas Padrão	128
QUADRO 09 – Detalhamento dos Valores <i>Turn-Key</i>	128
QUADRO 10 – Opções do Modelo de Negócio Adotado para Simulação – Elo Industrial	130
QUADRO 11 – Detalhamento das Características do <i>Mix</i> de Produtos das Usinas	132
QUADRO 12 – Cálculo dos Tributos sobre o Etanol	136
QUADRO 13 – Validação do Modelo de Simulação Desenvolvido.....	151
QUADRO 14 – Fatores do Constructo de Vulnerabilidade Identificados na Cadeia de Suprimentos de Cana-de-Açúcar	192
QUADRO 15 – Fatores do Constructo de Capacidade Identificados na Cadeia de Suprimentos de Cana-de-Açúcar	194
QUADRO 16 – Evolução das Tecnologias Agrícolas e Industriais Identificadas	200
QUADRO 17 – Instrumentos Políticos e Opinião Pública.....	204
QUADRO 18 – Reações do Mercado.....	207

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Decaimento de Produtividade entre os sistemas de 12 e 18 meses do 1º ao 5º corte	75
TABELA 02 – Informações Complementares: Parâmetros Utilizados.....	133
TABELA 03 – Resumo das Eficiências Industriais consideradas na Simulação	135
TABELA 04 – Análise de Sensibilidade do Custo Agrícola	147
TABELA 05 – Preço, Custo Operacional Efetivo (COE) e Custo Total (CT) – Cana-de-Açúcar.....	176
TABELA 06 – Tendências, Razão de Progressão e Variação por Dobra	186
TABELA 07 – Cálculo das Resiliências	218
TABELA 08 – Exposição dos Principais Fatores de Vulnerabilidade e Fatores de Capacidade na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar com medição da Resiliência	220
TABELA 09 – PR, Intervalo, Eventos Deflagradores, Estratégias e Resultados.....	226
TABELA 10 – Equações para criação do gráfico de Resiliência na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar	264
TABELA 11 – Usina Padrão em porcentagem/ano	270

**Resiliência:
sofrer o impacto,
recuperar,
voltar em um estado preferencialmente melhorado.**

Adaptado de Tukamuhabwa *et al.* (2015)

1 INTRODUÇÃO

As cadeias de suprimentos são redes complexas de empresas que continuamente experimentam turbulências, provocando um potencial para perturbações imprevisíveis. A globalização dos negócios, a especialização das fábricas, a distribuição centralizada, o aumento da terceirização, a redução da base de fornecedores, o aumento da volatilidade da demanda, as inovações tecnológicas e a adoção de filosofias como a manufatura enxuta, a resposta eficiente ao consumidor e os programas de resposta rápida acarretaram novos problemas para as cadeias de suprimentos, porque as tornou mais vulneráveis (NORRMAN; JANSSON, 2004; PETTIT; FIKSEL; CROXTON, 2010).

Uma vez que uma cadeia de suprimentos é perturbada, seu desempenho, rentabilidade, rendimento operacional, vendas, estrutura de custos, ativos e estoques são afetados negativamente (HENDRICKS; SINGHAL; ZHANG, 2009), assim como o desempenho financeiro de curto prazo e a satisfação dos seus integrantes (JI; ZHU, 2008). Embora esses itens citados provavelmente sejam consequências primárias, também existe a probabilidade de consequências secundárias que se estendem e incluem os parceiros da cadeia de suprimentos. Se estes perceberem que o ataque foi possível devido a esforços insuficientes, o relacionamento na cadeia de suprimentos pode sofrer e ser dissolvido.

Com o intuito de controlar essas ameaças, alguns autores sugeriram empregar a gestão de riscos, que na prática implica examinar todos os resultados possíveis de um processo, ponderando então, os retornos possíveis contra os riscos potenciais do investimento (CARTER, 1972). Tang (2006a) afirmou que a técnica foi aplicada a diferentes elos da cadeia de suprimentos e para várias possíveis causas de perturbação; concluindo que, além de oneroso, as técnicas tradicionais não conseguem avaliar o risco baseado na probabilidade de ocorrência e sua gravidade estimada. Em muitas aplicações, os riscos podem ser quantificados com base em dados históricos, mas a avaliação de riscos requer suposições baseadas em informações subjetivas, fato que leva a maior fraqueza da gestão de riscos: sua incapacidade de caracterizar adequadamente os eventos com baixa probabilidade e alta consequência (KUNREUTHER, 2006) apresentando insuficiência para avaliar as complexidades das cadeias de suprimentos, suas intrincadas interdependências e preparar as empresas para os seus desafios (HERTZ e HOWARD, 1983; STARR; NEWFROCK; DELUREY, 2003).

Posteriormente, alguns autores propuseram a resiliência como uma abordagem válida para que as cadeias de suprimentos se adaptem às mudanças (PETTIT; FIKSEL; CROXTON, 2010) e superem as perturbações (PECK, 2005; RICE; CANIATO, 2003; TANG, 2006b), argumentando que ao incrementar a resiliência da cadeia de suprimentos, as capacidades também incrementam e as vulnerabilidades diminuem. De fato, gerenciar a resiliência da cadeia de suprimentos é um método proativo que pode complementar e aprimorar o gerenciamento tradicional de riscos (PETTIT; FIKSEL; CROXTON, 2010).

Neste sentido, a resiliência se relaciona a Teoria Geral dos Sistemas (TGS) onde von Bertalanffy (1973) teoriza a relação dos sistemas vivos com os sistemas organizacionais, onde as empresas reagem ao seu ambiente, ajustando-se e adaptando-se para sobreviver, com consequentes mudanças dos seus mercados, dos seus produtos, dos seus processos, das suas estratégias e da sua estrutura organizacional. Churchman (1968) reforça o entendimento de que as organizações estão em constante mudança e interação continuamente com o meio ambiente que as muda, e elas, por sua vez, também mudam. A ênfase, dada pelos autores (*ibid.*) às relações entre organização e ambiente, indica uma importância correta ao papel que estas inter-relações exercem. A organização depende, muitas vezes, para sua sobrevivência, da eficiência de sua adaptabilidade ao ambiente, o que quer dizer, que a organização mais propensa a sobreviver é aquela que se adapta internamente, reagindo de acordo com as demandas de ambiente cada vez mais complexas.

Etimologicamente falando, a palavra resiliência deriva do particípio presente do verbo latino *resilire*, que significa “pular para trás” ou “recuar” (RESILIENCE, [S.d.]). Resiliência é um conceito oriundo da física, que se refere à propriedade de um material de retornar a seu tamanho e forma original, após a remoção de um estresse, que lhe produziu deformação, graças à energia que ele absorve e que logo libera à medida que retorna a seu estado inicial.

O conceito de resiliência é usado extensivamente em engenharia, ciências ecológicas e pesquisa organizacional. O termo resiliência entrou no vocabulário de negócios quando os pesquisadores abordaram os componentes que contribuem para perturbações da cadeia de suprimentos e os fatores que ajudam as empresas na prevenção e enfrentamento dessas perturbações (CHRISTOPHER; PECK, 2004; HAMEL; VÄLIKANGAS, 2003; KLEINDORFER; SAAD, 2009; TANG, 2006b). Como esses diferentes pontos de vista

se cruzam com o domínio do papel tradicional da gestão de riscos na identificação e redução de ameaças (MANUJ; MENTZER, 2008; TANG, 2006a), o conceito de resiliência começou a complementar as técnicas analíticas que não requerem quantificação exata, enumeração completa de possibilidades ou suposições de um futuro representativo (PETTIT; CROXTON; FIKSEL, 2013)

No entanto, até a data presente, os pesquisadores ainda não unificaram nem resolveram as diferentes conceitualizações e abordagens da resiliência, tendo-se estudos que consideram a resiliência como:

- uma maneira de se envolver positivamente com falhas, fraquezas, desvios ou impactos à medida que se tornam aparentes;
- estudos que sugerem que a resiliência é uma forma de evitar impactos externos com a implementação de princípios de *design*;
- conceitualizações que enfatizam que a resiliência envolve a recuperação de eventos extremos e desastres;
- e estudos que idealizam a resiliência como um resultado de tentativas de recuperação e aprendizado.

Contudo, observa-se que a resiliência é abordada dentre cinco perspectivas segundo Linnenluecke (2017):

- respostas das organizações às perturbações externas;
- confiabilidade organizacional interna;
- fortalezas dos funcionários;
- adaptação de modelos de negócios e;
- desenhos que mitigam vulnerabilidades e perturbações da cadeia de suprimento.

A autora (*ibid.*) ressalta, ainda que, entre 1977 e 2014, tem-se publicado em torno de 339 artigos, livros e capítulos de livro para abordar essas linhas de forma pura e com alguns intercâmbios na convergência entre as linhas de pesquisa.

A resiliência conceitualmente é vista nesta tese, como a capacidade de reinventar dinamicamente os modelos de negócios e as estratégias, na mesma frequência com que as circunstâncias mudam, sendo esta a utilidade da resiliência: um recurso para antecipar

e se adaptar, continuamente, às mudanças que ameaçam à sua capacidade financeira ou seu núcleo de poder.

Salienta-se, que existem ligações entre cada vulnerabilidade e um conjunto específico de capacidades que podem melhorar diretamente a resiliência. No entanto, embora as vulnerabilidades excessivas gerem riscos, o contrário também é perigoso: ter recursos em excesso quando comparados com as vulnerabilidades corroerá a rentabilidade. Portanto, deve existir um equilíbrio entre as capacidades e vulnerabilidades para atingir a resiliência (PETTIT; FIKSEL; CROXTON, 2010).

Neste sentido, no Quadro 01, apresentam-se os Fatores que subjazem ao construto da Vulnerabilidade e no Quadro 02, mostram-se os Fatores correspondentes ao construto de Capacidade. Ambos os construtos pertencem à primeira metodologia reportada na literatura, que têm como intuito definir a resiliência em termos de variáveis mensuráveis.

É importante destacar que os fatores que promovem a resiliência vão além do nível organizacional de análise, podendo ter um escopo mais amplo, como na indústria, na política ou mesmo em nível mais abrangente da sociedade.

A exploração, neste trabalho, de forças e fraquezas das cadeias de suprimentos resilientes, através dos construtos de capacidade e vulnerabilidade, se constitui em uma análise atrativa, pois as técnicas tradicionais de gestão de riscos têm dificuldades de avaliar cadeias de suprimentos complexas e examinar as interdependências intrincadas que se apresentam.

Quadro 01 - Fatores do Construto da Vulnerabilidade

Fator de Vulnerabilidade	Definição	Subfatores
Turbulência	Ambiente caracterizado por mudanças frequentes em fatores externos que vão além do seu controle.	Catástrofes naturais, disrupções geopolíticas, imprevisibilidade da demanda, flutuações nas moedas e preços, falhas tecnológicas e pandemias.
Ameaças deliberadas	Ataques intencionais destinados a interromper operações ou causar danos humanos ou financeiros.	Roubo, terrorismo, sabotagem, conflitos trabalhistas, espionagem, grupos de interesses especiais, responsabilidade por produtos defeituosos.
Pressões externas	Influências, não especificamente direcionadas à empresa, que criam restrições ou barreiras comerciais.	Inovação competitiva, mudança social e cultural, mudança política e regulatória, pressões de preços, responsabilidade corporativa e mudança ambiental.
Recursos limitados	Restrições da produção com base na disponibilidade dos fatores de produção.	Capacidade do fornecedor, produção e distribuição, disponibilidade de recursos humanos, matérias-primas e serviços públicos.
Sensibilidade	Importância de condições cuidadosamente controladas para a integridade do produto e do processo.	Complexidade, pureza do produto, materiais restritos, fragilidade, confiabilidade dos equipamentos, perigos de segurança, visibilidade dos <i>stakeholders</i> , perfil simbólico da marca e concentração de capacidade.
Conectividade	Grau de dependência e de interdependência de entidades externas.	Rede sem escala, dependência de informações, grau de terceirização, canais de importação e exportação, dependência de fontes e origens especiais.
Perturbações do fornecedor e/ou cliente	Suscetibilidade de fornecedores e clientes às forças externas ou perturbações.	Confiabilidade do fornecedor, perturbações do cliente.

Fonte: Pettit; Fiksel; Croxton, (2010)

Quadro 02 - Fatores do Construto da Capacidade

Fator de Capacidade	Definição	Subfatores
Flexibilidade no abastecimento	Habilidade de mudar rapidamente os fornecedores ou o modo de receber as entradas.	Desenho modular de produto, múltiplos usos, flexibilidade de fornecimento, múltiplos fornecedores.
Flexibilidade no pedido do cliente	Habilidade de mudar rapidamente o canal de distribuição ou o modo de efetuar as entregas.	Canais alternativos de distribuição, compartilhamento de risco, adiamento de produção, gerenciamento de inventário, requisitos de reencaminhamento.
Capacidade	Disponibilidade de ativos para permitir níveis de produção sustentados.	Capacidade de reserva produtiva, redundância, fontes de energia de <i>backup</i> e comunicações.
Eficiência	Capacidade de produzir resultados com requisitos mínimos de recursos.	Eliminação de resíduos, produtividade do trabalho, utilização de ativos, redução da variabilidade do produto, prevenção de falhas.
Visibilidade	Conhecimento do estado dos ativos operacionais e do meio ambiente institucional	Recolhimento de <i>Business Intelligence</i> , tecnologia da informação, produtos, visibilidade de ativos e pessoas, intercâmbio de informações.
Adaptabilidade	Capacidade de modificar operações em resposta a desafios ou oportunidades	Rápido reencaminhamento de requisitos, redução de <i>lead time</i> , jogos estratégicos e simulação, aproveitando as vantagens de disrupções, desenvolvimento de tecnologias alternativas.
Antecipação	Capacidade de discernir eventos futuros ou situações em potencial	Monitoramento de sinais de alerta precoce, modelos de previsão, <i>near-miss</i> , planejamento de contingência, preparação, gerenciamento de riscos, planejamento de continuidade de negócios, reconhecimento de oportunidades.
Recuperação	Capacidade de retornar ao estado operacional normal rapidamente	Gerenciamento de crise, mobilização de recursos, estratégia de comunicação, mitigação de consequências de desastres.
Dispersão	Distribuição ampla ou descentralização de ativos	Tomada de decisão distribuída, capacidade e ativos distribuídos, descentralização de recursos-chave, empoderamento específico de localização, dispersão de mercados.
Colaboração	Capacidade de trabalhar eficazmente com outras entidades para benefício mútuo	Previsão colaborativa, gestão de clientes, comunicações, adiamento das ordens, gerenciamento do ciclo de vida do produto, compartilhamento de riscos com parceiros.
Organização	Estruturas de recursos humanos, competências e cultura organizacional	Incentivo a qualificação dos funcionários, responsabilização e empoderamento, trabalho em equipe, resolução criativa de problemas, treinamento cruzado, substituição da liderança e cultura de cuidar.
Posição de Mercado	<i>Status</i> de uma empresa ou seus produtos em mercados específicos	Diferenciação do produto, fidelização/menção do cliente, parcela de mercado, patrimônio da marca, relacionamento e comunicações com clientes.
Segurança	Defesa contra intrusão ou ataque deliberado	Proteções em camadas, restrições de acesso, colaboração de troca de informação com governos, segurança cibernética e segurança da informação.
Força Financeira	Capacidade para absorver flutuações no fluxo de caixa	Seguros, diversificação de carteiras, riscos financeiros e liquidez, margem de preço, rentabilidade e acesso a financiamentos.

Fonte: Pettit; Fiksel; Croxton (2010)

A preocupação com a medição da resiliência, talvez porque ela deriva da gestão de riscos, não é nova, pois, as tentativas existentes para detectar a resiliência organizacional empregam análises retrospectivas, após um impacto adverso ter ocorrido (SOMERS, 2009). No entanto, tratam-se, predominantemente, de estudos transversais de casos ou inquéritos focados nas estratégias que uma cadeia de suprimento pode usar ou já usou, sendo poucos os estudos longitudinais que permitem observar como uma cadeia de suprimentos responde, se adapta ou se recupera ao longo do tempo (TUKAMUHABWA *et al.*, 2015).

Deve-se notar que muitos desses estudos assumem *a priori*, que observações de fenômenos ou fatores organizacionais explicam o conceito de resiliência. No entanto, ainda não foi explicitamente estabelecido como ela é delimitada a partir de conceitos relacionados, como a curva de experiência. Pior ainda, é o fato de que a maioria desses estudos não contemplam a possibilidade de organizações as quais não experimentaram perturbações graves, desvios ou crises, por já utilizarem recursos e capacidades para construção da resiliência, contra uma série de riscos possíveis (LINNENLUECKE, 2017). Além disso, a maioria desses estudos empíricos foi realizado em países desenvolvidos, nomeadamente na União Europeia e nos Estados Unidos (TUKAMUHABWA *et al.*, 2015).

Sabe-se que os sistemas quantitativos de informação analítica são recursos importantes para apoiar as tomadas de decisões na gestão empresarial; porém nem todos os aspectos podem ser facilmente quantificados. Embora o conceito de resiliência tenha uma dimensão técnica dentro da qual possa-se medir a resistência da infraestrutura e a rapidez de sua recuperação, ele também tem uma dimensão social, organizacional e econômica, que são mais difíceis de medir.

Neste sentido, tem sido proposto novas metodologias para avaliar a resiliência de um sistema, cuja origem é o Triângulo de Resiliência (ver Figura 01), onde se considera fatores como o nível de desempenho, estimativa de perdas e tempo de recuperação (BRUNEAU *et al.*, 2003).

Esta metodologia tem sido utilizada principalmente para medir a resiliência de elementos de infraestrutura física e logística, na presença de um desastre natural (BRUNEAU; REINHORN, 2007; CIMELLARO; REINHORN; BRUNEAU, 2009) e que incorpora

indicadores que capturam a natureza multidimensional da resiliência, mesmo que indiretamente (ZOBEL, 2011a).

Figura 01 - Triângulo da Resiliência proposto por Bruneau *et al.* (2003)
Fonte: (ZOBEL, 2011b)

Os resultados desta nova abordagem analítica são promissores, porque permitem não só caracterizar e analisar o comportamento resiliente do sistema, mas também levam a uma melhor compreensão das capacidades do sistema e da eficácia das estratégias para melhorar sua resiliência (ZOBEL *et al.*, 2012). Ao combinar modelos de simulação apropriados com os dados empíricos disponíveis, pode-se começar a identificar diferentes políticas e estratégias para lidar com as disrupções e, em seguida, avaliar o impacto nas capacidades do sistema.

1.1 Problema e Justificativa da Pesquisa

Considerando que a pesquisa de resiliência tem sido altamente dependente do contexto e que muitas vezes não é determinada apenas por recursos e capacidades organizacionais, mas pelas inter-relações e interações que as organizações têm com outros atores, ao longo da cadeia de suprimentos. Em vista disto, vários autores apontam a necessidade da operacionalização e avaliação empírica do conceito de resiliência, particularmente no contexto da cadeia de suprimentos, sendo que o proposto em teoria pode não se aplicar na prática (LINNENLUECKE, 2017; TUKAMUHABWA *et al.*, 2015).

Da mesma forma, embora a maioria dos estudos sobre uma cadeia de suprimento resiliente exige a abundância de recursos em termos de diversidade e redundância (LINNENLUECKE, 2017), ainda não foi totalmente explorado se certos recursos, capacidades ou estruturas organizacionais realmente promovem a resiliência e qual é a configuração mais apropriada para alcançar resultados ótimos.

Além disso, como apontam Scavarda *et al.* (2015) a literatura acadêmica necessita de estudos empíricos sobre resiliência em cadeias de suprimentos. Somado ao sentido apontado pelos autores (*ibid.*), detectou-se uma carência de estudos que tem empregado análises retrospectivas, para diagnosticar *quão resiliente* uma organização ou seus sistemas são em um conjunto de situações em certos períodos temporais, e como essas evidências podem melhorar a resiliência organizacional no futuro.

O presente trabalho, também, fornece uma visão pertinente e valiosa ao se optar por um conteúdo empírico e longitudinal. Isso significa, que se traz mais legitimidade no decorrer das avaliações das perturbações, ao longo do tempo, onde se aponta uma grande carência de estudos. O envolvimento de observações repetidas das variáveis, traz uma robustez no estudo da evolução de uma cadeia de suprimentos, tornando a observação das mudanças detectadas mais precisas.

A observação repetida dos eventos e dos efeitos disruptivos têm mais poder do que os estudos transversais, em virtude de poder verificar as diferenças e observar a ordem temporal dos eventos, levando em consideração o desenvolvimento ou mudanças nas suas características, estabelecendo novas ou melhor compreensão das relações de causa e efeito, que por sua vez, introduz as bases para estudos de intervenções prescritivas.

Neste enfoque, congregando as novas abordagens analíticas com a sentida necessidade de estudos empíricos longitudinais, que avaliem o conceito de resiliência e rastreie o conjunto de perturbações na cadeia de suprimentos à medida que elas se desdobram ao longo do tempo e, além disto, a existência de uma escassez de análises e observâncias de seus efeitos nos elos os quais a conformam, com entidades que não operam isoladamente; adicionando-se, ainda, a insuficiência de análises que validem a relação da resiliência com sua estrutura de recursos, tem-se um interessante caso a ser estudado.

A obtenção de uma cadeia de suprimentos resiliente não é proporcionada por um evento único, ele deve ser sustentável, e os processos envolvidos, como a adaptação e a evolução não podem ser claramente compreendidos em um único momento - eles precisam ser examinados ao longo do tempo e em períodos específicos. Eles, também, são particularmente difíceis de entender ao estudar uma única entidade ou um fator na cadeia de suprimentos - eles precisam ser examinados em um mesmo contexto histórico devido aos seus efeitos, às vezes, complementares e, às vezes, contraditórios. Da mesma forma,

algumas vulnerabilidades não são eventos discretos, mas possibilidades contínuas de efeitos negativos sobre a cadeia de suprimentos.

Diante das questões levantadas se utilizará da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil. A escolha deste setor reconhece que a história da cana-de-açúcar é secular e, em diversos momentos, confunde-se com a própria história do país. Além do mais, embora a cana-de-açúcar seja uma das principais culturas do mundo, cerca de 80% da produção do planeta está concentrada em dez países, sendo o Brasil e a Índia, em conjunto, os responsáveis por pouco mais da metade da cana produzida mundialmente. Seus produtos como o açúcar, o etanol e a energia têm grande importância econômica. Sendo o Brasil, o maior produtor mundial de açúcar, com fluxo internacional expressivo; o etanol e a energia possuem grande relevância na economia nacional, além de apelo ambiental.

Dentro do mesmo contexto, os impactos ambientais podem ser importante motivação para acelerar alternativas de soluções renováveis de geração de energia (PARRA, 1992; COOK, 2013). Em especial, o etanol de cana-de-açúcar, dentre as fontes de energia que vêm sendo discutidas e pesquisadas, se constitui como uma excelente alternativa para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, bem como, mitigar os efeitos desta dependência (DEMIRBAS, 2009; IEA 2011).

Além do problema central de pesquisa a ser estudado, haverá oportunidade de destacar sobre os seguintes conjuntos de circunstâncias de que envolvem esta tese:

- a) um estudo de caso de uma cadeia de suprimentos pertencente a um país diferente aos da União Europeia e os Estados Unidos;
- b) a medição da resiliência através do Triângulo da Resiliência proposto por Bruneau *et al.* (2003) e ampliado por Zobel (2010) e Tukamuhabwa *et al.* (2015);
- c) a chance de realizar um estudo longitudinal, que permite a observação de como uma cadeia de suprimentos responde, se adapta ou se recupera ao longo do tempo, observando empiricamente os conceitos da resiliência.

Portanto, o problema que a presente pesquisa abordará é: **“como evidenciar que a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é resiliente às perturbações que a acometem?”**.

1.2 Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir para o entendimento de como reconhecer ou identificar uma cadeia de suprimentos resiliente. Oportunamente, será utilizado a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar para tal. Adicionalmente têm-se os seguintes objetivos específicos:

1. Construir um modelo de simulação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, para os elos agrícola e industrial;
2. Criar curva de experiência dividindo-a por tendências e partilhando as reduções de custos específicos, dentro dos elos agrícola e industrial e identificar as Razões de Progressão – PR;
3. Avaliar empiricamente o conceito de resiliência na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, por meio do Triângulo da Resiliência, proposto por Bruneau *et al.* (2003) e ampliado por Zobel (2010) e Tukamuhabwa *et al.* (2015), com algumas adaptações;
4. Analisar a relação da resiliência com os Fatores de Capacidade e Fatores de Vulnerabilidade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar do Brasil;
5. Identificar e relacionar os fatores de resiliência afetados pelas alterações de custos e margens e examinar suas naturezas tipológicas.
6. Identificar os eventos deflagradores mais significativos, as estratégias adotadas e os resultados das estratégias;

1.3 Contribuições da Pesquisa

Busca-se compreender como as organizações se ajustam, se adaptam ou se reinventam aos seus modelos de negócios, em um meio ambiente mutável, e não só em resposta às causas externas.

Este estudo longitudinal implica que podemos contribuir para o entendimento de como uma cadeia de suprimentos resiliente evoluiu ao longo do tempo e, em particular, como a resiliência de uma cadeia de suprimentos pode aumentar ou diminuir sob diferentes pressões de adaptação, como a redução de custos. Uma cadeia de suprimentos resiliente

é um fenômeno adaptativo que envolve mudança e uma resposta correspondente a essa mudança. É, portanto, apenas através de estudos longitudinais, em oposição a transversais, que se podem observar a mudança e a resposta correspondente na prática (STEVENSON; SPRING, 2007).

Espera-se contribuir, trazendo uma melhor compreensão de como a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar se desenvolveu em seus movimentos de altas e baixas, de turbulências, de reveses, de momentos bons e ruins, de crises e bonanças. Se trabalhou com um olhar sobre as organizações, estruturas e estratégias, além das conjunturas macroambientais, permitindo um olhar holístico e avaliações do comportamento passado da cadeia – que até o momento da pesquisa não se sabia se era promissora ou não.

A tradução de conceitos de resiliência para a estrutura da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, poderá ser utilizada como uma ferramenta gerencial útil para melhorar seu desempenho. Esta tese poderá, também, auxiliar ao tomador de decisão no seu planejamento estratégico em cadeias de suprimentos cada vez mais complexas.

A resiliência foi o conceito escolhido para isso, pois ela exprime bem a ideia de sobrevivência e aprendizado. Porém, a maioria dos trabalhos são principalmente, qualitativos e conceituais, e os pouquíssimos quantitativos de base empírica focam somente em grandes desastres. Visto esta brecha, para se tornar mais assertivo e trazer para um campo mais exato, propomos que o intuito desta pesquisa seria contribuir para o entendimento de como reconhecer ou identificar uma cadeia de suprimentos resiliente, através da medição da resiliência, para sua avaliação quantitativa de seu desempenho. Esta é uma das grandes contribuições deste trabalho.

Esta foi uma análise quantitativa diferenciada, que, até agora, matematicamente, foi somente aplicada a grandes disrupções, como terremotos e outros, se constituindo em uma avaliação com potencial de desenvolvimento. Isso ocorre, porque setores onde as turbulências são rotineiras, técnicas tradicionais como a curva de experiência tem dificuldade de retratá-las.

Além disto, existe o negligenciamento da medição de outras dimensões, que costumeiramente não são medidas, mas que nesta tese, conseguimos medir. Embora os trabalhos relacionados a medição de resiliência tenham um método dentro da qual possa-se medi-la e a rapidez de sua recuperação, suas dimensões sociais, organizacionais e

econômicas são elementos pouco mensuráveis, mas que dão sustentação maior a avaliações mais complexas, que, por esta natureza, necessitam-se de mais amparo nas elucidações.

Um trabalho nem sempre segue seu desenvolvimento de maneira linear. O caminho desta pesquisa se iniciou através dos custos, pela curva de experiência, mas questões macroambientais, como os preços oferecidos pelo mercado se mostraram importantes fontes de resiliência no setor. Isso levou a um esforço de aprofundamento das questões relativas a resiliência da cadeia estudada. E, foi então, que surgiu uma outra contribuição a esta temática: a observação de complementaridade da curva de experiência sobre a resiliência. Sua conexão se dá entre a medição da evolução de inovações e otimizações incrementais, como também, inovações radicais, turbulências e oscilações presentes no mercado, em prazos mais curtos.

O estudo, também, se distingue pelo ineditismo na utilização do Triângulo da Resiliência para avaliação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e a respectiva tradução de conceitos de resiliência para esta estrutura. Houve a necessidade de realizar adaptações de formulação para eventos perturbadores identificados de longo efeito. Esta adaptação também se dá, devido a muitas perturbações graves que não são dimensionadas em outros estudos, por já utilizarem recursos e capacidades para construção da resiliência, assim, esta adaptação, no contexto da cana-de-açúcar, conseguiu captar perturbações de eventos e efeitos menos acentuados, bem como, dimensionar perturbações graves em estruturas já resilientes.

Outra contribuição que se apresentou, fruto da concepção e do desenvolvimento do trabalho, foi a construção de um modelo capaz de gerar respostas em margens econômicas, dadas certas tecnologias e condições de mercado, dentro de uma usina produtora de etanol, açúcar e energia. Este modelo se concentrou nas diferenças existentes entre os tipos de usinas, as quais têm diversas opções de modelos de negócios, com características técnicas próprias como o uso de cogeração e a venda de bioenergia. O funcionamento decorrente da construção deste alicerce, teve-se a oportunidade de se aprofundar de forma significativa para o entendimento da natureza de variações de custos e margens.

Esta contribuição perpassou o desenvolvimento metodológico da tese. Houve um grande esforço para construir uma representação que fosse capaz de reproduzir o sistema da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, em um nível adequado. Seus resultados em custos e margens poderão ser aplicados, onde forem necessários, extrapolando os limites desta tese.

1.4 Estruturação e Delineamento da Pesquisa

A estrutura proposta nesta tese, teve como foco, explicar e realizar uma medição diferenciada da resiliência, bem como, a realização de uma avaliação da evolução de custos através da curva de experiência para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Para dar respostas a estes questionamentos, se utilizou um modelo de simulação construído para os anos entre 1998 a 2014. As margens econômicas obtidas no modelo servirão para a avaliação da resiliência. Os custos, também obtidos, via modelo, poderão complementar a análise de elemento importante para formação das margens.

A metodologia para o levantamento da cronologia, os eventos deflagradores e estratégias, seguiu o estudo de caso. A observação de como uma cadeia de suprimentos responde, se adapta ou se recupera ao longo do tempo, permitiu levantar quais os eventos deflagradores foram mais importantes dentro da cronologia estudada, assim como, o levantamento das estratégias adotadas pelo setor, e os respectivos resultados destas estratégias. Além disto, estes levantamentos permitirão um aprofundamento qualitativo, e a comprovação da relação de causa e efeito, entre a medição e o fenômeno observado.

Finalmente, foi feito um levantamento de todos os fatores identificados que podem afetar a resiliência na cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar. Estes fatores atendem a duas ideias: a observação de efeitos contínuos menos evidentes e indicadores injuntivos que incitam a realização de um planejamento e controle estratégico.

1.4.1 Descrição dos capítulos

O presente documento, que retratou a tese de doutorado propriamente dita, está dividido em cinco capítulos. Nesta introdução – capítulo 1 – apresentou-se o problema, a justificativa, os objetivos, a contribuição, e a estruturação e delineamento da pesquisa.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão da literatura que suporta esta investigação, abordando desde os artigos seminais de Staw *et al.* (1981) e de Meyer (1982) que dão origem ao conceito da resiliência na literatura de negócios até as publicações mais recentes, mostrando o estado da arte e a relevância acadêmica. Elucidou-se os conceitos relacionados à resiliência, ao modelo de simulação e à curva de experiência. Além disto, apresentou-se a contextualização da cana-de-açúcar no Brasil por meio de uma sucinta descrição e evolução histórica, bem como a realização de uma caracterização mais detalhada da cadeia de suprimentos e o seu macrop processo produtivo, incluindo os elos agrícola e industrial. Finalmente, neste capítulo, apresentaram-se os problemas mais relevantes destes elos, os quais a presente pesquisa está focada.

No capítulo 3, abordou-se a metodologia empregada na pesquisa, onde contemplou-se a construção do modelo e a simulação da cadeia da cana-de-açúcar. Descreveu-se a fazenda e a usina padrão, e as opções de modelos de negócios simulados na tese. Apresentou-se o ferramental e as adaptações necessárias para a obtenção da curva de desempenho da resiliência. Descreveram-se os conceitos metodológicos de custos utilizados, a análise de sensibilidade e validação obtida, bem como, algumas características particulares do estudo de caso adotado. Ainda, levantaram-se as limitações metodológicas da curva de experiência, da resiliência e do trabalho realizado como um todo.

Ressaltamos no capítulo 4, os resultados obtidos, os quais foram discutidos de maneira pertinente. Entre eles, estão os resultados para curva de experiência e para a resiliência. A resiliência foi dividida em duas partes: a primeira, com maior relevância qualitativa e a segunda, com maior relevância quantitativa. Além disso, foram abordados os eventos deflagra dores, estratégias e seus resultados, finalizando com os fatores identificados que podem afetar a resiliência da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Finalizou-se no capítulo 5, onde apresentaram-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros. O trabalho realizado ainda incluiu um conjunto de apêndices. Veja a Figura 02 que sintetizou a estrutura desta tese:

Figura 02 - Estrutura de Capítulos

Fonte: o autor

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura e o referencial teórico deste trabalho buscaram apresentar uma visão dos assuntos tratado nesta pesquisa, dividindo-se em quatro partes. Esta etapa tem a intenção de recuperar trabalhos anteriormente desenvolvidos, os quais podem contextualizar e conceitualizar a resiliência, os modelos de simulação, a curva de experiência, bem como apresentar os elos agrícola e industrial da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e seus desafios, onde também se buscou proporcionar uma perspectiva de pesquisas e contribuições anteriores, comprovando a relevância acadêmica deste trabalho realizado, como também, trazendo conceitos fundamentais para o entendimento dos resultados desta tese.

2.1 Resiliência

Qualquer perturbação apresenta um perfil típico em termos de efeito no desempenho da organização, indistintamente da métrica utilizada para sua medição. A natureza da perturbação e a dinâmica seguida pela organização como resposta a esta perturbação podem ser caracterizadas em oito etapas, apresentadas na Figura 03: (1) preparação, (2) evento disruptivo ou perturbação, (3) primeira resposta, (4) impacto inicial, (5) impacto total, (6) preparação para a recuperação, (7) recuperação e (8) impacto no longo prazo (SHEFFI; RICE, 2005).

Figura 03 - Perfil da Perturbação

Fonte: Sheffi; Rice (2005)

Ao ocorrer o primeiro embate ou impacto, a reação, em alguns casos, é imediata, e em outros, pode levar tempo para afetar a organização, dependendo da magnitude da perturbação, da redundância disponível e da resiliência inerente à organização e à cadeia de suprimentos a que pertencem. A preparação para a recuperação costuma começar com a primeira reação da empresa, ou na melhor das hipóteses, antes da perturbação, se a empresa teve etapa de preparação. Na preparação para a recuperação, a empresa avalia e faz a seleção de outros fornecedores, redireciona os suprimentos para outras plantas, encontra modos de transporte alternativos, determina quais são as partes disponíveis e oferece produtos manufaturados a partir dessas partes, etc. Para retornar aos níveis normais de operação, muitas empresas compensam a produção perdida produzindo maior quantidade do que na produção normal, usando horas extras, bem como os recursos dos fornecedores e dos clientes. Finalmente, mesmo que leve tempo, de maneira geral a empresa consegue se recuperar da perturbação; no entanto, as relações ficam desgastadas com os clientes e é provável que muitos deles não retornem (SHEFFI; RICE, 2005), em outra situação o impacto pode ser suficiente para que a empresa não consiga recuperar da perturbação.

A origem do conceito da resiliência na literatura de gestão de negócios pode ser rastreada até dois artigos seminais de Staw *et al.* (1981) e de Meyer (1982). O primeiro artigo introduziu a teoria de como as situações percebidas com enquadramento negativo levam à evasão de riscos e a resultados desadaptados sob a forma de “efeitos de rigidez da ameaça”, devido a uma tendência geral dos indivíduos, grupos e organizações de enfatizar respostas bem aprendidas ou dominantes, quando enfrentam adversidades, em vez da aprendizagem flexível e adaptável (STAW; SANDELANDS; DUTTON, 1981). O segundo artigo expandiu a linha de pesquisa através de um estudo empírico sobre as respostas de uma greve inesperada de médicos em um hospital; no qual contradiz o fato de que uma ameaça externa leva automaticamente a organização ao risco, proposta por Staw *et al.* em 1981. Os resultados de Meyer (1982) sugeriram que as empresas podem se adaptar respondendo de duas maneiras diferentes: elas podem absorver o impacto inicial das perturbações por meio de uma reação, rotulada como resiliência; ou podem adotar novas práticas ou configurações por meio de mudanças e de aprendizagem, rotulada como retenção (MEYER, 1982).

A partir dos anos 80, aconteceu uma série de acidentes e desastres como o de *Chernobyl*, *Exxon Valdez*, *Bhopal* e com o ônibus espacial *Challenger*, que despertou o interesse dos pesquisadores em analisar suas causas e consequências; e assim, mudando o foco das pesquisas em resiliência, de eventos externos e seu impacto nas organizações, à confiabilidade organizacional. Em particular, à confiabilidade de processos complexos ao interior da organização e à necessidade de evitar pequenas falhas, desvios e outras avarias que podem escalar em eventos de enormes consequências. Os estudos de casos foram a principal metodologia empregada pelos pesquisadores no intuito de retratar esses processos.

Depois do ataque terrorista aos Estados Unidos, ocorrido no dia 11 de setembro de 2001, o governo daquele país decidiu fechar suas fronteiras e encerrar todos os voos que entravam e saíam do país. O impacto nas cadeias de suprimentos foi imediato, sobretudo naquelas que tinham aderido à filosofia *Just-in-Time*. Apesar de que os administradores já tinham bastante experiência nos distintos níveis de riscos, era a primeira vez que sua fonte de incerteza não provinha da demanda por produtos devida às expectativas dos clientes, à concorrência de nível global, à complexidade das cadeias de suprimentos, à grande variedade de produtos com ciclo de vida curto e às interdependências das anteriores. Somam-se a isso, às perturbações corriqueiras com o que os administradores costumavam lidar, próprias dos insumos empregados, tais como: a variabilidade, a capacidade, as restrições, os problemas relativos à qualidade e à manufatura. Como se esse acúmulo de incertezas não fosse suficiente, agora eles tinham que lidar com o persistente mal-estar resultante da guerra contra o terrorismo e a probabilidade de novos ataques e atentados, fato que levou ao surgimento de três linhas de pesquisa em torno da resiliência (LINNENLUECKE, 2017).

A primeira linha nasceu a partir de um estudo de caso no qual foi abordada a evacuação da maioria dos 2700 funcionários alocados em 22 andares pela *Morgan Stanley*, durante o atentado do 11 de setembro de 2001. O sucesso da tarefa ocorreu devido à implementação de um programa de preparação para desastres, como resposta ao ataque ao *World Trade Center*, em 1993 (COUTU, 2002), conseguindo-se demonstrar a resiliência através dos pontos fortes dos funcionários. Essa linha de pesquisa em resiliência tem suas origens teóricas na psicologia clínica e seu foco nas crenças dos indivíduos sob suas próprias habilidades e realizações de desempenho associadas. Este

fluxo de pesquisa sugeriu que a resiliência é uma capacidade aprendível que pode ser medida e desenvolvida dentre os funcionários para prepará-los para o sucesso ou o fracasso, independentemente de sua capacidade real de lidar com eventos desconhecidos. Assim, a resiliência foi conceituada como um fator de capital psicológico e considerada passível de intervenção gerencial.

O segundo fluxo de pesquisas concentrou-se em projetos de cadeias de suprimentos resilientes, dado que os atentados revelaram a vulnerabilidade intrínseca das redes de suprimento, altamente interdependentes. Alguns autores ressaltam o fato de que a resiliência, muitas vezes, não é determinada apenas por recursos e capacidades organizacionais, mas pelas inter-relações e interações que as organizações têm com outros atores ao longo da cadeia de suprimentos, pois as entidades não operam isoladamente (CRAIGHEAD *et al.*, 2007; ROMMERS *et al.*, 2001; URCIUOLI *et al.*, 2014).

Nos trabalhos conceituais que constituem à maioria das contribuições influentes, o foco principal baseia-se em derivar percepções teóricas sobre os princípios de *design* que podem promover a resiliência dentro das cadeias de suprimentos, sendo as mais comumente sugeridas a flexibilidade e a redundância (JÜTTNER; MAKLAN, 2011; LONGO; ÖREN, 2008; PONIS; KORONIS, 2012). A flexibilidade, que em alguns estudos é chamada de mobilidade ou agilidade, pode ser definida como a capacidade de uma empresa para se adaptar às mudanças de requisitos do seu ambiente e partes interessadas com o mínimo de tempo e esforço (EROL; SAUSER; MANSOURI, 2010). Enquanto a redundância é a disponibilidade de escolhas alternativas como no caso dos projetos modulares, da diversificação entre fornecedores, dos transportes multimodais. Destes dois princípios, a maioria dos autores preferem a flexibilidade porque tem uma influência significativamente maior, pois permite detectar ameaças e reagir com maior rapidez, reforçando a resiliência da organização e criando uma vantagem competitiva no mercado (CHRISTOPHER; PECK, 2004; KLEINDORFER; SAAD, 2009; KLIBI; MARTEL; GUITOUNI, 2009; PETTIT; FIKSEL; CROXTON, 2010; RICE; CANIATO, 2003; SHEFFI, 2005) além de que a criação de redundância pode ser um meio caro de construir resiliência (TUKAMUHABWA *et al.*, 2015).

A terceira linha, centrou-se em entender como as empresas se ajustam, adaptam e reinventam seus modelos comerciais em um ambiente em constante mudança e não só em resposta às causas externas. Os pesquisadores dessa linha enxergaram a resiliência

como a capacidade de reinventar dinamicamente os modelos de negócios e as estratégias, na mesma frequência com que as circunstâncias mudam, para antecipar e se adaptar continuamente às mudanças que ameaçam à sua capacidade de ganhar dinheiro ou seu núcleo de poder, ou seja, mudar antes das necessidades se tornarem desesperadamente óbvias. Acredita-se que é melhor reinventar o modelo de negócio antes de forçar às circunstâncias. Nesse sentido, alguns autores retomaram a ideia da adaptabilidade como um caminho para superar a adversidade e redefiniram a resiliência como o “ajuste positivo em condições desafiadoras”, incluindo assim os ajustes para ambas as suas ascendências: aquelas devidas a pequenas interrupções e às devidas a perturbações graves por eventos exógenos (SUTCLIFFE; VOGUS, 2003). Outros autores sugeriram a inovação como condição propícia, uma vez que permite às organizações, de forma constante e contínua, antecipar e ajustar-se a uma ampla gama de turbulências (HAMEL; VÄLIKANGAS, 2003).

Ainda nesta linha, os autores renovaram seus interesses nos processos organizacionais que podem levar a uma resposta bem ou mal sucedida à mudanças externas adversas (MEYER, 1982; STAW; SANDELANDS; DUTTON, 1981) e investigaram as condições de habilitação que permitem às empresas serem resilientes. Publicações amplamente citadas nesta linha de pesquisa incluem Gittell *et al.*, (2006), Hamel e Valikangas (2003) e Sutcliffe e Vogus (2003), resumidos no Quadro 03:

Quadro 03 – Resiliência em Modelos de Negócios

Artigo	Sutcliffe and Vogus (2003)	Hamel e Valikangas (2003)	Gittell <i>et al.</i> (2006)
Foco de investigação	Como as organizações podem continuamente atingir os resultados desejáveis em meio à adversidade, pressão e barreiras significativas à adaptação ou desenvolvimento?	Como as organizações podem desenvolver resiliência estratégica?	Investigação do por que algumas companhias aéreas se reergueram de maneira bem-sucedida após o 11 de setembro e demonstraram notável resiliência em comparação com outras.
Conceitual ou Empírico	Conceitual	Conceitual	Estudo de caso empírico com base em dados publicamente disponíveis.
Definição de resiliência	A manutenção do ajuste positivo sob condições adversas (p. 95).	A capacidade de uma organização para reinvestir dinamicamente seus modelos de negócios e estratégias à medida que as circunstâncias mudam. Isto inclui continuamente antecipar e adaptar às mudanças que ameaçam o núcleo da organização e mudar antes que a necessidade da mudança se torne desesperadamente óbvio	Com referência à Sutcliffe e Vogus (2003), Weick <i>et al.</i> (1999) e Wildaysky (1988), a resiliência é definida como “(a) a manutenção de um ajuste positivo em condições difíceis [...], (b) a capacidade de se recuperar de eventos adversos [...], e (c) a capacidade para manter as funções e os resultados desejáveis no meio calamitoso [...]”. A resiliência é também definida como 'uma capacidade dinâmica de adaptabilidade organizacional que cresce e se desenvolve ao longo do tempo' (p. 303).
Desenvolvimento da teoria	O capítulo resume resultados passados sobre o indivíduo, grupo e resiliência organizacional. Se argumenta que a resiliência deve ser vista como a adaptabilidade para contrariar os processos não-adaptativos, tais como os descritos por Staw <i>et al.</i> (1981). Os autores argumentam que o ajustamento positivo em condições difíceis é mais provável de ocorrer se as condições que permitem estão presentes (processamento de informação mais ampla, afrouxamento do controle, a utilização de folga).	Os autores argumentam que qualquer organização que se esforça para a resiliência estratégica precisa dominar quatro desafios: (1) vencer a negação (ou seja, para enfrentar a realidade de um mundo em mudança), (2) variedade de valores (ex., na forma de experimentação), (3) liberar recursos (por exemplo, em termos de capital inicial para atividades promissoras), (4) abraçar o paradoxo (ex., exploração de novas opções estratégicas).	Os autores concluem que ocorreram diferenças significativas nas estratégias implementadas pelas grandes companhias aéreas após os atentados do 11 de setembro. As demissões inibiram a recuperação após os atentados. Os autores argumentam que as reservas financeiras e modelos de negócios viáveis desempenharam um papel significativo em minimizar demissões e manter relacionamentos que permitem às organizações para retornar mais rapidamente ao pleno desempenho.

Fonte: Linnenluecke (2017)

A exceção de dois trabalhos empíricos, a maioria das publicações são contribuições conceituais, evidenciando-se uma carência de estudos empíricos (SCAVARDA *et al.*, 2015).

No primeiro trabalho empírico desenvolvido por Craighead *et al.* (2007), os autores argumentam que as cadeias de suprimentos são inerentemente arriscadas e, em algum momento, experimentaram eventos inesperados. Eles propõem que as rupturas da cadeia de suprimentos são mais severas se ocorrerem em cadeias mais densas e complexas e se afetarem os nós mais cruciais, como por exemplo, fornecedores únicos e críticos. Estas conclusões são particularmente importantes, principalmente se a cadeia de suprimentos não tiver capacidade de detectar e disseminar informações pertinentes e responder de forma rápida e eficaz.

No caso do segundo trabalho empírico, os autores apresentaram casos de resiliência da cadeia de suprimentos na crise financeira global e concluíram que existem as seguintes quatro habilidades de resiliência: flexibilidade, velocidade de reação, acesso à informações oportunas e colaboração entre os membros da cadeia de suprimentos, que podem evitar ou limitar os impactos de eventos adversos sobre a receita, o custo e o tempo de espera (JÜTTNER; MAKLAN, 2011).

Devido à escassez de estudos empíricos, alguns estudos desenvolveram modelos para pesquisas futuras que permitiram testar empiricamente quais capacidades levam a melhores respostas e às cadeias de suprimento mais resilientes; assim como, fornecerem oportunidades para que os pesquisadores possam analisar a resiliência em um contexto de multiníveis (PETTIT; FIKSEL; CROXTON, 2010; PONOMAROV; HOLCOMB, 2009; POWLEY, 2009).

Nota-se que o estudo sobre resiliência, quando trata-se da parte metodológica pode ser estudado também sobre o ângulo das três linhas de pesquisas apontadas por Linnenluecke (2017) que considera a resiliência como: fortalezas dos funcionários, princípios de *design* que reduzem as vulnerabilidades e as interrupções da cadeia de suprimentos e adaptabilidade de modelos de negócios. Hoje, tem se buscado desenhar uma estrutura baseada em grande parte de fundamentos conceituais novos para construir e avançar no fluxo destas linhas que se desenvolveram em relativo isolamento, apesar de existirem

conexões entre elas. Reforçamos que neste trabalho foram feitas adaptações para explorar de maneira mais eficaz a resiliência de modelos de negócios.

2.1.1 Definição de Vulnerabilidade e Capacidade

A vulnerabilidade de uma cadeia de suprimentos pode ser definida como a incapacidade que ela tem, em um determinado momento, de reagir às perturbações e consequentemente de atingir seus objetivos (AZEVEDO *et al.*, 2008). Os Fatores de Vulnerabilidade podem ser entendidos como fatores fundamentais que fazem a cadeia em estudo ficar suscetíveis ao aumento da Resistência na curva de desempenho. São efeitos perturbadores que causam um efeito negativo sobre a cadeia de suprimentos.

Os Fatores de Capacidade visam garantir a preparação; resposta ao evento; recuperação; e o avanço para um estado de pós-intervenção, maximizados de forma oportuna e de preferência a um custo mínimo. Além disso, a habilidade de se adaptar, se sustenta dentro destes quatro aspectos. A adaptação significa que uma cadeia de suprimentos tem habilidade latente para desenvolver diferentes respostas para combinar a natureza das ameaças que enfrenta. Isso implica que os elementos da cadeia de suprimentos podem mudar para fornecer uma resposta apropriada a um E.P.I.L.E. de desempenho (Efeito Perturbador Identificado de Longo Efeito), em vez de selecionar a partir de um conjunto de respostas pré-existent, isto é, se manter em zona de conforto sem se adaptar a novas conjunturas. Causam um efeito positivo sobre a resiliência.

2.1.2 Habilidades de resiliência: flexibilidade e redundância

Para que a flexibilidade seja melhor entendida é importante compreender a influência que ela tem sobre a cadeia de suprimentos e seu impacto na resiliência. Em uma cadeia de suprimentos tem-se fluxos de materiais que fluem do fornecedor para o processo produtivo e do processo produtivo para os canais de distribuição, sendo todos eles controlados por vários sistemas e que estão inseridos no contexto da cultura corporativa. Cada um desses elementos, os fluxos, o sistema e a cultura apresentam uma oportunidade para introduzir flexibilidade na organização e ao fazê-lo cria-se resiliência (SHEFFI; RICE, 2005). Por exemplo, no fluxo de materiais do fornecedor para o processo produtivo

o fato de depender de um único provedor para insumos críticos pode ser perigoso, levando às organizações a mudar suas práticas de aquisição para assegurar ao menos dois ou mais fornecedores para cada insumo crítico. No entanto, outras organizações preferem aprofundar suas relações com um único fornecedor para cada parte crítica. Ambas as abordagens são corretas, pois o problema não é o número de fornecedores, senão o correto alinhamento da relação empresa-fornecedor com a estratégia de compras da empresa.

No caso do processo produtivo, a flexibilidade é avaliada como a habilidade de fazer frente a uma perturbação ocorrida em uma das usinas da empresa, sendo conveniente para afrontar esta perturbação com agilidade, que a organização possua várias localizações com interoperabilidade e que seus processos sejam padronizados. Enquanto ter linhas de produção redundantes é caro, ter múltiplas capacidades em cada uma das instalações adiciona flexibilidade para a cadeia de suprimentos, sem que isso signifique que todos os produtos tenham que ser produzidos em todas as plantas para incrementar substancialmente a flexibilidade (JORDAN; GRAVES, 1995).

A flexibilidade relativa aos sistemas de controle gerenciais tem a ver, principalmente, com suas duas funções essenciais, que são: detectar rapidamente uma perturbação e promover ações corretivas que permitam eliminar a causa raiz que a gerou. Na ausência de flexibilidade, a informação costuma se acumular até que coalesce e chega ao ponto em que a ação se torna imprescindível, ocasionando uma difícil identificação exata de quando a organização percebeu que uma perturbação de fato ocorreu. Além disto, existem múltiplas ocorrências que mais de uma perturbação acontece em momentos muito similares e próximos, tornando impraticável a identificação em um nível grande de especificidade.

Sobre a contribuição da cultura para a flexibilidade de uma organização é importante que não seja subestimada, devido que, as perturbações em seus estágios iniciais podem parecer suficientemente inocentes, para que os responsáveis emitam alertas. No entanto, conhecer a magnitude de uma grande perturbação assim que ela acontece, pode exigir uma mentalidade que questione continuamente a sabedoria prevalecente e uma cultura organizacional que ouça as informações, as entenda, proponha soluções e as ponha em prática. Na literatura há abundantes exemplos de empresas que falharam por que não puderam compreender e responder o suficientemente rápido às implicações das mudanças ocorridas em torno delas (SHEFFI; RICE, 2005).

Por outro lado, a redundância pode também ser considerada uma via para atingir a flexibilidade, quando envolve o aumento de capacidade para continuar as operações durante uma falha (RICE; CANIATO, 2003). De fato, alguns autores descobriram que a redundância aumenta a flexibilidade (JOHNSON; ELLIOTT; DRAKE, 2013). No entanto, as flexibilidades que não necessariamente dependem de redundância têm sido preferidas por vários autores, porque economizam recursos de vários tipos, como financeiros, insumos, dentre outros (CHRISTOPHER; HOLWEG, 2011; THUN; DRÜKE; HOENIG, 2011). De acordo com a literatura, há diferentes visões sobre a relação exata entre as quatro habilidades da resiliência (flexibilidade, velocidade de reação, acesso às informações oportunas e colaboração entre os membros da cadeia de suprimentos), o fato de estarem inter-relacionados pode significar que existem sinergias e *trade-offs* entre elas (JOHNSON; ELLIOTT; DRAKE, 2013; JÜTTNER; MAKLAN, 2011; PONIS; KORONIS, 2012; TANG; TOMLIN, 2008; ZSIDISIN; WAGNER, 2010). Logo, o reforço de cada habilidade de forma isolada pode ser contraproducente, porque aumenta a possibilidade de uma migração de risco (ALCOCK; BUSBY, 2006; GRABOWSKI; ROBERTS, 1997).

2.1.3 Estratégias Reativas e Proativas na Resiliência

Para além das quatro habilidades da resiliência, Ansoff (2007), no campo da estratégia, retratou a escalada da turbulência do ambiente, explanando que as empresas, cada vez mais, enfrentam uma conjuntura em que o tempo disponível para as reações reduziu-se e o tempo necessário para uma resposta eficaz prolongou-se. Neste contexto, pode-se dizer que a administração estratégica tem como foco a maneira de lidar com as mudanças, de forma sistemática, o que abrange o planejamento e organização das potencialidades apresentadas, buscando resultados rápidos frente às questões estratégicas. Portanto, a agressividade estratégica de uma organização deve estar pautada na sua capacidade de adaptação às mudanças, seja de maneira reativa, proativa, inovadora ou criativa. O sucesso estratégico é atingido pela otimização do potencial de desempenho, tendo como um dos seus pontos principais a exigência de que a agressividade do comportamento da organização se equivalha ou corresponda à turbulência do ambiente.

Na literatura apresenta-se vinte e quatro diferentes estratégias para desenvolver a resiliência às ameaças ou às perturbações da cadeia de suprimentos, que podem ser

organizadas em duas categorias: estratégias proativas e estratégias reativas (ver Figura 04), embora algumas estratégias possam ser consideradas proativas ou reativas dependendo de quando e do porquê elas são aplicadas. Não obstante, as estratégias proativas não são as preferidas dos administradores, uma vez que torna-se difícil justificar investimentos que mitiguem possíveis perturbações que podem não ocorrer em última instância (TUKAMUHABWA *et al.*, 2015).

Figura 04 - Estratégias para desenvolver Resiliência às Perturbações da Cadeia de Suprimentos

Fonte: o autor a partir de Tukamuhabwa *et al.* (2015)

As estratégias de flexibilidade, criação de redundância, colaboração e agilidade são estratégias as quais receberam a maior parte da atenção na literatura *de Supply Chain Resilience* (Cadeia de Suprimentos Resiliente ou SCRES). Além dessas quatro estratégias, a literatura sobre os meios de desenvolver a resiliência às ameaças ou interrupções da cadeia de suprimentos é ampla, existem muitos estudos os quais avaliam disrupções intercorrentes, mas, ao mesmo tempo, limitadas em sua superfície de análise. Normalmente apresentam-se às situações muito específicas e direcionadas, limitando seus resultados e conclusões para outras ocorrências, dentro de outras cadeias ou até mesmo, na própria cadeia.

Além disso, embora a literatura tenha identificado muitas estratégias para criar SCRES, poucos estudos ultrapassaram disto. Conquanto uma empresa tenha recursos limitados

para implantação de suas estratégias, a identificação dos fatores como instabilidades sociopolíticas e as práticas competitivas, ou ainda, em que situações essas determinadas estratégias foram adotadas, podem ser levadas em consideração ao decidir como melhorar a resiliência da cadeia e foram pouco exploradas pela literatura.

Entende-se que a pesquisa de cadeias de suprimentos resilientes não deve ser apenas sobre a identificação de estratégias, mas também sua quantificação através de métodos que ajudem na abordagem, tanto do reconhecimento do problema quanto na sua solução.

2.1.4 Ampliação e Adaptação do Triângulo da Resiliência

O triângulo de resiliência (BRUNEAU *et al.*, 2003; CIMELLARO, REINHORN E BRUNEAU 2010; ZOBEL 2010), considera fatores como o nível de desempenho, estimativa de perda e tempo de recuperação, sendo considerado a forma mais reconhecida de avaliar a resiliência de um sistema. No entanto, para a metodologia desenvolvida para este trabalho é necessária uma base mais conveniente e apropriada para comparação. Tukamuhabwa *et al.* (2015) apresentam uma versão conceitual adaptada para ilustrar os quatro aspectos principais da definição de Cadeia de Suprimentos Resiliente (SCRES) elucidadas a seguir:

- 1) preparação para um evento disruptivo;
- 2) resposta para um evento;
- 3) recuperação do evento;
- 4) crescimento/vantagem competitiva (preferencialmente) após o evento.

A resiliência aqui é descrita é ligada ao conceito pelo qual um processo de uma cadeia de suprimentos experimenta uma série de eventos disruptivos e responde na forma de uma série de adaptações, como pode-se notar na Figura 05.

O Período A na figura refere-se a uma primeira interrupção, onde uma grande perda de performance é incorrida, enquanto o Período B se refere a uma segunda interrupção em que uma perda menor é incidida, talvez devido às experiências e capacidades de aprendizado construídas com a primeira interrupção. No entanto, esta segunda interrupção nem sempre incorre em menores perdas, pois outros fatores além da

experiência ou aprendizado podem ocorrer. Uma medida estática de resiliência seria proporcionada calculando a área da forma sombreada acima da curva de desempenho destacada no Período A, o que possibilita avaliar a perda de desempenho após uma interrupção e o tempo necessário para se recuperar. A área considerada também pode ser estendida para avaliar o crescimento subsequente, embora seja necessário estabelecer um ponto de corte. Mas uma segunda medida mais dinâmica seria possivelmente proporcionada comparando os dois ‘triângulos’ no Período A e Período B para avaliar se a cadeia de suprimentos está se tornando mais resiliente ao longo do tempo (TUKAMUHABWA *et al.*, 2015).

Figura 05 - Operacionalizando a Resiliência na Cadeia de Suprimento (SCRES)

Fonte: Tukamuhabwa *et al.* (2015)

Ainda, na Figura 05 de Tukamuhabwa *et al.* (2015), mencionam a preparação de um evento disruptivo, podendo ser definido como sendo a capacidade para alterar ou interromper o seguimento normal de um processo, isto é, perturbação grave à habilidade de produzir e distribuir seus produtos; uma alteração no decorrer do andamento esperado de uma ou um conjunto de empresas capaz de abalar seus resultados financeiros. Ressalta-

se que estes são problemas persistentes que afetam, às vezes, severamente, os custos e rentabilidade, tanto quanto as operações logísticas.

A relação custo-eficácia no campo da resiliência, conforme indica a literatura, deve ser considerada, embora a maioria das definições formais de SCRES não parecem incorporar a eficiência de custos; o trabalho explora se as relações de custo-margem nas capacidades e vulnerabilidades podem ser reconhecidas como uma consideração importante, especialmente quando estudadas em um ambiente que os campos político, tecnológico e econômico são relevantes como é o caso da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Existe ineditismo ao se explorar a estrutura criada pelo Tukamuhabwa *et al.* (2015). Mesmo em métodos de análise semelhantes como propõem Sheffi e Rice (2005) e (ZOBEL, 2011b), a aplicação em condições adversas envolvendo questões de flexibilidade, demanda e logística se sobressaem. *A questão econômica na resiliência é nova*, que nesta tese pretende ter aprofundamento no campo acadêmico, além disto, uma investigação sobre os custos e margens operacionais como o foco principal e sua aplicação na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar da resiliência é inédito na literatura.

2.1.5 Métodos de Pesquisas Dominantes sobre a Resiliência

Em termos de método de pesquisa, as abordagens dominantes na literatura são a programação não linear¹ (PARK; LEE; SUNG, 2010), os modelos heurísticos² (AHMADI JAVID; AZAD, 2010), a teoria dos grafos³ (SALEMA; BARBOSA-POVOA; NOVAIS, 2010), a técnica Taguchi⁴ com sistema imunológico artificial (TIWARI *et al.*, 2010), a abordagem de cenário (PAN; NAGI, 2010), o estudo de caso (HAMMAMI; FREIN; HADJ-ALOUANE, 2009), a lógica difusa (MOHAMMADI BIDHANDI *et al.*,

¹ Normalmente utilizado para problemas em que as variáveis ou a função não variam linearmente, isto é, referem-se a situações onde se apresenta uma causa e efeito desproporcionais.

² É um procedimento simplificador que, em face de difíceis questões envolve a substituição destas por outras de resolução menos difíceis a fim de encontrar respostas viáveis, ainda que imperfeitas.

³ Teoria dos grafos é um ramo da matemática, o qual se apresenta representações gráficas das relações existentes entre elementos de dados em determinado conjunto com vértices e arestas.

⁴ O Método Taguchi é uma abordagem da engenharia de qualidade que busca aumentar a robustez dos projetos/produtos por meio da diminuição dos efeitos dos parâmetros de ruído ou perturbação no seu desempenho.

2009), a pesquisa empírica (TAPS; STEGER-JENSEN, 2007) e os modelos de simulação (BOTTANI; MONTANARI, 2010; GAO; NIU; WANG, 2011; HUANG; HSIEH; FARN, 2011; LAU; XIE; ZHAO, 2008; LONGO; MIRABELLI, 2008; MAHNAM *et al.*, 2009; SEN; POKHAREL; YULEI, 2004; SHUKLA *et al.*, 2010; YUE; YOU; SNYDER, 2014).

Nos casos em que as probabilidades de interrupção ou disrupção podem ser estimadas, ou são:

- (i) a compilação de dados empíricos sobre impactos diretos e quais mecanismos causais estão bem estabelecidos;
- (ii) dados sobre os impactos cujos vínculos causais permanecem obscuros;
- (iii) *extrapolações probabilísticas ou deterministas por modelos de performance teóricos construídos a partir de dados históricos ou experiências operacionais;*

Assim, os modelos de simulação podem ser uma ferramenta para lidar ou tratar com estes tipos de problemas.

2.2 Modelos de Simulação

Um modelo de simulação pode ser definido como uma gama variada de métodos e aplicações que representam certa realidade (KELTON; SADOWSKI; SADOWSKI, 2002), no entanto, sua precisão é determinada *tal que seja suficiente* para descrever o sistema real (HARREL, CHARLES; GHOSH; BOWDEN, 2000), de maneira que o propósito do modelo determina, em última análise, sua precisão (GARCIA, 1997). Seu uso pode guiar o processo de tomada de decisão, atuar nas análises e avaliações de estratégias e amparar respostas para a melhoria de performance. É utilizado para tratar de problemas de alta complexidade (CHWIF; MEDINA, 2015). Em sua acepção *pode haver parâmetros técnicos e econômicos* (FREITAS FILHO, 2008).

O aperfeiçoamento na área de informática, como *hardwares* mais robustos, avanços nas linguagens de programação e de simulação, tem possibilitado aplicar cada vez mais a técnica de simulação em diferentes áreas do conhecimento humano. Silva (2005) aponta os principais benefícios: (a) melhoria da previsão de resultados na execução de uma

determinada ação, (b) melhoria da avaliação de riscos na tomada decisão, (c) a identificação de possíveis complicações antes mesmo de suas ocorrências, (d) a extinção e modificação de procedimentos em arranjos industriais que não agregam valor à produção, (e) a execução de análises de sensibilidade, (f) a diminuição de custos com o emprego de recursos (como mão de obra, energia, água e estrutura física) e (g) a exposição da integridade e viabilidade de um determinado projeto em termos técnicos e econômicos.

Mendes; Valdman; Souza Júnior (2011) complementam: (h) a maior compreensão e exploração do comportamento em estudo, provendo um entendimento mais amplo e profundo de como as variáveis atuam no processo; (i) permitem a avaliação e elaboração de estratégias de operações e controle (j) aplicação didática, visto que possibilita conceber distintas circunstâncias do processo, dessa maneira, auxilia a compreensão do estudo, o que de forma experimental poderia ser impossível de se atingir.

A construção do modelo da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar se dá sob a compreensão que suportam respostas analíticas, permitindo reconstituir a rotina funcional do processo real. Dessa forma, o modelo não pode incorporar todas as suas características, devendo-se analisar a combinação entre o esforço da sua elaboração, isto é, o tempo e a dificuldade requerida para obtê-lo e verificá-lo, e o nível de detalhes do mesmo, bem como as vantagens esperadas para seu emprego (GARCIA, 1997). Um modelo de simulação inicia-se a partir da distinção da porção do mundo real que constituirá o estudo, identificando os aspectos mais importantes do sistema e suas inter-relações, em um universo esquemático e/ou quantitativo. Estabelecido o sistema, a etapa seguinte constitui-se no esforço de caracterização de cada variável especificada no modelo, tendo em vista a compreensão de sua dimensão e comportamento no decorrer do tempo (SILVA; BERGAMASCO; VENDITE, 2004).

Schwaab e Pinto (2007) ainda apontam que na concepção do modelo, nem todas as variáveis podem ser controladas e/ou medidas. Silva; Bergamasco; Vendite (2004), completam que duas características são fundamentais: (a) o equilíbrio na definição do objetivo: comedimento entre o amplo e difícil, e o restrito e fácil, muitas vezes por conta do tratamento interdisciplinar e frequentemente interinstitucional; (b) a organização das informações e coerência de escala: sistematização de dados que serão demandados na construção, uso e emprego do modelo.

Uma maneira de categorizar os modelos de simulação pode ser dada por Garcia (1997), Silva (2005), Tognetti e Fiorillo (2015):

- (a) estáticos ou dinâmicos: denominam-se como modelos estáticos são aqueles onde o valor das variáveis permaneça constante no tempo, cujo modelo é um conjunto de equações algébricas; se as entradas permanecem as mesmas, as saídas permanecem inalteradas. Ao passo que nos modelos dinâmicos, as variáveis mudam no tempo, que é a variável independente e o efeito da variável de entrada irá provocar mudança no comportamento do sistema nos instantes posteriores; usualmente utiliza equações diferenciais;
- (b) determinístico ou estocástico: em um modelo determinístico a saída pode ser calculada de maneira exata tão logo se conheça a variável de entrada e as condições iniciais, frequentemente é utilizado para modelar o processo; modelos estocásticos possuem termos aleatórios que tornam impossível um cálculo exato da saída, normalmente é utilizado para modelar ruídos, efeitos dinâmicos de incertezas e distúrbios aleatórios;
- (c) discretos ou contínuos: modelos discretos são aqueles no qual o vínculo entre entrada e saída é usualmente representado por equações. As diferenças e os pontos consecutivos de tempo são conhecidos, a variável assume apenas valores distintos no intervalo. Nos modelos contínuos, o avanço da contagem de tempo na simulação dá-se de forma contínua, o que possibilita determinar os valores das variáveis de estado a qualquer instante.

Himmelblau (1970) aponta que modelos são aplicados de maneira universal, argumentando ser impraticável abarcar, sob apenas uma definição, as várias conotações dos modelos utilizados nas diferentes áreas de pesquisa. Assim, apresentam-se três tipos abrangentes de modelos que podem ser delineados para um processo:

- (a) modelos de fenômeno de transporte: fazem uso de princípios físico-químicos. Exemplifica com modelos fenomenológicos de conversão, descreve as conversões de massa, energia, quantidade de movimento, o que Schwaab e Pinto (2007) chamam de modelos teóricos;

(b) modelos de balanço populacional ou *Population Balance Equations* - PBE: normalmente aplicados para descrever a evolução de uma população de partículas, predominantemente utilizados na engenharia química;

c) modelos empíricos: usam dados empíricos para o ajuste. São modelos polinomiais, exponenciais, redes neurais, entre outros, utilizados para ajustar os dados experimentais através das funções de transferência: $F(x)$.

Tognetti e Fiorillo (2015) e Schwaab e Pinto (2007) complementam as classificações com:

(d) modelos lineares e não lineares: um modelo é considerado linear quando ele pode representar adequadamente um sistema dinâmico linear ou linearizado. Nesse sistema dinâmico a causa e o efeito são proporcionais e, nessa situação, diz-se que o sistema é válido para aplicação do princípio da superposição, e sendo assim, o sistema pode ser considerado linear. O princípio da superposição afirma que a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas funções diversas é a soma das duas respostas individuais (OGATA, 2003, p. 46). Modelos não lineares não obedecem ao princípio da superposição.

(e) modelos de parâmetros concentrados e de parâmetros distribuídos: são encarados como homogêneos por todo o sistema e são descritos por um número limitado de equações. Já nos parâmetros distribuídos é descrito por um número infinito de equações, incorporando variações espaciais dentro do volume de controle.

2.2.1 Validação de Modelos de Simulação

Entre as tarefas mais difíceis em simulação está em estabelecer se o modelo projetado revela com fidedignidade suficiente o sistema em estudo, apontam Silva (2005) e Chwif e Medina (2015); os autores recomendam a observância de preceitos que são elementares, entre elas, a validação.

A validação do modelo de simulação pode ser realizada por duas formas: *por técnicas estatísticas e técnicas subjetivas*. A estatística compreende na aplicação de um

ferramental como: teste de hipótese, ajuste de curvas, análise de regressão, através do uso de estatística descritiva, entre outras disponíveis. A técnica subjetiva, normalmente, é indicada quando não há viabilidade de realizar análises exploratórias consideráveis. Neste caso pode-se dar por testes de campo, teste de submodelos, validação de eventos segundo lógica tocante ao sistema em análise, dentre outras possibilidades (MENNER, 1995).

Precisar com que força os dados gerados são representativos é uma das ações efetivas na validação, de modo que compreende a comparação dos dados produzidos pelo modelo, com as apuradas do sistema real (SILVA, 2005). Para isso adota-se um conjunto de orientações como apontam Balci (1997, 1998) e Silva (2005, 2006): (a) executar o conjunto completo do modelo para múltiplas situações, efetivando análises dos dados de saída; (b) rastrear o modelo investigando a consistência nos comportamentos dos submodelos e suas saídas; (c) verificar os termos técnicos correntes; (d) coletar dados pertinentes e relevantes; (e) empregar teorias efetivas ao modelo; (f) investigar outros modelos criados previamente; (g) se munir de experiência e intuição na produção do modelo.

2.2.2 Modelos de Simulação na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar

Tem ocorrido um aumento de pesquisas que procuram criar e aplicar modelos matemáticos, bem como, o uso de *softwares* para amparar operações da cadeia da cana-de-açúcar, enfatizando-se os modelos que consideram plantio, colheita, transporte de cana-de-açúcar, e, as etapas de processamento destes produtos (BARBOSA DA SILVA, 2012). Uma vantagem do seu uso na aplicação na cadeia da cana-de-açúcar é criar um ambiente, o qual possibilite a experimentação de efeitos de longo prazo, aprendizado, e estratégias de alto desempenho (HARREL, C. R. *et al.*, 2002).

Uma característica básica da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é que possui um elo agrícola, que o diferencia de outros, como os sistemas industriais. Isto porque envolve organismos vivos que estão relacionados ao processo produtivo. Esta construção introduz um grau maior de incerteza, pois o número de fatores aleatórios pode tornar-se elevado e não deve ser desprezado, como por exemplo uma quebra de safra (TATIZANA, 1995).

A partir das perspectivas científicas e de implementação, alguns autores como Higgins *et al.* (2004); Hildebrand (2002); Santos (2012) consideram a simulação e a otimização total da cadeia de suprimentos de açúcar e etanol, de maneira integral, uma tarefa intratável dado ao volume de variáveis e a dimensão do problema. No entanto, como apontam Higgins *et al.* (2004) pode-se explorar ganhos de entendimento através de uma melhor integração e entendimento entre as etapas que compõem um modelo agrícola de produção de cana-de-açúcar, sobretudo sob a ótica econômica.

Trabalhos anteriores, como os de Yu; Pizysieznig; Fonseca (1988) apresentam um modelo matemático para estimativas de possíveis reduções de custos de produção, para diferentes combinações de avanços técnicos até o ano de 2000, no Brasil. Os resultados mostraram que a redução de até 50% do custo de produção por unidade era possível com progressos técnicos previsíveis. Além disso, percepções sobre as interferências entre diferentes tecnologias são obtidos.

O trabalho de Dias *et al.* (2010) simula a produção de etanol anidro a partir da cana-de-açúcar, em uma destilaria autônoma, isto é, produtora exclusiva de etanol, analisando os custos de produção para diferentes cenários. Se verifica como a venda de energia e outros parâmetros afetam os custos de produção. Verificou-se que “a venda de eletricidade excedente exerce influência positiva sobre a rentabilidade, pois reduz os custos de produção de etanol” (DIAS *et al.*, 2010, p. 738) e em uma escala crescente, com a tecnologia adotada.

O trabalho de Stutterheim (2006) se concentra em desenvolver e demonstrar, em conceito, um modelo integrado de cadeia de suprimentos para a indústria açucareira, na África do Sul, e o utiliza como uma ferramenta de planejamento estratégico.

Barbosa da Silva (2012) modelou e simulou as etapas de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar; Sinício e Bajay (1992) trabalham em um modelo para utilização e racionalização do uso de vapor na produção do álcool e açúcar. Já Ramos (2010) propõe um modelo matemático para o custo e energia na produção de cana-de-açúcar, o qual se concentra nas diversas variedades de cana e seu balanço energético.

Pode-se observar que estes e a maioria dos trabalhos encontrados na literatura se concentram ou no elo agrícola ou no elo industrial, normalmente havendo uma clara dominância de um em relação ao outro.

Além dos trabalhos citados, anteriormente, uma linha completar estratégica de análise pode ser feita. Colicchia; Dallari; Melacini, (2011) apontam que uma estrutura baseada em simulação pode ser utilizada para avaliar estratégias de redução de risco, quantificar os custos relacionados à implementação das estratégias, assim como, avaliar a eficiência e a eficácia de alternativas estratégicas à luz de diferentes ambientes da cadeia de suprimentos.

Diferenciando dos modelos descritos anteriormente, o modelo, aqui proposto, explorou de maneira predominante questões econômicas, mas, para chegar ao resultado apropriado foi importante conhecer a fundo aspectos que são relevantes, tanto em termos técnicos quanto econômicos, da cadeia de cana-de-açúcar. É nesse âmbito, que faltam estudos que auxiliem a responder de forma eficiente e eficaz no que tange ao impacto da resiliência, nesta cadeia produtiva, bem como, apontam Santos; Garcia; Shikida (2015, p. 33): “necessita-se de mais dados [...] em aspectos como margens operacionais e lucratividade em cada elo da cadeia produtiva.” Sendo estes aspectos de margens operacionais e lucratividade de grande valia para análises financeiras, a construção deste modelo pôde auxiliar a levantar os conhecimentos necessários, não apenas para o âmbito deste trabalho, mas, poderá dar suporte a outros pesquisadores que se dediquem à temática.

2.3 Curva de Experiência

Existe um conceito que liga a evolução dos custos de produção com a produção gerada, que representa a experiência acumulada de uma produção; a construção que pode descrever esse contexto é a curva de experiência (ARGOTE; EPPLE, 1990; DUTTON; THOMAS, 1984; NADEAU *et al.*, 2010).

Curvas de experiência vêm sendo empregadas ao longo de décadas a fim de examinar as reduções de custos de novas tecnologias. A primeira publicação de curva de aprendizado tecnológico foi Wright (1936) em seu artigo seminal chamado “*Factors Affecting the Cost of Airplanes*”, sobre a redução do custo da montagem de aviões, durante a Primeira Guerra Mundial (ANZANELLO; FOGLIATO, 2007; ARGOTE; EPPLE, 1990; ARROW, 1962; JUNGINGER, 2005; NADEAU *et al.*, 2010; NEIJ, 2008; SARK, 2008).

Uma mudança marcante na maneira de como a curva de aprendizado é utilizada foi provocada pelo *Boston Consulting Group* (BCG) em 1968, o primeiro a escrever sobre a curva de experiência, uma generalização julgada como ousada para a curva de aprendizado. Esse trabalho analisou o preço unitário médio e a produção acumulada de 24 produtos industriais selecionados, estendendo o conceito de duas maneiras não vistas antes. A primeira, o conceito foi aplicado ao custo total do produto, incluindo outros mecanismos de aprendizagem como P&D, economias de escala, custo de capital, *marketing*, entre outros. O segundo é que não foi aplicado somente ao nível de uma única empresa, mas à indústrias inteiras (CHEN; KHANNA; YEH, 2012; DAY; MONTGOMERY, 1983; HENDERSON, 1984; JUNGINGER, 2005; VALUE BASED MANAGEMENT, 2016).

O modelo foi dividido em quatro fases (ver Figura 06): na primeira fase, um fabricante introduz um novo produto a um preço inferior aos custos de produção para criar um mercado. Com o aumento do volume de produção, os custos diminuem rapidamente, enquanto os preços estão caindo a uma taxa mais baixa, chamada ‘desenvolvimento’. Durante a fase ‘guarda-chuva’, aumentam as margens de lucro, o que pode atrair concorrentes que produzem o mesmo produto. Comumente, o produtor principal tem uma posição dominante no mercado e é capaz de determinar o preço de mercado por um período prolongado de tempo. Mais tarde, ocorre um ‘estremecimento’ ou *shakeout*, e os preços declinam, rapidamente, por um curto período de tempo. Finalmente, numa fase estável, tanto os preços como os custos diminuem à mesma velocidade, isto é, as margens de lucro relativas são constantes. Nesse modelo, apenas na última fase são idênticas as inclinações das curvas de custo e de preço e só então os preços podem ser usados para estimar as taxas de redução de custos. Uma vez que uma situação estável foi alcançada, isto não garante necessariamente que esta situação permanecerá assim para sempre. Dependendo de fatores como a mudança da demanda, a mudança do número de fornecedores ou o declínio do apoio governamental, poderá ocorrer uma nova fase de ‘guarda-chuva’ ou ‘*shakeout*’ (BCG,1970; JUNGINGER, 2005; NEIJ, 2008).

Figura 06 - As Quatro Fases da Curva de Experiência da BCG

Fonte: BCG (1970)

Mudanças bruscas na curva de experiência plotada com dados de preços poderiam ser explicados por mudanças na estrutura da indústria. Durante os períodos de estrutura de mercado estável, as margens de lucro permanecem relativamente constantes e reduções de preços refletem a diminuição proporcional de custos. No entanto, durante os períodos de mudança estrutural na indústria como, por exemplo, em um abalo ou crise, as margens de lucro podem aumentar ou diminuir. Assim, uma aplicação cuidadosa da curva de experiência é necessária para visualizar a inclinação da curva à luz da dinâmica da indústria. Acrescenta-se que as curvas de experiência são capazes de capturar alterações de natureza tecnológica. Mudanças drásticas resultariam em um deslocamento ou mudança na tendência para baixo, de forma mais abrupta na curva, e para uma taxa mais moderada a tendência poderia ser retomada (BCG, 1970; COLATAT, 2009).

A conceituação das curvas de experiência é originada das curvas de aprendizado, que usamos para examinar a diminuição de custo por uma unidade produzida, dentro de certa indústria. A diferença fundamental, entre as duas, é que a curva de aprendizado é direcionada para entradas individuais de um processo fabril, como linhas de produção e montagem e na curva de experiência, são introduzidos custos de todos os elementos formadores do custo total, de um modo mais completo, global: como custos de produção agrícola e industrial, dentre outros.

As curvas de experiência têm sido utilizadas de uma forma mais abrangente do que as curvas de aprendizagem, e normalmente referem-se às reduções de custos para produtos não-padronizados, produzidos no mundo, em determinado país ou dentro de uma empresa. As reduções de custos, comumente, referem-se ao custo total, como mão de

obra, capital, custos administrativos, entre outros; estas reduções de custos podem estar no processo ou produto: as fontes de redução de custos incluem mudanças no sistema produtivo, como inovações incrementais no processo, efeitos de aprendizagem e efeitos de escala; as alterações no produto incluem inovações incrementais no próprio produto, redesenho e padronização. As mudanças nos preços comercializados, também, estão incluídas neste arcabouço (NEIJ *et al.*, 2003).

Na década de 1960, haviam muitos analistas, principalmente na área acadêmica, que estavam conservadores e receosos sobre a aplicabilidade da curva de aprendizado (DUTTON; THOMAS; BUTLER, 1984). Isto porque Nadler; Smith (1963) encontraram uma ampla variação nas funções nos processos individuais de manufatura em dez processos, de três fábricas e Alchian (1963) descobriu que as previsões feitas usando curvas de aprendizado poderiam não ser confiáveis, caso se ignorassem alguma variável relevante ou se baseassem nos primeiros 20% da produção total, tentando prever o trabalho necessário para os restantes 80%, em um estudo que envolveu vinte dois tipos de fuselagens de aviões, no qual uma margem de erro entre 20% a 25% envolveu o emprego de 45 milhões de horas de mão de obra direta.

De maneira geral, houve uma divergência nos estudos que envolviam as curvas de aprendizagem em dois campos, um acadêmico e outro prático (DUTTON; THOMAS; BUTLER, 1984). O primeiro foi liderado por acadêmicos que buscavam desenvolver a teoria de curva de aprendizado e que aplicaram em estudos empíricos. Vários economistas tomaram o princípio geral e incorporaram em teorias econômicas, como Arrow (1962) e Hirshleifer (1965). O segundo foi percorrido por engenheiros industriais, consultores de gestão oferecendo conselhos prescritivos, como estimação de custos, precificação ou estratégias de longo prazo.

A curva de experiência é baseada na teoria que a redução de custos se correlaciona com o nível de experiência. Para a maioria dos produtos e serviços não é a passagem de tempo que levam a redução de custos, mas sim, a acumulação da experiência, por isso, a redução de custos pode ser entendida não como uma função do tempo, mas em funções explícitas de experiência, ou seja, como o aprendizado (MCDONALD; SCHRATTENHOLZER, 2001).

Uma curva de experiência descreve a redução de custos de uma tecnologia em função da experiência acumulada em termos de unidades, volumes, entre outros; no entanto, a experiência por si só não leva à redução de custos, mas sim **oferece oportunidades** para reduções de custos. A experiência adquirida vai depender da demanda ou ampliação do mercado. A demanda do mercado, por sua vez, vai depender do custo e desempenho como por exemplo, qualidade, função, facilidade de uso, eficiência e durabilidade da nova tecnologia, em comparação às tecnologias existentes.

No curto e médio prazo, as reduções de custos podem ser limitadas por barreiras de mercado, tais como: alto custo inicial, desempenho do produto limitado, acesso limitado ao capital, entre outros e a taxa em que os fabricantes são capazes de reduzir custos através do aumento da produção. A redução de custos pode ser afetada por instrumentos de política que estimulam o desenvolvimento de uma tecnologia e a demanda do mercado.

Curvas de experiência são baseadas, muitas vezes, em dados de preços e não em dados de custos. A utilização de dados de preços, no entanto, **apenas será precisa se as margens permanecem constantes ao longo do tempo** ou se forem considerados conjuntamente na análise (NEIJ *et al.*, 2003).

2.3.1 Utilização das Curvas de Experiência

A principal utilização para a curva de experiência, como mostrado na literatura, é para avaliar a variação de custo tomando por base um resultado acumulado de produção. Uma característica específica das curvas de experiência é que o custo C_p varia como função de um índice b , denominado de índice de experiência, do custo inicial C_0 , e da produção acumulada P , como mostrado na equação (1):

$$C_p = C_0 * P^b \quad (1)$$

Onde:

C_p = custo ou preço atual

C_0 = custo ou preço inicial

P = produção acumulada

b = índice de experiência

A equação (1) obedece à lei de potência, e pode ser manipulada para representar o que ocorre com o custo de produção em dois momentos de um processo produtivo, sendo o C_{p1} o inicial e o C_{p2} o final. A relação entre o custo inicial e o final, PR, como mostrado na equação (2), e equação (3), é uma taxa de comportamento exponencial em relação ao índice de experiência, denominada de taxa de progresso (PR), que pode ser apresentada como uma função da produção inicial, produção final e do índice de experiência.

$$PR = (C_{p1} = C_o * P_1^b) \div (C_{p2} = C_o * P_2^b) \quad (2)$$

$$PR = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^b \quad (3)$$

A taxa de progresso - PR é simplificada para avaliar períodos múltiplos de dois da produção, e nesse caso, após simplificação conduz a equação (4) e equação (5). Estas equações são muito úteis para expressar o progresso da variação de custo, quando se utilizam diferentes tecnologias.

$$PR = 2^b \quad (4)$$

A título de exemplo: quando acontece a duplicação nos pontos de duplicação ($n=1$) e a quadruplicação ($n=2$) a uma taxa de $PR = 0,8$ significa que os custos de produção declinam em 20%, a cada período e a experiência b variou de -0,32 para -0,16. Da mesma forma, para PRs maiores que 1, significa que os custos de produção aumentaram.

Plotados em escala log-log a curva pode ser linearizada tomando por base as n acumulações de produção pela evolução da experiência, que pode ser associada em seu estágio inicial a custo de produção equivalente a 100%, que em processo produtivo corrente, sistematicamente, varia acompanhando uma curva exponencial decrescente, por

redução, até um ponto de saturação. Observe que a curva, mesmo linearizada, obedece às características exponenciais.

$$b = \frac{\log_e^{PR}}{\log_e^2} \quad (5)$$

Mostram-se na Figura 07 duas formas de representação de uma curva de experiência em escala (a) linear, à esquerda e (b) log-log, à direita. Na Figura 07 (a), a forma de representação da curva de experiência em escala bilinear, ajustada para representar custo unitário percentual por produção acumulada e na Figura 07 (b) representação da curva de experiência em escala bilogarítmica, considerando os mesmos parâmetros, ou seja: taxa de progresso $PR = 0,8$ com produção acumulada nos pontos de duplicação de produção, onde ocorre a redução de custos de 20%, a cada duplicação do total de unidades produzidas:

Figura 07 – Duas maneiras de se visualizar uma curva de experiência em escala (a) linear e (b) log-log com uma redução de custo de 20% para cada duplicação do total de unidades produzidas

Fonte: Neij *et al.* (2003)

A curva de experiência tem sido utilizada para avaliar reduções de custos ao longo de um processo produtivo, onde melhorias incrementais são refletidas em seu custo, proporcionando maior ou menor inclinação dos respectivos segmentos de reta. A forma de apresentação como segmentos de reta é a mais comum, devido à alteração da escala bilinear para a escala bilogarítmica. Pode-se com a curva de experiência representar os efeitos combinados de um grande número de parâmetros, que podem flutuar em uma escala de curto prazo, e para essas situações a curva de experiência não é um bom instrumento de avaliação. Assim, em sua construção exige-se muitas duplicações de produção, onde pode-se distinguir mais claramente o padrão ou a tendência apresentada.

Então, as reduções de custos ilustradas por uma curva de experiência nem sempre possuem um mesmo nível de declinação ao longo de todo o tempo analisado, e isso se deve a descontinuidades ou rupturas resultantes de diversos fatores, e entre eles pode-se citar: a estratégia de preços adotada, as grandes mudanças de tecnologia como melhorias radicais ou mesmo mudanças estruturais na indústria. Uma estratégia que se tem adotado para tentar aplicar o método da curva de experiência, para estudos que envolvem estas descontinuidades, tem sido a utilização de duas curvas de experiência com parâmetros diferenciados, mas tal discernimento é difícil, pois distinguir entre mudanças incrementais e radicais são fatores sutis e muitas vezes, arbitrários, inerentes ao contexto observado. (NEIJ *et al.*, 2003).

Nesses casos, um método alternativo e normalmente complementar à curva de experiência é a análise de regressão, que é uma técnica estatística baseada em dados observacionais ou experimentais para estimar os parâmetros de uma função de regressão. Ao obter a referida função de regressão deve-se fazer a sua avaliação quanto ao grau de ajuste em relação aos dados obtidos para a curva de experiência. Diferentes métodos para expressar numericamente esse ajuste pode ser o coeficiente de determinação r^2 , que é definido como a razão entre a soma dos quadrados das diferenças em relação à média, e entre os valores estimados e os dados obtidos, como mostrado na equação (6) por Lapponi, (2005).

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Onde:

y_i = dado obtido

$\bar{y}$ = média aritmética dos valores observados

$\hat{y}_i$ = valores estimados

O coeficiente de determinação r^2 é o indicador mais usado para medir a qualidade do ajustamento de uma função de regressão, pois mede a proporção ou percentual da variação total que pode ser explicada pelo modelo de regressão. Seus limites são $0 \leq r^2 \leq 1$, onde um r^2 igual a 1 significa um ajustamento perfeito, por outro lado, um r^2 igual à

zero significa que não há qualquer relação entre o modelo de regressão e os dados obtidos. (GUJARATI; PORTER, 2011).

O coeficiente de determinação r^2 deve ser utilizado com prudência e, portanto, é necessário avaliar a necessidade de adição de um maior número de termos ao modelo de regressão para torná-lo mais preciso. O coeficiente de determinação r^2 pode se elevar com a adição de termos ao modelo de regressão, mas esse novo modelo pode não ser superior ao antecedente, pois um valor alto de r^2 pode ser alto apenas porque determinado dado variou de forma muito expressiva, e com isso o resultado pode estar distorcido em relação à capacidade da nova função de regressão representar melhor o fenômeno estudado. Em contrapartida, o coeficiente de determinação r^2 poderá ser menor porque a amplitude dos dados é pequena para permitir que uma boa representação da relação dos dados com a função de regressão. Por isso, constata-se que o coeficiente de determinação r^2 não deve ser considerado isoladamente, mas sempre atrelado a outras análises do modelo (STATCAMP, 2017).

2.3.2 Curvas de Experiência no Setor Energético e na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar

Para o setor de energia, o conceito de curva de experiência foi aplicado aos custos de produção de energia renovável para várias tecnologias, a fim de avaliar as políticas e traçar possíveis desenvolvimentos futuros (HETTINGA *et al.*, 2009; IEA, 2003). Ela também foi utilizada para analisar como as novas tecnologias se desenvolvem e se difundem. Para cada estágio, uma taxa de aprendizado pode ser atribuída e diferentes mecanismos desempenham influências que podem levar às mudanças tecnológicas, resultando em reduções de custo ao longo do tempo (GRÜBLER; NAKIĆENović; VICTOR, 1999). Adicionalmente, Neij *et al.*, (2003), afirmam que a metodologia dos modelos de curva de experiência na área de energia é complexa e deve ser vista como combinação de vários parâmetros que efetuam redução de custos. A fraqueza de muitas curvas de experiências tem sido a negligência de vários parâmetros que efetuam redução de custos.

Curvas de experiência, também, têm sido usadas como uma ferramenta de análise da produção e da estratégia na indústria energética. Nesse enfoque, Grübler; Nakićenović;

Victor (1999) se aprofundam na metodologia e a partir da análise de curvas de aprendizagem, identificam padrões, processos e prazos que tipificam a difusão de novas tecnologias em mercados competitivos. Já Wit *et al.*, (2010) investigam o impacto das diferentes hipóteses de aprendizado tecnológico sobre os padrões de difusão em diferentes mercados de biocombustíveis. O trabalho de Junginger *et al.* (2006) teve como principal objetivo avaliar a adequação da abordagem da curva de experiência para os sistemas de energia de biomassa. Aprofundando em questões metodológicas, Sark (2008) propõe a inclusão de um erro padrão no valor de progressão da curva de experiência. Na averiguação de Yeh e Rubin (2012) revisam-se os principais tipos de incerteza em curvas de experiência e seu efeito sobre as taxas projetadas de redução de custos. No exame de Nadeau *et al.* (2010) integram-se diversas curvas de aprendizagem e modela custos de diversos processos para examinar a aprendizagem na fabricação de tubos, quantificando os impactos nos custos de melhorias de aprendizagem no tempo de ciclo, tempo de inatividade e taxas de rejeição. Na pesquisa de Anzarello e Fogliato (2007) se faz uma revisão da literatura da curva de aprendizado, chegando à conclusão que entre suas principais utilizações, destacam-se a programação da produção, a alocação de recursos produtivos, as estimativas de prazos de conclusão de tarefas e o monitoramento de custos associados à produção. Finalmente, Méjean; Hope (2010) quantificam os efeitos das restrições de produção dos custos de milho e cana-de-açúcar convertidos em bioetanol e Hettinga *et al.* (2009) trabalham a curva de experiência para o etanol de milho.

Durante várias décadas, o conceito de melhorias baseadas na aprendizagem e experiência, bem como sua implementação matemática sob a forma de curvas, foi utilizado para caracterizar, projetar e avaliar a evolução dos custos em várias indústrias. As curvas de experiência têm sido aplicadas para a análise de diferentes tecnologias na área de energia, mais recentemente. Para o caso da cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar este movimento começou em 1996 com o trabalho seminal de Goldemberg (1996).

A primeira pesquisa com a relação empírica entre os custos de produção e a experiência cumulativa de produção do etanol brasileiro, a destacar o sucesso do programa PROÁLCOOL, foi publicada em 1996 (GOLDEMBERG, 1996). Utilizando-se dos preços do etanol pagos aos produtores como um indicador do desempenho do sistema, bem como da produção nacional acumulada, construiu a primeira curva de experiência na

produção de etanol. A curva, usando eixos logarítmicos duplos e traçando uma função de potência simples, mostra uma linha reta representando a razão de progresso (PR).

O segundo trabalho envolvendo curva de experiência para o etanol brasileiro foi de Moreira e Goldemberg (1999) em seu artigo intitulado '*The alcohol program*' onde expõem o processo de produção do açúcar e do etanol, como uma discussão da evolução do custo de produção, problemas ambientais, cogeração de energia, consequências sociais, e discute o futuro do programa.

Em 2004, um terceiro trabalho com a curva de experiência para o etanol brasileiro foi identificado. O artigo de Goldemberg, Coelho, Nastari e Lucon (2004) dá algumas primeiras impressões das razões mais importantes por trás dessas reduções de preços: as economias de escala e os avanços tecnológicos. Adicionalmente Junginger (2005) foi um dos primeiros a estruturar as reduções de custos nas cadeias de suprimento de bioenergia. Suas ideias ajudaram a estruturar o entendimento sobre reduções de custos da cadeia de cana-de-açúcar no Brasil. Bastante em acordo com as teorias gerais sobre redução de custo, ele afirma que os preços caíram, principalmente, devido aos avanços tecnológicos, na maior parte de rendimentos agrícolas e economias de escala na fase industrial. Opinião muito similar ao de Goldemberg, Coelho, Nastari e Lucon (2004).

Nenhuma pesquisa havia quantificado estes efeitos por várias razões: as explicações para custos decrescentes exigem o conhecimento do desempenho de cada fase, em cada período histórico. Uma análise *bottom-up*⁵, envolvendo o produto, capacidade de produção, despesas específicas, poderia fornecer tais ideias e levantar argumentos para potenciais reduções futuras de custos. Os trabalhos que procuraram preencher esta lacuna foram os trabalhos de Bake (2006) e Bake *et al.* (2009), que segregaram a curva de experiência em um elo agrícola e industrial, o que forneceram mais esclarecimentos sobre os fatores que diminuíram os custos no passado. A partir daí não se encontrou na literatura qualquer avanço significativo na utilização da curva de experiência para etanol brasileiro.

⁵ A análise *bottom-up* de maneira sucinta é a análise realizada do específico para o amplo

2.4 Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar

2.4.1 Histórico

A história da cana-de-açúcar no Brasil é antiquíssima e, em inúmeras ocasiões, mescla-se com a própria evolução do país. Originária das regiões tropicais do Sudeste Asiático, próximo da região de Nova Guiné e Indonésia, há muito tempo a cana-de-açúcar já era conhecida por indianos, chineses, persas, árabes e gregos. O cultivo da planta iniciou em Portugal, no princípio do século XIV, nas regiões de Algarves e Coimbra. Em meados do século seguinte seu plantio foi consolidado na Ilha da Madeira (MARIN, 2014; NYKO *et al.*, 2013; SOUZA, 2015).

Em data anterior à tomada de Constantinopla pelos turcos, em 1453, o açúcar, seu derivado, era tratado como especiaria e largamente comercializado com o oriente por rotas terrestres. Devido à interrupção dessas passagens foi necessária a busca por rotas marítimas, incentivadas pela elevação do preço das diversas especiarias, iniciando-se o período das grandes navegações. Produto nobre, o açúcar tinha o consumo restrito às cortes e à nobreza, devido ao elevado preço, entretanto, a partir de 1500, o preço começou a reduzir, e embora ainda elevado, tornou-se um produto utilizado de modo mais intenso e variado. Portugal destacou-se nessa fase ao buscar rotas marítimas, culminando com descobrimento do Brasil, terra excelente para cultivo da cana-de-açúcar. Nessa época, o rei de Portugal, D. João III ordenou o plantio ao seu governador geral da Terra do Brasil, Martim Afonso de Sousa (MACHADO, 2003; PESTANA RAMOS, 2004).

Tarefa iniciada em 1532, o cultivo da cana-de-açúcar foi o ponto de partida da manufatura açucareira de larga escala no país, segundo Christofolletti e Müller de Mello (2011). O Engenho São Jorge dos Erasmos, um dos primeiros engenhos da então colônia portuguesa foi construído em torno desta época. Suas ruínas foram doadas à Universidade de São Paulo (USP), em 1958.

Também, era intenção da Coroa Portuguesa o plantio de cana-de-açúcar visando ao mercado externo (BUENO, 2009). Até 1570 foram encontradas dificuldades com mão de obra e falta de capital para financiar a montagem dos engenhos por parte dos colonos (MARQUESE, 2006). Na realidade, artesãos de qualquer tipo e técnicos experientes na fabricação da cana-de-açúcar e seus derivados eram um tanto raros, como caros no século XVI (SCHWARTZ, 1988, p. 37).

Ao final do século XVI, o Engenho São Jorge dos Erasmos produzia quinze toneladas de açúcar, por outro lado, os engenhos do nordeste, mesmo com uma capacidade limitada, conseguiram aumentar o nível de produção, mediante o aumento das terras cultivadas, o aperfeiçoamento da administração, maior produtividade dos trabalhadores, financiamentos de investidores europeus, bem como utilizando os lucros gerados pelas produções anteriores (SCHWARTZ, 1988, p. 36).

Os lucros auferidos no final do século XVI podiam ser reinvestidos, visto que faltava oportunidade de gastar ou consumir, e, segundo Furtado (2005), era improvável que os colonos portugueses “isolados em seus engenhos e alheios a qualquer forma de convivência urbana, lograssem efetuar gastos de consumo”. Tal hipótese pode ser elucidada a partir de dados de arquivos holandeses datados de 1639, os quais mostram que a exportação de açúcar pelo ‘Brasil holandês’ naquele ano teria sido de aproximadamente 1,2 milhão de libras, das quais o autor estimou que, retirando os gastos de consumo, ainda permaneceriam 600 mil libras com os senhores de engenho, que capitalizados, justificariam a multiplicação em dez vezes da produção no último quarto do século XVI (FURTADO, 2005, p. 53).

Nos séculos XVI e XVII, o açúcar era comercializado originalmente na forma de rapadura. O caldo era concentrado e a massa cristalizada era colocada, ainda em alta temperatura, em formas cônicas de argila, de barro ou de madeira, nas quais finalizava o processo de cristalização. O açúcar, já cristalizado em forma de torrão cônico e de cor escura, era armazenado. A estes torrões de açúcar deram-se o nome de ‘pães de açúcar’. Por conta do formato similar, um dos mais famosos cartões postais da cidade do Rio de Janeiro, foi chamado de ‘Pão de Açúcar’ (CRUZ; CORTEZ, 2016).

Após cinquenta anos da introdução da cana-de-açúcar no Brasil, o país tornou-se o maior produtor mundial de açúcar, enquanto Portugal e Holanda, que o comercializavam, obtinham grandes lucros (MACHADO, 2003). Porém, apenas no século XVIII, como consequência do crescimento da produção e do comércio mundial da cana-de-açúcar, o açúcar atingiu um público mais amplo, passando a adoçar o chá, o café e o chocolate, que se tornaram produtos de uso comum (BARBALHO, 1984).

No tocante à exportação, o Brasil teve o açúcar como principal item durante os séculos XVI a meados de XIX e, mesmo durante a corrida do ouro acontecida no século XVIII,

em que o país *abarrota os cofres da Europa com esse metal*, o valor obtido com as exportações do produto superava o de qualquer outro item exportado pela colônia portuguesa na América. Ao tempo que se seguiu houve tanto bons como maus períodos, sempre se relacionando ao mercado internacional e aos padrões políticos e econômicos vigentes (SCHWARTZ, 1988, p. 144).

No início do século XIX, em 1806, a Inglaterra promoveu um bloqueio continental, impedindo a entrada do açúcar de cana na Europa. A partir do problema, Napoleão Bonaparte estimulou a produção de açúcar de beterraba. Nessa época surgem importantes tecnologias implantadas na produção do açúcar, conforme as palavras de Machado (2003, p. 04):

Por outro lado, em plena revolução industrial, o uso do motor a vapor acionando as moendas construídas em aço por John Stewart em 1770, [...] [entre outros,] [...] possibilitaram às novas indústrias tanto de beterraba, como de cana, um novo patamar tecnológico de produção e eficiência, impossível de ser atingido pelos engenhos de açúcar de cana tradicionais, baseados em moendas de madeira movidas por animais ou rodas d'água, tachos de cozimento abertos, aquecidos a fogo direto e purga de méis por gravidade.

Em 1857, o quadro havia mudado. O Brasil se encontrava em posição muito ruim em relação à produção de açúcar e *somente* participava da fatia de 5% da produção mundial. O declínio na produção foi em razão da concorrência do Caribe e Antilhas, através dos holandeses, franceses e ingleses; pelo desenvolvimento do açúcar de beterraba; e pelo declínio do modelo de produção escravocrata. Por esse motivo, D. Pedro II promoveu a elaboração de um conjunto de estratégias visando tornar o Brasil novamente competitivo, na produção do açúcar. Assim, foram criados o Instituto Agrônomo (IAC), inspirado pelo êxito das pesquisas norte-americanas e os Engenhos Centrais, com função de moer a cana e processar o açúcar, ficando o cultivo por conta de fornecedores. Ao todo, doze Engenhos Centrais foram implantados. Na virada do século XIX, Piracicaba, cuja região possuía três Engenhos Centrais, rapidamente se tornou o maior centro produtor de açúcar do estado de São Paulo, mas a estratégia não conseguiu fazer frente ao açúcar de beterraba que, em 1900, era responsável por 50% da produção mundial (CRUZ e CORTEZ, 2016; MACHADO, 2003).

Foi na primeira guerra mundial em 1914, com a devastação da indústria de açúcar europeia, que houve espaço para o crescimento da indústria nacional ligada ao setor,

incentivada pelos altos preços do açúcar. A produção nordestina adicionada à de Campos dos Goytacazes, no norte fluminense, e o acelerado crescimento das usinas paulistas indicavam para um risco da superprodução, o que levou o governo brasileiro a controlar o setor, mediante a criação, em 1933, do IAA - Instituto do Açúcar e do Alcool que teve por objetivo orientar, fomentar, organizar, estudar e controlar a produção de açúcar e álcool e de suas matérias-primas, além de regulamentar o setor em todo o território nacional (BRASIL, 1933).

O etanol, no contexto brasileiro, tem raízes antigas, com a formação da Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (BRASIL, 1921) e foi o marco inicial do programa de experimentação sobre a utilização do etanol puro como combustível para os motores no Brasil. Os trabalhos de pesquisa, ali desenvolvidos, permitiram que no ano de 1923, ocorresse a 1ª experiência envolvendo um veículo Ford movido a etanol hidratado, ao participar de tradicionais corridas de automóvel realizadas pelo Automóvel Clube do Brasil (BNDES e CGEE, 2008; CORREIA, 2007).

O controle da produção ocorria por meio de cotas determinadas pelo IAA, que concedia a cada usina uma parcela de cana-de-açúcar a ser moída, como também o açúcar e o etanol a serem fabricados. A obtenção de novos equipamentos ou a alteração dos existentes também necessitavam de autorização do IAA (BRASIL, 1933; BRASIL, 1933a). No início da década de 50, São Paulo ultrapassou a produção do Nordeste, devido ao aceite do aumento de cotas solicitado ao IAA, quebrando uma hegemonia de mais de 400 anos.

As seguidas modificações na cotação do mercado internacional do açúcar, assim como o uso de equipamentos defasados impulsionaram transformações, como novas tecnologias importadas da Austrália e África do Sul.

O etanol anidro teve seu uso como combustível, em quantidades significativas, com o objetivo de misturá-lo à gasolina importada, a partir de 1931, inicialmente em uma proporção de 5% v/v (volume por volume). Como a variação da proporção poderia ser arbitrada, ao longo dos anos, possibilitou ao governo utilizar o etanol como um regulador de preços do mercado externo para seus derivados, chegando a mistura de 25% em 1966 (RICO, 2007; SANTOS, VALLE, GIANNINI, 2000).

O preço do petróleo em 1973 subiu para patamares bastante superiores à sua média histórica. Para Abreu *et al.* (1995), o choque do preço internacional do petróleo ocorreu

devido ao déficit de oferta, e em consequência, atingiu valores altíssimos para época. O aumento dos preços do petróleo foi a principal razão para que a mudança de fonte de energia tornasse prioridade política, o que levou a um programa federal conhecido como PROÁLCOOL, onde foram dados novos estímulos à produção do etanol oriundo da cana-de-açúcar.

2.4.2 Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar e seus Elos

A cadeia de Suprimentos da cana-de-açúcar é um conjunto complexo: fornecedores de matéria-prima e de bens de capital os quais abastecem as usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade que são produzidos e vendidos para indústria de alimentos, para exportadores, para distribuidores de combustíveis, para distribuidores de energia elétrica através de leilões da EPE/ANEEL, além de uma gama de indústrias correlatas, como a indústria farmacêutica, indústrias de transformação e refinarias de açúcar. Uma representação *concisa* da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar pode ser configurada com os seguintes elos: agrícola, industrial, distribuição e consumidor (veja Figura 08). Neste trabalho restringe-se a descrição dos dois primeiros elos.

Figura 08 - Cadeia de Suprimentos simplificada da Cana-de-Açúcar

Fonte: o autor

2.4.3 Elo Agrícola

A cana-de-açúcar é considerada uma cultura semi-perene. Em média, se faz cinco cortes antes de ser replantada em um novo ciclo. Neste elo, para a produção da cana-de-açúcar, pôde-se identificar na literatura o macroprocesso simplificado, dividida em seis etapas denominadas: preparo do solo, plantio, tratos culturais da cana planta, tratos culturais da cana soca, colheita e transporte. As seis etapas do macroprocesso simplificado de produção de cana-de-açúcar podem ser vistas na Figura 09:

Figura 09 - Macroprocesso simplificado de produção de Cana-de-Açúcar

Fonte: o autor

2.4.3.1 Preparo do Solo

A etapa de preparo de solo consiste nas seguintes atividades: erradicação de ervas daninhas, gradagem, subsolagem, terraceamento, construção e/ou manutenção de carreadores⁶, aplicação de corretivos ao solo, atividades de apoio, entre outros. O preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar é relativamente profundo se comparado a outras culturas, como soja, milho e feijão, o que torna essa operação na cultura ligeiramente mais onerosa que as citadas (MARQUES, 2009).

De forma geral, as operações de preparo de solo são essencialmente mecanizadas, com o uso de tratores e elevado consumo de diesel. É pouco intensiva em uso de mão de obra manual e, quando há uso desse expediente, relacionam-se em sua maior parte à amostragem de solos e levantamento topográfico (NASTARI, 2014).

As operações realizadas nesta etapa não apresentam um mesmo padrão para todos os produtores, devido a fatores locais: condições e declividade do terreno, tipo de solo, regime de chuvas, disponibilidade de máquinas e implementos e se são áreas de expansão ou renovação do canavial (MARQUES, 2009).

O preparo do solo tem um elevado custo quando acontece sobre uma área de expansão, principalmente sobre área de pastagem. Quando a expansão está sendo realizada sobre áreas de pastagens, a infraestrutura deve ser constituída, gerando maiores desembolsos para a estruturação de vias e sistematização do terreno, além de utilizar quantidades maiores de insumos para a correção do solo. Quando a expansão do canavial é feita sobre áreas de outras grandes culturas, como soja ou milho, a sistematização e uma parte da infraestrutura do terreno já foi feita (FELTRAN-BARBIERI, 2009; FRANCO, 2011; NASTARI, 2014).

⁶São áreas de escoamento de cultivo. Na cana-de-açúcar, geralmente apresentam suas superfícies sem cobertura vegetal, pois servem como via de acesso entre os talhões e têm papel de aceiros, evitando que haja propagação das chamas em caso de fogo (SCARPINELLA; MIRANDA; MAUAD, 2013).

A diferença no rendimento operacional no preparo do solo leva a uma diferença de custo, tornando-a mais ou menos competitiva em relação a outras regiões. Essa diferença está associada, principalmente, às características dos solos, se são mais ou menos compactados e ao chamado ‘tiro da máquina’. Em áreas mais extensas e contínuas, o rendimento operacional é maior, com redução no número de manobras. Essas características afetam o tempo para fazer uma mesma operação, levando a alterações de custos. O preço da hora máquina trabalhada, a inclinação nos terrenos, a diferença na quantidade de aplicação dos corretivos ao solo, além de preço de frete distintos complementam outras diferenças que afetam o custo na etapa de preparação do solo (NASTARI, 2014).

2.4.3.2 Plantio

A fase do plantio é constituída das seguintes atividades: sulcação, distribuição de torta de filtro e adubação, distribuição de mudas de modo manual e/ou mecanizado, cobrimento de mudas, além de fiscalização de campo, auditoria de plantio e estruturas de apoio. Essa etapa é realizada com o auxílio de equipamentos e implementos específicos. A distribuição de mudas é feita de maneira semimecanizada, na maioria dos casos, mas a mecanização total tem avançado nos últimos anos. O plantio é considerado uma operação dispendiosa, visto que apresenta um insumo de elevado custo: a muda e em muitos casos, o uso intensivo de mão de obra (PAULI, 2009).

Quanto ao plantio mecanizado existe ressalvas apontadas na literatura, como certas deficiências das máquinas e seu manuseio, pela compactação do solo, pela perda de mudas, bem como, a falta de treinamentos, por parte das usinas, para seus funcionários.

O plantio pode acontecer em três épocas diferentes do ano, em diferentes sistemas: sistema de ano-e-meio, sistema de ano e plantio de inverno. No sistema de ano-e-meio ou cana de 18 meses, o plantio acontece no período entre janeiro e março. Esse período é considerado o mais adequado por apresentar condições de temperatura e umidade apropriados para seu desenvolvimento. A produtividade tende a ser alta, principalmente, no primeiro corte.

No sistema de ano, o plantio acontece em outubro ou novembro. O sistema de ano ou 12 meses é utilizado, normalmente, quando se tem grandes áreas, uma vez que uma segunda época de plantio facilita o gerenciamento e otimiza a utilização de mão de obra mecanizada e manual entre os períodos de plantio. Nesse sistema, apresenta produtividade pequena na primeira colheita, mesmo sem problemas de má brotação.

No plantio de inverno, a cana é plantada entre junho e julho com a utilização de torta de filtro e/ou vinhaça. A grande quantidade de umidade auxilia a brotação em um período de estiagem. Nesse tipo de plantio, também é utilizado sistema de irrigação complementar e apresenta produtividade menor do que da cana de ano e meio (DUFT, 2014; ROSSETTO; SANTIAGO, 2017; SILVA e SILVA, 2012). No caso da região Centro-Sul, o plantio é realizado, geralmente, no sistema de 18 meses, ou plantio de inverno. A região Nordeste, por sua vez, é caracterizada pela prevalência do plantio de 12 meses (SEGATO; PINTO; JENDIROBA, 2006).

A Tabela 01, procura ilustrar o *decaimento de produtividade* para a cana de 18 e 12 meses a cada ciclo, do primeiro ao quinto corte. O primeiro corte é feito em 18 ou 12 meses após o plantio, onde se colhe a cana planta. Os demais cortes se colhem a cana soca e são realizados uma vez ao ano. A média de produtividade é calculada somando a média ponderada para os dois tipos de plantio (106 tc/ha) mais a produtividade para os demais cortes, tendo por resultado a média de 5 cortes em 82,4 tc/ha. Os dados foram baseados nas médias das safras de 1998/99 a 2002/03 (SEABRA *apud* MACEDO *et al.* 2004). Os dados são antigos, porém, mantêm sua atualidade, já que na safra de 2014 a produtividade média alcançou o patamar de 76 tc/ha (MAPA, 2015).

Ciclo de Cortes	Dcaimento de Produtividade
1º Cana-planta (18 meses)	113 (80%)
1º Cana-planta (12 meses)	77 (20%) (média 106 tc/ha)
2º - 1ª soca	90
3º - 2ª soca	78
4º - 3ª soca	71
5º - 4ª soca	62
Média de 5 cortes	82,4 (toneladas de cana por hectare – tc/ha)

Tabela 01 – Decaimento de Produtividade entre os Sistemas de 12 e 18 meses do 1º ao 5º corte

Fonte: Seabra (2008) *apud* Macedo *et al.* (2004)

A variação de custo dessa etapa pode ser explicada por uma série de fatores. Por exemplo, a menor longevidade do canavial pode ser devida a elevada infestação de pragas, tornando o canavial mais frágil e menos eficiente na absorção dos nutrientes, distorções no regime de chuva com impacto na compactação do solo e aumento no nível de falhas do canavial. Diferentes índices de mecanização no plantio utilizados, e diferentes quantidades de uso de insumos e a variação no custo de aquisição de mudas são, também, fatores que justificam variações de custo com insumos. Outro fator que é observado de forma decisiva nos custos do plantio foram o transporte de mudas, replantio e manutenção de áreas erodidas (NASTARI, 2014; SILVA e SILVA, 2012).

2.4.3.3 Tratos Culturais da Cana Planta

O objetivo dos tratos culturais da cana planta⁷ é a de proporcionar melhores condições para o desenvolvimento do canavial. Nessa etapa estão contidas as atividades como: quebra de sulco; conservação dos carregadores; aplicação de adubos, de defensivos, de herbicidas e de corretivos; capinas manuais, mecânica e química; irrigação; monitoramento de pragas, além de estruturas de apoio (SILVA e SILVA, 2012; TOWNSEND, 2000).

Os tratos culturais da cana planta caracterizaram-se por apresentar relativa variabilidade de custos entre as regiões, associada, principalmente, ao uso de insumos nos tratos e do grau de uso de mão de obra, sobretudo para realização de capinas químicas ou manuais, por exemplo, pela maior necessidade de monitoramento e gastos com o controle de pragas. O uso intensivo de inseticidas em uma região, normalmente, está associado ao elevado nível de infestação. Em alguns casos, são necessárias entre duas ou três aplicações de inseticida para controle mais eficaz da praga (NASTARI, 2014).

⁷ “A cana-de-açúcar, uma vez plantada, permanecerá produzindo durante quatro ou cinco anos consecutivamente, quando então a produtividade diminui muito e é feita a reforma do canavial. A cana-de-açúcar de primeiro corte é chamada de ‘cana planta’, a de segundo corte ‘cana soca’ e de terceiro corte em diante ‘ressoca’ ” (UDOP, 2012).

2.4.3.4 Tratos Culturais da Cana Soca

O comportamento semi-perene de desenvolvimento dos canaviais faz com que após a colheita possa sobrar pedaços de raiz, chamada de soqueira, que geralmente hospeda pragas e patógenos que podem contaminar cultivos posteriores. A etapa de trato da raiz ou soqueira não é, exclusivamente, a retirada dessas raízes; ela consiste nas seguintes atividades: enleiramento do palhicho⁸, cultivo e adubação de soqueiras, aplicação de herbicidas, inseticidas, nematicidas, combate às formigas, aplicações de corretivos, aplicação de maturadores e estruturas de apoio. Os tratos culturais de soqueira envolvem operações de manutenção do canavial após sua formação, que além da aplicação de insumos, defensivos e corretivos, existe a necessidade da manutenção de carregadores e curvas de nível (MILLER, 2017).

Em algumas regiões, os tratos culturais são mais intensivos em uso de mão de obra e insumos, tornando-se mais dispendiosos em relação aos demais, devido, por exemplo, a incidência de pragas. Em razão do uso de equipamentos mecanizados, o uso de mão de obra é reduzido; em algumas regiões, o uso de mão de obra manual é limitado, nesta etapa agrícola, para atividades manuais de capinas e monitoramentos de pragas. Em São Paulo, por exemplo, existe um custo mais elevado com mão de obra devido aos motivos acima relacionados, como maior incidência de pragas (NASTARI, 2014).

2.4.3.5 Colheita

A colheita pode ser feita através de três sistemas. O sistema manual, onde se emprega a mão de obra manual para o corte e carregamento. Esse sistema foi usual na região Nordeste do Brasil, contudo, em razão da legislação, o carregamento manual tornou-se proibido, sendo comum a utilização de animais para a tarefa. No sistema semimecanizado, o corte é manual e o carregamento é mecanizado e foi o mais comumente utilizado no Brasil, utilizado por produtores autônomos de capital insuficiente para aquisição das colheitadeiras mecanizadas e devido a terrenos com alta declividade. Nos sistemas mecanizados, a cana é cortada e carregada por máquinas, sem a utilização direta da mão

⁸ Parte do processo da elaboração e recolhimento da palha que formará o feno.

de obra manual. O índice de colheita mecanizada variou 85,7% a 99,5% na safra de 2016/17, em algumas regiões paulistas (TAVARES, 2017).

A mecanização na colheita da cana-de-açúcar no Brasil iniciou-se em 1956, com a importação e testes de máquinas vindas da Austrália. Com a implantação do PROÁLCOOL, em 1975, o seu uso começou a se tornar menos incomum. Somente com as restrições impostas à colheita com uso de mão de obra manual pela legislação, em 2007, o setor começou a intensificar seu uso.

No estado de São Paulo foi feito um acordo onde era preciso realizar a colheita de maneira mecanizada, estabelecendo o prazo de até 2014; e onde não existe a tecnologia apropriada, o prazo de até 2017, para eliminação da prática da queima (BRASIL, 2012).

Ressalta-se que o corte de cana-de-açúcar feito por uma colheitadeira é equivalente ao trabalho de 80 a 100 homens e emprega outros 25 homens em sua operação, manutenção e demais profissionais envolvidos, com salários maiores, gerando um impacto positivo (TAVARES, 2017).

O corte manual sem a queima é considerado inviável pela produtividade baixa e os riscos de acidente do trabalhador (NYKO *et al.*, 2013). De fato, Nastari (2004) aponta a diferença do rendimento da colheita realizada através de mão de obra manual, com o uso de queimada ou não. O volume de colheita manual sem queimada é 60% inferior. Moraes (2007) aponta que mudanças no processo produtivo na cadeia de cana-de-açúcar trouxeram impactos importantes no mercado de trabalho. A adoção da mecanização da colheita da cana-de-açúcar reduziu a demanda por trabalhadores.

Ressalta-se o valor do corte manual em áreas de alta declividade, áreas que não permitem a atividade de colheitadeiras. O corte realizado de maneira manual, envolve problemas ergonômicos que podem afastar a mão de obra e gerar rivalidades entre produtores e cortadores. Já no corte mecanizado existe perdas importantes, como um corte relativamente alto da cana em relação ao solo, onde se localiza a maior quantidade de açúcar, além da contaminação da cana com terra e impurezas minerais (CGEE, 2009).

No caso da região centro-sul brasileira, a colheita, normalmente, se inicia em maio até o mês de novembro. Na região Nordeste, inicia-se, geralmente, em setembro até ser concluída em março do próximo ano (RIPOLI *et al.*, 2011). O período de colheita e

moagem da cana é delimitado por três condições relativos ao clima seco. O canavial tem seu teor de sacarose aumentado devido ao *stress* hídrico causado pela menor quantidade de água, além disso, manifesta menor risco de causar danos como a compactação do solo e as soqueiras, devido ao deslocamento das máquinas. A colheita em estação chuvosa, aumenta a quantidade de impurezas minerais que chega à usina, causando desgaste e perda da eficiência industrial (BARBOSA DA SILVA, 2012).

2.4.3.6 Transporte

O transporte da cana-de-açúcar do campo para as fábricas é realizado fundamentalmente através do uso de caminhões, uma vez que este tipo se apresenta mais apropriado para as características de distâncias, volumes, agilidade, confiabilidade e periodicidade demandada. Há grande diversidade de conjuntos rodoviários utilizados para o transporte. Suas capacidades variam desde 8 a 60 toneladas de cana-de-açúcar por viagem. O transporte da cana até a usina é um fator de relevância não só pela perda de qualidade durante a operação, mas também no que se refere ao seu custo. O tipo de logística adotado e o raio médio impactam nos custos (BARBOSA DA SILVA, 2012; RAMOS, RÔMULO PIMENTEL, 2010).

O tipo e as dimensões das carroçarias para acomodação da cana-de-açúcar podem variar em função do tipo de cana, da maneira como pode ser carregada, da distância do campo de produção à usina, das condições de tráfego e dos custos de cada tipo de transporte. As composições de transporte da cana-de-açúcar mais utilizadas são apresentadas na Figura 10. As mais comuns são o *Truck*, o Romeu e Julieta, o Treminhão e o Rodotrem (RAMOS DA SILVA; ALVES; COSTA, 2011).

Figura 10 - Composições de Transporte mais usuais para a Cana-de-Açúcar

Fonte: Ramos da Silva, Alves, Costa (2011)

Dados de 2013 apontam que 58% do açúcar exportado da região Centro-Sul é levado aos portos por transporte rodoviário e os outros 42% por meio de redes ferroviárias. No que tange ao etanol aproximadamente 95% é exportado pelo modal rodoviário e 5% por meio ferroviário (NEVES *et al.*, 2014).

2.4.4 Elo Industrial

A Figura 11 expõe um processo simplificado representativo das etapas do processamento industrial da cana-de-açúcar para a produção de açúcar, etanol e eletricidade. A recepção, limpeza, preparo da cana, moagem, tratamento do caldo e filtração englobam as etapas comuns ao processamento industrial da produção, tanto do açúcar como de etanol e da eletricidade; deste modo, uma maneira de visualizar o processo pode ser construída subdividindo-o sob a ótica do produto:

- (a) o açúcar, composto pelas etapas de evaporação, cozimento e centrifugação;
- (b) o etanol, pela fermentação, destilação, retificação e desidratação;
- (c) a eletricidade pelas caldeiras e geradores.

Figura 11 - Processo simplificado de produção de Açúcar, Etanol e Eletricidade em uma Usina de Cana-de-Açúcar

Fonte: o autor

2.4.4.1 Etapas Comuns do Processamento da Cana-de-Açúcar

2.4.4.1.1 Recepção, Limpeza e Preparo da cana

O processo industrial começa com a recepção da cana. Os caminhões com a cana-de-açúcar são pesados antes e depois do descarregamento. Após pesada, a cana-de-açúcar é examinada para definir a quantidade de ATR (Açúcar Total Recuperável) disponível. O exame é realizado para a retirada de três amostras de cana em locais diferentes, definidos aleatoriamente.

O exame para a definição do ATR é utilizado para o pagamento e controle dos processos industriais posteriores. Ao receber a cana, é comum a presença de impurezas minerais e vegetais, como terra, folhas e outros sedimentos. Nas usinas brasileiras é comum duas formas de limpeza, quando acontece a queima normalmente é feito uma lavagem com água e quando o processo de colheita é feito por máquinas é comumente utilizado um sistema de limpeza a seco, com peneiras vibratórias e vento, o qual minora a perda de

açúcares em relação ao processo de lavagem com água. A cana limpa é então dirigida a uma esteira, na qual atravessa um conjunto de facas niveladoras, picadores, sucedido por desfibrador (MARQUES, 2009; PICHINELLI, 2013).

2.4.4.1.2 Moagem ou Extração do Caldo

O processo de extração constitui-se na separação física do caldo da cana de sua fibra, o bagaço, sendo este processo, normalmente, executado através da moagem. O processo baseia-se na extração do caldo através de fricção mecânica e combina a pressão mecânica à embebição com água. A cana-de-açúcar é lavada e desfiada em pequenos pedaços de 20-25cm. Onde são alimentadas e extraídas por um conjunto de moinhos obtendo uma combinação de suco e bagaço. O principal objetivo do processo de moagem é extrair a maior quantidade possível de sacarose. O secundário, é a produção de bagaço com baixa umidade para alimentar as caldeiras. O bagaço resultante do processo de moagem é direcionado para um depósito, para ser utilizado na queima no processo de produção de vapor, nas caldeiras. Destaca-se que no processo de extração ocorre uma redução de açúcares pois permanecem fixos no bagaço. É também normal a ocorrência de perdas por conta da decomposição do ATR por micro-organismos ou eventuais vazamentos (MARQUES, 2009; PICHINELLI, 2013).

2.4.4.1.3 Tratamento do Caldo

O caldo extraído da cana-de-açúcar traz quantidade significativa de resíduos, como sólidos, impurezas orgânicas e minerais, entre outros. Por isso, é parte do processo, uma filtragem, além de outros tratamentos físicos e químicos, os mais importantes são: o aquecimento, sulfitação, calagem, flasheamento e decantação (CEBALLOS-SCHIAVONE, 2009; MARQUES, 2009).

2.4.4.1.4 Filtração e Torta de Filtro

A torta de filtro é um subproduto do processamento industrial da cana proveniente da filtração do caldo extraído das moendas no filtro rotativo. A torta de filtro é rica em

fósforo, nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, matéria orgânica e umidade, o qual é importante para assegurar a brotação da cana em plantios realizados no inverno nas regiões Sul e Sudeste. A torta de filtro tem seus valores nutricionais conhecidos desde a década de 1950. Sua utilização inicial ocorreu na década de 1970 e se intensificou a partir da década de 1999, quando a mudança cambial e a elevação dos preços dos fertilizantes químicos encareceram a adubação (ROSSETTO; SANTIAGO, 2017a).

2.4.4.2 Produção de Etanol em uma Usina de Cana-de-Açúcar (A)

2.4.4.2.1 Fermentação

A fermentação é uma etapa complexa e indispensável para a fabricação do etanol. Nessa etapa acontece a conversão dos açúcares em etanol, por intermédio das leveduras. É garantido que sejam proporcionadas boas condições de controle de contaminação microbiana, temperatura e concentração de açúcares para a fermentação. É no processo de fermentação que ocorre a maior perda industrial da produção de etanol (CEBALLOS-SCHIAVONE, 2009; STEINLE, 2013).

2.4.4.2.2 Destilação e Desidratação

A etapa de destilação possui o objetivo de separar o etanol de outros elementos. O etanol possui o ponto de ebulição abaixo dos demais elementos da mistura aquosa, evaporando, portanto, com maior rapidez. No entanto, o etanol leva consigo fração significativa de água o qual também é evaporada. No processo de destilação nas usinas se emprega uma sucessão de destilações parciais que aumentam gradativamente a porcentagem de etanol. No Brasil, o ponto definido para o álcool etílico hidratado carburante (AEHC) é próximo de 93% de concentração da massa do álcool etílico na massa da mistura total.

Nesta etapa a vinhaça é produzida. Ela se constitui em um resíduo líquido de cor escura que é removida das colunas de destilação. É gerado em uma proporção média de 12-15 L por cada litro de etanol produzido, sendo rica em vários nutrientes minerais essenciais para o crescimento das plantas (DOS SANTOS *et al.*, 2013).

Outro processo de desidratação que tem sido empregado é a peneira molecular. Nesse processo o etanol é vaporizado e enviado às colunas de desidratação, que contém em seu interior uma sucessão de elementos revestidos de minerais zeólitos⁹, que possuem características porosas e assim realizam o processo físico semelhante ao peneiramento (MARQUES, 2009; VASCONCELOS; BARRETO; COÊLHO, 2009). Para se obter o álcool anidro deve-se prosseguir com uma segunda fase de desidratação. As técnicas mais empregadas para sua obtenção são a destilação azeotrópica e a destilação extrativa, com crescimento do uso de peneiras moleculares (FONSECA, 2011).

2.4.4.3 Produção de Açúcar em uma Usina de Cana-de-Açúcar (B)

2.4.4.3.1 Evaporação, Cozimento, Centrifugação e Secagem

Na etapa de evaporação é observado a perdas de açúcares devido à altas temperaturas. Posteriormente ao processo de evaporação, o caldo passa a ser chamado de xarope. Para a obtenção do açúcar, é necessário se passar pelas fases de cozimento, centrifugação e secagem. O calor é proveniente da introdução de vapor de baixa pressão. Nos cristalizadores ocorrem o arrefecimento lento do xarope e a sequente formação de cristais. A massa resfriada vai para as centrífugas, onde é realizada a lavagem do açúcar com água quente para otimizar o processo. Então é feita a secagem e acondicionamento do açúcar. (CTC, 2009; DAL BEM; KOIKE; PASSARINI, 2006; PICHINELLI, 2013).

2.4.4.4 Produção de Bioeletricidade em uma Usina de Cana-de-Açúcar (C)

A bioeletricidade é uma opção de produção de energia renovável no cultivo da cana-de-açúcar, produzida a partir de resíduos que, muitas vezes, têm sido subutilizados no Brasil

⁹ **Zeólita:** “é um mineral que possui origem sedimentar vulcânica [...] A utilização de zeólita natural tem sido confirmada como prática importante em controle ambiental de resíduos industriais. [...] é amplamente utilizada em tratamento de efluentes com teor de metais pesados e apresenta mais de uma propriedade química como característica. Têm elevada área superficial e volume de poros, por possuírem estrutura cristalina tridimensional infinita, com cavidades que podem ser ocupados por íons e moléculas de água com grande liberdade de movimento” (CELTA, 2012).

e em outros grandes países produtores. O bagaço e a palha, juntos, são responsáveis por dois terços da energia disponível na plantação de cana-de-açúcar.

Em 2014, aproximadamente, 40% das usinas venderam energia elétrica à rede através de seus excedentes de bioeletricidade. As demais, podem ser consideradas carentes de modernização, necessitando de *retrofits brownfields*, *greenfields* para aumentar a eficiência energética. Seus processos industriais de geração de energia, para venda à rede, carecem de caldeiras de maior pressão e temperatura. Podemos ressaltar, ainda, que atualmente, *todas* geram energia para seu próprio consumo (NEVES *et al.*, 2014).

Houve uma evolução na oferta ao Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) de bioeletricidade de 126 MW em 2005, para 1.720 MW em 2013. Esta quantidade de energia é equivalente a 7% da água nos reservatórios das regiões Sudeste/Centro-Oeste, e aproximadamente atenderia oito milhões de residências em um ano. O montante financeiro calculado com a venda de bioeletricidade atingiu US\$ 894 milhões na safra 2013/2014 (NEVES *et al.*, 2014).

2.4.4.4.1 Uso do Bagaço de Cana-de-Açúcar

O bagaço de cana, um dos principais subprodutos do processamento de cana, é utilizado como combustível em sistemas de cogeração, que fornecem vapor e energia elétrica para abastecer o processo de produção de bioetanol e açúcar (DIAS *et al.*, 2010). Uma média de 280 kg de bagaço, com 50% de umidade, é produzido com uma tonelada de cana.

A época de colheita da cana-de-açúcar, durante o qual maior parte da biomassa é formada, corresponde à estação seca no centro-sul do país, na ocasião em que as usinas hidrelétricas reduzem sua geração devido à baixa dos reservatórios. Observa-se assim, uma complementaridade importante entre as fontes hídricas e térmicas de biomassa de eletricidade (MAFRA *et al.*, 2017).

O bagaço pode ter uso alternativo na agropecuária como forma de volumoso suplementar para a época de estiagem. Deve-se considerar as suas limitações de uso, devido ao seu baixo valor nutricional (MEDINA; NATEL, 2011). A utilização na alimentação de ruminantes, depende da viabilidade técnica e econômica, pois o bagaço não pode estar a grandes distâncias de onde será consumido.

Outra utilidade possível para o bagaço e as folhas da cana-de-açúcar é seu uso em usinas de etanol de segunda geração. Ao utilizarem esses novos processos de hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos, que quebram as moléculas destas matérias-primas, podem-se aumentar a produtividade de etanol substancialmente. O principal problema é o alto custo das enzimas que não será rentável a menos que ocorra uma queda considerável do seu valor (ENSINAS *et al.*, 2013).

2.4.4.4.2 Cogeração, Caldeiras e Geradores

Os processos industriais nas usinas precisam de muita energia, tanto nas formas elétrica, mecânica e térmica. Quando é realizada uma geração simultânea, de energia térmica e mecânica, por exemplo, a partir de uma mesma fonte primária de combustível, como bagaço da cana, gás natural, resíduos de madeira, entre outros, temos a Cogeração.

A conversão da biomassa, nas usinas, em energia pode acontecer através de diversos sistemas, tendo como exemplo diferentes sistemas de cogeração que utilizam caldeiras, turbinas e geradores. A energia mecânica produzida pode ser empregada realizando trabalhos, como acionamentos de moendas ou transformada em energia elétrica, através do sistema de cogeração; a energia térmica normalmente é utilizada como fonte de calor para processos industriais (COELHO, 1999; SOUZA & AZEVEDO, 2006).

Na etapa de moagem, a entrada de cana-de-açúcar transforma-se em caldo e bagaço. O bagaço é direcionado às caldeiras e geradores ou ao chamado sistema de cogeração, onde é consumido. A quantidade de consumo de biomassa (como bagaço, palha, resíduos de madeira), varia de acordo com a eficiência da caldeira. Caldeiras mais eficientes consomem menos bagaço ou, da mesma maneira, caldeiras mais eficientes para uma mesma quantidade de bagaço produzem mais vapor. Por isso, sistemas de cogeração mais eficientes têm maior quantidade de energia disponível para exportar.

A maior parte da energia térmica e mecânica é direcionada de volta ao processo produtivo, enquanto que parte da energia elétrica é também consumida e o excedente é enviado a distribuição e/ou transmissão.

A tecnologia de cogeração mais utilizada no setor de cana-de-açúcar no Brasil é a chamada de ciclo *topping* a vapor, em contrapressão. Neste tipo de sistema a biomassa é queimada em caldeiras e a energia térmica derivada é utilizada para produção de vapor. O vapor alimenta as turbinas de acionamento mecânico e as turbinas de geração elétrica, e muitas vezes é utilizado para complementar as necessidades térmicas do processo produtivo (DANTAS FILHO, 2009).

O vapor de baixa pressão ou de escape é utilizado para a evaporação do caldo da cana, cozimentos e destilação como outros processos que necessitam de aquecimento. Enquanto que o vapor de alta pressão, que sai das caldeiras, é normalmente responsável pelo acionamento dos moedores, acionamento de picadores, desfibradores, bombas de captação de água (MARQUES, 2009), como também, pode ser utilizado para acionar uma turbina, que alimentará os geradores de energia elétrica.

A cogeração apresenta benefícios para o produtor, para o Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), bem como para o meio ambiente e consumidor. A propósito, Souza (2003) lista vantagens em comparação a outras formas, dentre estas: atende a sistemas isolados e descentralizados próximo à demanda; ocorre em períodos de estiagem, normalmente quando os reservatórios das usinas hidrelétricas estão em níveis baixos; emprega combustível de biomassa local e renovável; é relativamente menos prejudicial ao meio ambiente; e por último, utiliza e retém mão de obra em região agrícola.

2.4.4.4.3 Evolução das Caldeiras e Níveis Tecnológicos

Uma tonelada de cana-de-açúcar produz próximo de 280 kg de bagaço, da qual a combustão gera em torno de 450 kg a 500 kg de vapor, com uma caldeira de 21 bar de pressão e temperatura média de 300 °C.

A maioria das caldeiras existentes até o fim da década de 1970 produzia 50 Toneladas de Vapor Hora (TVH) a 21 bar de pressão, com 300°C de temperatura. Na década de 1980, a produção de vapor aumenta, com as primeiras caldeiras com produção de vapor acima de 100 TVH com a predominância da pressão de 21 bar.

As caldeiras de 100 bar de pressão atingem a faixa de 400 THV. Além disso, atingem 89% de eficiência em relação ao poder calorífico do bagaço, o que está diretamente ligado à capacidade de geração de vapor e energia elétrica (BEZERRA, 2013).

O Gráfico 01 evidencia o Consumo Específico¹⁰ (kg/kW) por pressões e temperaturas do vapor. Nota-se que ao decorrer de um uso mais intenso de pressão e temperatura o consumo específico diminui no processo.

Gráfico 01 - Consumo Específico x Pressão e Temperatura

Fonte: Marino (2013)

Complementarmente, na Figura 12, evolução do uso das caldeiras, é possível notar as mudanças tecnológicas apresentadas no decorrer das décadas:

- A partir da década de 70, houve a implantação de computadores nas linhas de produção fazendo o controle dos processos, o que permitiu ganhos, além de melhorias na padronização e na qualidade, reduzindo os custos de produção. Na época, havia necessidade de comprar energia uma vez que as usinas não eram autossuficientes.
- No início da década de 80, os painéis de controle pneumático foram substituídos por eletrônicos, além disto, um maior uso de caldeiras de 21 bar permitiu que as usinas deixassem de comprar energia da rede de distribuição.

¹⁰ Consumo específico de energia elétrica por quantidade de cana processada.

- Posteriormente, a partir de 1990, intensificou o uso de redes industriais com o uso de tecnologias como Controladores Lógicos Programáveis (PLC), conectando em redes de informação e controle. Foi o início de uma grande sobra de energia nas usinas, pela adoção de caldeiras de 65 bar, e o aparecimento da legislação específica para venda de energia na rede.
- Na década de 2010 foi a introdução da caldeira de 100 bar na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Figura 12 - Evolução do Uso das Caldeiras

Fonte: Adaptado de Perdoná (2013)

As tecnologias no setor industrial têm avançado ao longo do tempo, assim como a tecnologia de produção de vapor, dessa maneira, foi-se consagrando os padrões de caldeiras em torno de 21-22 bar, 42-45 bar, 60-68 bar, 80 bar, e 90-120 bar de pressão.

A cada elevação de padrão de caldeira tem ocorrido avanços importantes em melhorias de eficiências nas diversas etapas do processo produtivo, na redução de perdas, na elevação das sobras de bagaço para a comercialização ou para a geração de eletricidade, na elevação da quantidade de energia elétrica excedente produzida e vendida, e na elevação do montante faturado (MACEDO; NOGUEIRA, 2004 p. 16-20).

No elo industrial, existem usinas com diferentes configurações de produção, no que tanger a pressão e temperatura das caldeiras, bem como, os níveis de eficiências dos demais processos produtivos, que formam diferentes níveis tecnológicos, coexistindo entre si:

- a primeira estrutura é formada por usinas que produzem açúcar ou etanol e geram energia elétrica, mecânica e térmica *somente* para uso próprio. Nessa situação se encontram as usinas mais antigas, que operam caldeiras da ordem de 21 bar, consideradas, atualmente, de baixa eficiência e que não dispõem de sobra de bagaço em quantidade suficiente para gerar excedentes de energia elétrica;
- entretanto, a capacidade de exportar excedentes de energia elétrica é adquirida ao se fazer atualizações que possibilitem elevar a eficiência e a capacidade de produção de vapor para, por exemplo, sistemas de eficiência intermediários, como as caldeiras em torno de 45 bar.
- as usinas, mais modernas, operam suas unidades de geração de vapor em caldeiras entre 60 a 120 bar de pressão, e injetam os excedentes de energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional Interligado (SIN), sendo também comum nessas unidades, a produção compartilhada de etanol, açúcar, energia elétrica. Estas usinas apresentam alta eficiência.

Segundo Dantas Filho, em 2009, aponta que maior parte das usinas de São Paulo utiliza processos de baixo rendimento, já que a produção de energia não era uma preocupação importante à época de sua implantação (DANTAS FILHO, 2009). Levantamento do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) aponta que 39% das caldeiras dos principais

estados produtores têm mais de 30 anos e 70% estão há mais de 20 anos em operação (BEZERRA, 2013).

2.4.4.5 Atividades de Suporte (D)

2.4.4.5.1 Laboratórios, Oficinas e Estação de Tratamento de Água

As atividades de laboratórios e oficinas são classificadas como operações de suporte de materiais e serviços para as demais operações industriais. Os laboratórios fornecem serviços de medição da qualidade de matéria-prima e eficiência de vários processos. As oficinas e auxiliares são referentes às atividades de manutenção e reparos para outros processos produtivos. No laboratório da usina são realizadas as análises das amostras, as quais delimitam as eficiências dos processos industriais, da qualidade da cana-de-açúcar recebida até os produtos finais, afetando a formação dos custos industriais. Na estação de tratamento de água é feita a captação, tratamento para eliminação de impurezas e desmineralização para o uso nas caldeiras. Estas atividades estão ligadas ao suporte de todas as atividades da usina (MARQUES, 2009).

2.4.4.5.2 Suporte Administrativo

Marques (2009) aponta a presença dos gastos administrativos dentro dos custos operacionais de produção industrial tanto quanto agrícola. Estão inclusos os salários do pessoal administrativo, contador, materiais de escritório, seguros e manutenções de benfeitorias, contas diretas como luz, água, telefone, alimentação e serviços como médicos, odontológicos pagos aos funcionários, os quais são rateados por todo processo.

Nastari (2014) ressalta que muitos produtores não consideram os custos administrativos apropriáveis ao custo da cana. Produtores menores têm dificuldades em diluir os gastos fixos em uma produção menor de cana. Mesmo que o ganho de escala implique em redução do custo fixo em produtores maiores; já em produtores menores a estrutura administrativa é muitas vezes composta pelo proprietário e, quando existente, conta com poucos colaboradores. A estrutura dos diferentes produtores difere em grande grau.

2.4.5 Produtividade Agrícola da Cana-de-Açúcar

A produtividade agrícola da cana-de-açúcar exhibe uma grande variabilidade devido a muitos motivos: características da variedade plantada, da composição e quantidade do adubo aplicado, das propriedades do solo, da qualidade do manejo de pragas, da quantidade de água disponível, e das diferentes técnicas de plantio, de tratamentos culturais e de colheita adotada (CGEE, 2009).

A produtividade agrícola média avançou ao longo dos anos (Gráfico 01). Em 1975 estava próximo de 45 toneladas de cana por hectare (t/ha), na década de 2000 chegando mais de 80 t/ha. No entanto, o crescimento não vem sendo uniforme ao longo dos anos (MAPA, 2012; MAPA, 2015; NYKO *et al.*, 2013). Outros trabalhos, como Dal-Bianco *et al.* (2011), também demonstram que os ganhos de produtividade estão se tornando cada vez menos pronunciados, ou seja, há crescimento, mas seu ritmo é decrescente.

Há de se considerar que a cultura da cana-de-açúcar foi ao longo de muito tempo desenvolvida em áreas tradicionais, em geral de alta fertilidade, entretanto devido ao lançamento do PROÁLCOOL, além dessas áreas tradicionais foram acrescentadas novas áreas, que muitas vezes possuíam baixa fertilidade, bem como, outras características muito divergentes das tradicionais, mas, provavelmente, este não é o principal motivo.

A partir de 1975, foram divulgados mais de 900 artigos sobre os avanços científicos e tecnológicos que incrementaram a produção de 3.500 litros de etanol por hectare para mais de 6 mil litros por hectare (GOLDEMBERG, 2017). Os estudos mencionados mostram que o aumento da produtividade, de maneira geral, é o principal motor de redução de custos de produção para matérias-primas, contribuindo entre 65% a 85% para o declínio do custo total (WIT *et al.*, 2010).

Percebe-se que a produtividade está crescendo com oscilações devido a momentos de incerteza na economia. Por exemplo, quando o preço da gasolina não incentiva o uso do etanol, produtores diminuem o investimento em uma renovação adequada aos canaviais. Segundo Nyko *et al.* (2013) especialistas atribuem os problemas de produtividade agrícola da cana-de-açúcar a fatores conjunturais, como a adversidade climática e a renovação inadequada de canaviais. Com base em quase trinta entrevistas com especialistas, chegou-se à conclusão, no entanto, que também existem fatores estruturais, como o investimento no desenvolvimento tecnológico aquém do desejado, gerando

efeitos negativos sobre os resultados das tecnologias agrícolas e, consequentemente, sobre o próprio desempenho do setor. O Gráfico 02 mostra a evolução da produtividade em t/ha ao longo dos anos:

Gráfico 02 - Evolução da Produtividade em t/ha ao longo dos anos

Fonte: Mapa (2012, 2015)

2.4.6 Insumos

Nastari (2014) aponta que não foram identificadas políticas de incentivos fiscais ou diferenças muito acentuadas de preço entre as regiões com relação aos insumos, com ressalva, aos defensivos agrícolas, por conta do frete. Os insumos apresentam seus valores baseados no custo do ingrediente ativo e no transporte até a lavoura. O frete é um dos fatores que exerce significativo impacto nos preços, a grande distância entre algumas regiões e o local de uso, aumenta o valor final.

2.4.7 ATR e sua remuneração

O ATR (Açúcares Totais Recuperáveis) representa a quantidade total de açúcares da cana, o seu conhecimento do seu teor dentro da cana-de-açúcar é importante para avaliação da qualidade da matéria-prima. Os processos de queima da cana-de-açúcar, transporte da cana, bem como os atrasos no seu processamento provocam perdas significativas na

quantidade de sacarose por tonelada totais redutíveis de açúcar (TRS) que podem atingir cerca de 6-10kg (TRS), por tonelada de cana (RIPOLI *et al.*, 2011).

O pagamento da cana-de-açúcar pelo teor de sacarose (PCTS) se estabeleceu através do Ato nº 25, publicado no Diário Oficial da União, em 17 de agosto de 1982, que no ano-safra de 1983/84 que todas as usinas e destilarias, com mais de três anos de atividade, deveriam pagar a cana aos fornecedores pelo teor de sacarose. Até aquele momento o método de pagamento era através do peso. Ao chegar à unidade produtora a cana-de-açúcar era pesada e não se levava em consideração o teor de açúcar. Na Austrália e África do Sul, outras importantes áreas produtoras do mundo, já utilizavam o método para o pagamento ao produtor. O preço era melhor apenas para as canas mais ricas, isto é, para as que apresentassem Pol%Cana¹¹ superior a 12,257% e pureza do caldo acima de 83,87% (SACHS, 2007).

No ano de 1997 foi desenvolvido um novo sistema de pagamento da cana, que utilizou como base a quantidade e a qualidade da mesma, principalmente, através do ATR contido em uma tonelada de cana. Ainda hoje, a cana-de-açúcar é paga através do Sistema CONSECANA, desenvolvido pela UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar) e ORPLANA (Organização dos Plantadores de Cana do Centro-Sul do Brasil). Este sistema favoreceu a produtividade industrial, pois o maior teor de ATR possibilita redução de custos nas diversas etapas da fase agrícola e melhora a eficiência e produtividade dos processos internos da indústria, além de exigir dos produtores variedades de cana de melhor qualidade. O sistema, apesar de ser considerado complexo, tem o benefício de estimular a qualidade da cana entregue à indústria.

O peso da cana é medido por balanças aferidas por órgãos regulamentadores e inspecionadas por um representante da Associação dos Fornecedores de Cana, no ato da entrada, onde esses dados são coletados e estas informações são armazenadas em um banco de dados para que, posteriormente, efetue o pagamento. No ato da pesagem é colhida amostra representativa de cana-de-açúcar para que seja examinada a quantidade de Kg de ATR, como também, outras informações relevantes que qualificam a matéria-prima existente, como as impurezas vegetais e minerais. Para a precificação do Kg de ATR, o Sistema CONSECANA faz levantamento de todo o faturamento de açúcar e

¹¹ “Pol%Cana é o teor de sacarose contida na cana” (SACHS, 2007).

etanol no mês em exercício e, através de cálculos pré-definidos, chega-se ao valor do kg de ATR, que é publicado mensalmente da safra pela CONSECANA (USJ, 2017).

2.4.8 Tributos aplicáveis à cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar

Regazzini (2008) destaca três trabalhos que consideram a formação de preços e a tributação no setor, sendo os trabalhos de: Cavalcanti (2006), Palomino *et al.*, (2008) e Santos (2006). Os autores concluem que, por serem alimentos e combustíveis como principais bens finais que possuem um valor estratégico para a economia brasileira. Isso se traduz em regimes tributários especiais, uma vez que as tributações incidentes sobre o setor podem ser instrumentos de políticas alimentares, energéticas e ambientais, por parte do poder público, em suas três esferas.

A carga tributária potencial incidente sobre o álcool hidratado carburante e sobre o açúcar cristal empacotado apontam para um potencial de 23,04% do preço final do álcool hidratado e de 27,39% do preço final do açúcar cristal (REGAZZINI, 2008).

O que se apresenta na Figura 13 são os tributos que se incorporam nas parcelas em cada etapa até ao consumidor final. São cobrados os tributos na fazenda, na usina, na distribuidora, no posto ou supermercado obtendo-se a carga tributária que o consumidor paga ao comprar o produto final. O diagrama a seguir apresenta a incorporação de tributos ao preço final ao longo de sua cadeia produtiva.

Figura 13 - Evolução dos Impostos ao Consumidor

Fonte: adaptado de Regazzini (2008)

O trabalho de Joia; Fregonesi; Rezende (2011) evidenciam que a carga tributária da cadeia da cana-de-açúcar possui uma grande variação entre as empresas. Existem possíveis explicações para tal fato. O estudo (*ibid.*) demonstra que os produtos fabricados pelas usinas, tais como o açúcar e o etanol (hidratado, anidro, ou para outros fins), têm diferentes alíquotas nos vários tributos que incidem em seu faturamento. Como as demonstrações contábeis não evidenciam quais os produtos, em que porcentagem estão sendo vendidos e qual sua destinação (mercado interno ou mercado externo) para gerar a receita para a companhia, fica impraticável a evidenciar o motivo das variações.

Adiciona-se que as usinas, assim como toda empresa em geral, têm rentabilidades e lucros diferentes, o que afeta o IR – Imposto de Renda e a CSLL - Contribuição Social sobre o Lucro Líquido, alteração assim, que afeta sua carga total de tributos. Portanto, a carga tributária total da amostra de seu trabalho pode ser definida, mas cada empresa possui suas características próprias e, por conseguinte, existem muitas variações o que nos obriga a fazer generalizações.

Existem, também, questões relativas aos tributos incidentes a energia elétrica produzida pela usina de cana-de-açúcar, sendo aqui mencionado no trabalho, o TUST e o TUSD, que são as Tarifas de Uso dos Sistemas de Transmissão (TUST) e de Distribuição

(TUSD), que são incididas na produção e no consumo da energia comercializada, estabelecidas na Lei nº 9.427/96.

Em 2002, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, foi criado pela lei nº 10.438/2002 e teve como foco aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de eletricidade no país, tais como: energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. Os valores de tarifas para autoprodutores e concessionárias de distribuição são regulamentadas anualmente, definidas na Lei nº 9.427/1996. Nesse sentido, as Resoluções Normativas nº 77/2004, nº 567/2007 e nº 754/2016 esclarecem que os empreendimentos fazem jus a um percentual de cinquenta por cento de redução tarifária a ser aplicado às Tarifas de Uso dos Sistemas de Transmissão (TUST) e de Distribuição (TUSD), em empreendimentos com base em fonte de biomassa cuja potência injetada no sistema seja limitados a 50.000 kW.

2.5 Considerações sobre Custos e Margens na cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar

Durante a execução de recolhimento de dados deste trabalho, frequentemente foi observado que os custos na literatura superavam os preços de mercado, sendo razoável esperar que nesses casos o interesse dos produtores pela produção diminuísse gradativamente, com o abandono dessas atividades. A evidência de aumento de área plantada e volume de produção para cana-de-açúcar revelou, entretanto, que os produtores não estavam reduzindo a produção, nem mesmo abandonando certas atividades, em grau compatível com os níveis de custos e renda então apurados.

Ao apurar todos os elementos de custo no processo produtivo, tinha-se a expectativa que o preço de venda do produto se encontrasse em patamar próximo ao custo. Na hipótese que o custo seja maior que o preço, um exame aprofundado pode ser necessário para se avaliar até onde os fatores estariam sobrevalorizando o custo, distorcendo assim, o valor real, podendo chegar ao ponto de se perceber um prejuízo, onde na realidade não acontecia. É importante avaliar, adequadamente, as fontes de custos para decisão de se manter ou não em um negócio o qual se baseia no dinheiro dispendido nas despesas diretas desembolsadas. O produtor tem capacidade de arcar com sua produção a curto prazo, desde que o preço do produto seja suficiente para cobrir as despesas médias

desembolsadas. Havendo prejuízo a recomendação é trocar seu negócio por outro mais rentável.

Esse mesmo problema já era discutido em 1972, onde houve longos debates a respeito das metodologias de custo e propuseram um procedimento alternativo - o chamado Custo Operacional – que passou a ser utilizado pelo Instituto de Economia Agrícola (IEA) e foi divulgado pela primeira vez no Prognóstico de 1972/73. Com as estimativas, o objetivo primordial que se pretendeu atingir foi fornecer um parâmetro de curto prazo, tanto ao empresário rural como aos agentes financeiros e órgãos estatais e privados atuantes na política agrícola (MATSUNAGA *et al.*, 1976).

Foi essencial, então, que este parâmetro econômico fosse de análise acessível, e de suma importância que estivesse livre da subjetividade que cerca o cálculo de alguns itens que compõem o custo de produção, em seu arcabouço teórico.

2.5.1 *Definição de custo de produção*

A definição de custo de produção é dada pela soma, expressa monetariamente, de todos os sacrifícios suportados para a obtenção de uma utilidade ou de um serviço de caráter oneroso. Para o produtor, o custo total de produção é entendido como a soma de todas as dispêndios para a obtenção do produto. Produzir é criar utilidade e, para isso, quem se propõe a produzir, tem de suportar encargos, renúncias e riscos em maior ou menor escala, ou seja, todo objetivo econômico com caráter oneroso implica um custo (ALOE & VALLE, 1967 *apud* VIANA E SILVEIRA, 2008).

Os levantamentos e simulação dos custos de produção levaram em consideração os custos e despesas operacionais agrícolas e industriais. Considerou-se as despesas administrativas agrícolas e gastos com arrendamento da terra inerentes a operação do agricultor, configurando como parte da operação. Quando se busca, dentro do arcabouço da administração, verificar a rentabilidade e quantificar os centros de gastos de uma atividade produtiva, está se desenvolvendo uma análise de custos de produção, sendo esta uma das ferramentas mais utilizadas para a verificação da rentabilidade econômica. A correta elaboração dos custos de produção permite uma leitura mais verídica da atividade

produtiva e possibilita um diagnóstico mais preciso da realidade (ARBAGE, 2000, p.199 *apud* VIANA E SILVEIRA, 2008).

2.5.2 Custos Diretos e Indiretos

Há dois tipos de custos: diretos e indiretos, segundo Crepaldi, (2012). A definição de custos diretos é dada por custos que podem ser diretamente, isto é, sem uso de rateio apropriados aos produtos. Para que isso ocorra, faz-se necessário que exista uma medida de consumo como toneladas, horas de máquina, litros, etc. Já os custos indiretos necessitam de algum critério de rateio para serem incorporados aos produtos como o aluguel, iluminação, depreciações e etc.

2.5.3 Custos Fixos e Variáveis

É importante ressaltar ainda a diferença entre custos fixos e custos variáveis. Os fixos “são aqueles cujo total não varia proporcionalmente ao volume produzido”, enquanto que os variáveis “variam proporcionalmente ao volume produzido” (CREPALDI, 2012). Pode-se dizer que os Custos Fixos são aqueles com que o produtor arca independentemente da escala de produção, e neles podem se incluir terra, capital-fixo, mão de obra permanente, alguns impostos, seguros e até depreciações, dentre outros.

2.5.4 Definição de Custo Implícito e Custo Explícito

Ao se falar em custos, deve-se definir os conceitos em termos econômicos. Assim, uma definição basilar necessária ao entendimento é chamada de custo implícito e custo explícito. O custo econômico considera os custos explícitos, que se referem ao desembolso efetivamente realizado, e os custos implícitos são àqueles que dizem respeito aos quais não ocorrem desembolsos efetivos, como é o caso da depreciação e do custo de oportunidade (SANTOS; LÍRIO; VIEIRA, 2009).

2.5.5 Definição de Custo Operacional

O custo de produção, usualmente, é definido como sendo a soma dos valores de todos os serviços produtivos, dos fatores aplicados na produção de uma utilidade, sendo esse valor total correspondente ao total que a firma produz. Esta formulação oculta que todos os fatores empregados para criar certo bem devem ser remunerados, contendo: terra, capital e força de trabalho do empresário. Ressalta-se que o conceito clássico de custo possui os seguintes aspectos: os custos explícitos e implícitos e o custo de oportunidade. O custo de produção previamente praticado pelo IEA e extensivamente utilizada, leva em conta todos os fatores que se apresentam, direta ou indiretamente, ligados ao processo produtivo, adotando-se critérios subjetivos para remunerar determinados fatores, como a remuneração de capital (MATSUNAGA *et al.*, 1976). O custo, então, apresenta dois lados. O primeiro, apresenta a formulação clássica preconizada pela teoria, por outro lado não representa a prática das propriedades rurais produtoras de cana-de-açúcar, nem revela o real desempenho do setor.

A adoção da estrutura de custo operacional permite se diferenciar do conceito de custos fixos e variáveis no qual o autor considera adequado ao seu estudo. Esses custos na metodologia adotada poderão pertencer a uma margem ou resíduo. Definiu-se o Custo Operacional Efetivo (COE) como aquele que acarreta o desembolso do produtor, por exemplo: mão de obra contratada, fertilizantes, mudas de cana-de-açúcar, defensivos, reparos de benfeitorias, consertos de máquinas, impostos e taxas, combustível e outros desta natureza (GOMES, 2016). Já o Custo Operacional Total (COT) adiciona-se aos itens acima, a parcela dos custos fixos representados pela depreciação dos bens duráveis e pelo valor da mão de obra familiar e/ou remuneração do proprietário.

Um esquema simplificado é representado na Figura 14, ilustrando o COE, COT e CT. Na Margem está contido remuneração da terra própria, depreciações, remuneração de capital, lucro ou prejuízo para o elo agrícola, por isso, optou-se por este nome e não rentabilidade ou lucratividade.

Figura 14 - Esquema Simplificado do CT, COT e COE

Fonte: o autor

Na decisão do produtor agrícola, entre aumentar ou diminuir sua produção ou até mesmo alternar ou trocar o cultivo por outro produto, está muito atrelada ao desembolso financeiro, ou seja, aos custos fixos com desembolsos que não sejam de curto prazo, como a depreciação ou remuneração de capital, os quais poderão ser recebidos ao término de um ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, quando há a exigência dos tratos culturais da cana soca, reformando ou trocando o plantio. A remuneração do produtor agrícola e/ou da mão de obra familiar, assim como a remuneração da terra própria pode ser facultativa ou acontecer de acordo com as margens disponíveis, uma vez que sejam positivas.

A metodologia aplicada neste estudo, com o uso do Custo Operacional, não está sozinha na literatura. Outros trabalhos como os de Marques (2009) e Xavier, *et al.* (2009) que realizaram o levantamento dos custos agrícolas da cana-de-açúcar de fornecedores autônomos e usinas, assim como os seus custos industriais na produção de açúcar e etanol, também, utilizaram a mesma lógica estrutural de custos, como outros autores da área.

O esforço de responder de uma maneira mais factual que retratassem os custos da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, precisou superar os obstáculos de aspectos metodológicos de apropriação de custos, os quais não só manifestaram questões teóricas de avaliação, como divergiram muitíssimo em uma cadeia de suprimentos de tecnologia heterogênea, como é a do Brasil. Diante deste quadro, optou-se pelo cálculo através do Custo Operacional Efetivo.

2.5.6 Margens

As margens, neste trabalho, foram definidas como sobras líquidas unitárias por produção (R\$/t ou R\$/l) ou resíduos financeiros, como observados na teoria contábil. Constatase uma relação favorável entre eficiência técnica e reinvestimento de margem de resultados. A margem é correspondente ao preço unitário obtido pelo produtor, subtraindo-se o custo operacional efetivo (COE) unitário o qual se incluem os tributos. Portanto, os valores podem ser interpretados da seguinte maneira: quando a margem for negativa, a operação está comprometida, pois os custos operacionais efetivos são superiores a receita bruta unitária (CREPALDI, 2012). Estes valores permitem avaliações econômicas no curto prazo, pois quando positiva, a operação da fazenda ou usina está se remunerando e possui alguma resiliência, pois supera o COE.

2.6 Dificuldades, Desafios e Problemas da Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar

A cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é um conjunto abrangente e estruturado de atividades, que compreende desde do cultivo da cana-de-açúcar e alcança a comercialização de açúcar, etanol e energia até o consumidor final, cruzando sobre cada um dos elos do processo produtivo.

As operações a montante da cadeia central englobam fornecedores de insumos agrícolas, máquinas, equipamentos e tecnologias. O núcleo central inclui os principais elos que englobam as etapas essenciais para a concepção dos produtos finais de consumo. A jusante, estão as operações de promoção da comercialização e da distribuição ao mercado consumidor, além da entrada na fabricação de fármacos e alimentos. Toda cadeia de suprimentos incorpora-se a um conjunto mais abrangente de elementos que compõem o ambiente de negócio, onde se deparam com os parâmetros de regulação e tributos, o diverso uso de mão de obra, a oferta de diferentes tecnologias, como também, os mecanismos de financiamento das atividades econômicas, além da disponibilização da infraestrutura e logística (BUARQUE, 2008).

Nesta cadeia apresentam-se numerosas possibilidades de negócios: o processamento de produtos derivados, serviços de pesquisa e capacitação, assistências técnicas, transporte,

comercialização, exportação, serviços portuários, consultorias, dentre outras. A interação e integração entre usinas, fornecedores de matérias-primas e insumos, centros de pesquisa, universidades, fabricantes de equipamentos, instituições governamentais, corretores, representantes, atacadistas, varejistas e consumidores finais são elementos importantes dessa cadeia (BUARQUE, 2008; VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2006).

O estudo da cadeia produtiva da cana-de-açúcar é muito sofisticado devido à existência de um elevado número de usinas e produtores independentes de cana-de-açúcar, que possuem significativas diferenças nas tecnologias de equipamentos produtivos, tanto nos elos agrícolas e industriais, nas escala de produção; mas outros também, relevantes como quantidade de terra própria, nível de mecanização e uso de mão de obra, região em que se localiza, logística adotada, integração à rede de transmissão de energia, o que tornam as soluções que envolvem o planejamento, difícil, pois tais características afetam os custos e margens de maneiras singulares, dadas suas especificidades.

Paralelamente, o setor passa por grandes mudanças tecnológicas, tanto de mercado quanto de processos produtivos, especialmente de processos de aproveitamento de bagaço e palha de cana, mudanças de processos industriais, entre outros. Essa profusão de atividades envolvidas acontece desde a fase de plantio à colheita da cana, que engloba, ao menos, dois segmentos de produtores bem característicos que, no decorrer, possuem relacionamentos de complementaridade e conflitos: os usineiros e os fornecedores de cana independentes, que são pequenos proprietários de terra, passando pelo elo industrial, onde apresentam uma gama relevante de diferentes estruturas produtivas, executadas por grandes e pequenas empresas até o consumidor final (BUARQUE, 2008).

Apesar de sua relevância estratégica, Duarte e Rizzardo (2015) apontam que ao longo dos últimos anos o setor de açúcar e etanol foi claramente um dos menos preferidos aos olhos do investidor, por combinar alguns dos elementos mais evitados em *cases* de investimentos: alta volatilidade dos preços da *commodity*; intervenção governamental nas políticas de preços de combustível e energia; negócio de capital intensivo. Rajagopal *et al.* (p. 02, 2009) reforçam essa ideia e apontam que investimentos nesse setor em elevação da capacidade de produção ou em infraestrutura têm como característica de serem arriscados, bem como suscetíveis às oscilações de mercado, a incerteza

tecnológica, flutuações nos preços de insumos e de venda. Tais questões são passíveis, em muitos casos, de insucessos e prejuízos irreversíveis.

Nesta cadeia produtiva, também, são conhecidos os obstáculos de preços do etanol carburante na concorrência com a gasolina (MORAES e BACCHI, 2014). Para Milanez *et al.* (2012), o etanol está no centro das dificuldades que a cadeia sofreu em sua última crise. Os impactos e dificuldades se manifestam fortemente nos dois primeiros elos da cadeia produtiva, agricultura e indústria, vindo a seguir os reflexos na distribuição e no varejo, com todos esses, atrelado a uma dinâmica ancorada pelo preço da gasolina.

O preço administrado da gasolina e as oscilações no mercado consumidor se constituem em enormes desafios, ao reduzir a previsibilidade da demanda futura, provocando frequentes erros de tomada de decisão nos investimentos, em unidades industriais. A redução de previsibilidade futura é um potencial causador de desabastecimento por insuficiência de investimentos na produção, capazes de promover a necessidade de importação intempestiva; também no caso de excesso de investimentos em capacidade de produção pode provocar um excesso de demanda, insuficiente para manter um adequado nível de ocupação na indústria.

Na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar diversas questões devem ser consideradas, como a necessidade de planejamento cuidadoso, de considerações de custos e margens que possuem enorme relevância. São muito os desafios e problemas enfrentados o que deixam evidentes a complexibilidade do trabalho ora proposto.

2.7 Conclusões do capítulo – Referencial Teórico

Neste capítulo abordou-se sobre a resiliência, curva experiência e modelos de simulação, trazendo conceitos, o estado da arte nas áreas, e também, se expôs discussões e análises da evolução das três temáticas.

Apresentou-se um breve histórico até tempos mais recentes da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, uma cultura secular. Discorreu-se por seus elos agrícola e industrial, através dos diferentes processos e características que os compõem, os quais serão resgatados para a construção do modelo de simulação desenvolvido, se observando o

compartilhamento dos meios de produção até os três produtos finais principais: açúcar, etanol e energia elétrica.

O capítulo perpassa por outros itens igualmente relevantes para o entendimento desta tese, como: produtividade da cana-de-açúcar, insumos, ATR e sua precificação pela CONSECANA, além dos tributos e considerações pertinentes sobre os custos e margens. Neste ponto, se conceituou os custos operacionais efetivos que se diferenciam dos conceitos clássicos. Finalmente, aludem-se as dificuldades, desafios e problemas enfrentados na gestão da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Estas temáticas são relevantes para o embasamento, e assim, sedimentam as bases para os capítulos seguintes, compostos pela metodologia de pesquisa e resultados.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 Método Indutivo e Formulação de Proposição

Esta pesquisa se apresenta partindo do *método indutivo*, isto é, partimos de dados particulares, para uma questão mais ampla, mais geral. No raciocínio indutivo, a generalização deriva de casos da realidade observada (MARCONI; LAKATOS, 2003; PRODANOV; FREITAS, 2013).

Tal estratégia metodológica procura suas soluções com evidências e não com hipóteses. Com as evidências em foco e a análise de sua plausibilidade adotam-se métodos sistemáticos de análise dos dados que possibilitam sugerir conclusões e, em seguida, testá-las. Apesar disto, não se eliminam uma etapa de julgamento, discernimento e astúcia em sua elaboração. O método indutivo suprime a necessidade de hipóteses e se propõe a formulação de proposições. Os adeptos do método indutivo (empiristas) partem das observações para depois formular as proposições que dão forma ao plano de coleta de dados e, por conseguinte, estabelecem prioridades às estratégias analíticas relevantes de um conjunto de proposições logicamente correlacionadas, sobre o comportamento dos fenômenos que se deseja estudar.

Diante deste alicerce explicativo, iniciou-se a busca por dados que poderiam dar indicações de como elucidar o problema. Em seguida, explorou-se as conexões entre este conjunto de informações obtidas, para assim, só depois, decidir o método (ou estratégia analítica) o qual teria mais aderência nesta pesquisa. E a partir daí, delimitou-se a proposição na forma da pergunta-problema.

3.2 Tipo de Pesquisa

Se classifica este trabalho quanto à sua natureza aplicada; aos seus objetivos, explicativa, com um suporte complementar descritivo. Para viabilizar a estratégia de pesquisa utilizou-se de procedimentos experimentais, documentais e bibliográficos. Configuramos suas abordagens beneficiando-se de construções qualitativas e quantitativas.

Raupp e Beuren (2003, p. 76) explicam que “o delineamento é intrínseco à pesquisa científica, norteando o pesquisador na busca de uma resposta para determinado

problema”. Observa-se que o processo de obtenção destas respostas passa pelo delineamento de pesquisa e neste caso, conduz a formação de um plano de investigação e esclarecimento de uma questão atual que demanda mais estudos para o setor; é o caso da resiliência e das perturbações que se apresentam na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Assim se explora a natureza aplicada desta pesquisa, tendo como foco, o objetivo de gerar conhecimentos para aplicação prática para uma solução de um problema específico.

Para entender os objetivos desta pesquisa explicativa buscou-se identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. É o tipo que mais “aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas” (GIL, 1999, p. 44). É o mais complexo e delicado por esse motivo está mais sujeita a erros, completa Andrade (2008).

Utiliza-se do procedimento experimental, que possibilita a manipulação e o controle das variáveis no intuito de analisar o fenômeno em estudo. Esta aplicação envolve-se de dificuldades de análise puramente matemática e necessita de um maior contexto explicativo, por isso recorremos a uma combinação de outros métodos, como o descritivo, que se destaca por “observar os fatos, registrá-los, analisá-los, classificá-los e interpretá-los” (RAUPP; BEUREN, 2003, p. 81), colaborando para a compreensão das naturezas de fatores de influência nos custos e margens na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Para o suporte complementar adotou-se uma estratégia de pesquisa: documental e bibliográfica, apoiada em dados secundários e primários.

A abordagem mista entre elementos quantitativos e qualitativos foi utilizada para permitir a comprovação das relações dos fenômenos entre si, isto é, a associação entre variáveis e a relação de causalidade entre fenômenos, com uma verificação empírica, obtendo assim, respostas mais significativas e respaldadas. Para as análises da resiliência, da curva de experiência e do modelo de simulação têm parte de sua organização em tabelas, quadros e gráficos, enquanto para se explorar estas questões com maior riqueza de detalhes, necessitamos de nos valer de textos narrativos e descritivos.

A Figura 15 descreve o tipo de pesquisa adotado quanto a sua natureza, objetivos, procedimentos e abordagem:

Figura 15 – Tipo de Pesquisa Adotada

Fonte: o autor

3.3 Enquadramento Metodológico da Simulação

O modelo de simulação utilizado para esta pesquisa é de base empírica. É considerado estático, uma vez que se as entradas permanecem as mesmas, os resultados apresentam-se inalterados, respeitando o conjunto de equações algébricas. Também é considerado determinístico, uma vez que, imediatamente, se conheça os valores de entrada, sua saída pode ser calculada de maneira exata. Pode ser classificado como discreto, visto que, as variáveis de tempo constituem valores distintos no intervalo.

3.4 Enquadramento Metodológico da Análise Qualitativa

Os procedimentos metodológicos adotados para cronologia, eventos deflagradores, estratégias adotadas e resultados das estratégias e outras abordagens qualitativas presentes nesta tese, seguem as práticas adotadas na condução de estudos de caso, para fins de pesquisa.

O método de estudo de caso é classificado como um tipo de análise qualitativa (GOODE; HATT, 1972). Sendo mais adequado para certas circunstâncias na pesquisa em administração, onde a análise de inúmeros problemas é de difícil abordagem por outros métodos e quando há dificuldade de isolá-los do seu contexto real (BRESSAN, 2000). Segundo Bonoma (1985) e Yin (2001) este método é especialmente proveitoso quando:

- o fenômeno a ser estudado é amplo e complexo;

- não pode ser plenamente elucidado fora do contexto em que ocorre;
- em situações que sua fronteira e o contexto não são claras;
- múltiplas fontes de evidência são utilizadas;
- o corpo de conhecimentos existente é insuficiente para suportar a proposição de questões causais;
- o intuito é a compreensão do fenômeno por meio de descrição, classificação e desenvolvimento de tipologia.

De maneira específica, este método é adequado para responder às questões explicativas que tratam de relações operacionais que ocorrem no decorrer do tempo, mais do que frequências ou incidências. E também, permite um exame detalhado do processo organizacional em estudo, identificando fatores particulares que possam levar a um maior entendimento da causalidade (BRESSAN, 2000).

Para a análise de evidências no estudo de caso é necessário se ter um procedimento para tratá-las de forma adequada, de maneira a se obter conclusões analíticas convincentes e eliminar interpretações alternativas (YIN, 2001). Algumas recomendações passam por:

- a necessidade de ser cauteloso nos processos de coleta, análise e interpretação das observações;
- um modelo lógico que conduz a formulação de inferências a respeito das relações causais entre as variáveis em observação e em seguida, estabelecer as interpretações;
- uma tabulação de eventos significativos e dados quantificados recomendando-se que se faça o uso de categorias, evitando grupos pequenos ou muito numerosos;
- evitar narrativas longas e relatórios extensos que desestimulam a leitura;
- dispor as informações em ordem cronológica ou utilizar alguma outra disposição temporal.

Com o intuito de garantir o rigor desta fase do trabalho, a pesquisa foi elaborada segundo as etapas e procedimentos propostos por Eisenhardt (1989). Esta estratégia de pesquisa descreveu uma lógica a qual pode ser replicada, como também minimiza as preocupações de validade e confiabilidade da pesquisa. O processo de construção possui características que vão desde a seleção do problema de pesquisa até atingir o fechamento. O estudo

desenvolvido a partir deste método possui pontos fortes como testabilidade e validade empírica, que resultam da ligação íntima com evidência empírica.

Pode-se resumir a proposta de Eisenhardt (1989) (Quadro 04) correlacionando-o com o nosso estudo de caso proposto nesta tese. A observação dos eventos deflagradores e estratégias adotadas tem como intuito elucidar as relações de causa e efeito que afetam os custos e margens, isto é, a perspectiva metodológica nestes itens pretendeu fundamentalmente a descrição e a compreensão dos fatores que compunham o fenômeno estudado, segundo sua sequência temporal e sua integração dentro do contexto da cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar. Assim sendo, o foco deste ponto da pesquisa foi a análise de relações entre variáveis quantitativas e qualitativas, de maneira complementar, que pudessem explicar estas variações de custos e margens.

Quadro 04 – Proposta do Estudo de Caso correlacionando-o com Eisenhardt (1989)

Etapas	Atividade	Razão
Começando	Definição da pergunta de pesquisa	Dá foco para os esforços
	Constructos possíveis <i>a priori</i>	Provê uma melhor base para a mensuração de constructos
	Sem teoria e sem hipóteses	Mantém a flexibilidade teórica
Seleção dos casos	Especificação da população	Limita variações provocadas por fatores externos e melhora a validade externa
	Amostragem teórica, não aleatória	Ajuda a usar apenas casos teoricamente úteis — ex.: casos que replicam ou estendem a teoria preenchendo categorias
Preparando instrumentos e protocolos	Múltiplos métodos de coleta de dados	Fortalece o embasamento da teoria pela triangulação de evidências
	Dados qualitativos e quantitativos combinados	Perspectiva sinérgica das evidências
	Investigadores múltiplos	Promove perspectivas divergentes e fortalece o embasamento
Entrando no campo de coleta de dados	Realização, em paralelo, da coleta e da análise de dados, incluindo a tomada de notas durante a pesquisa de campo	Acelera a análise e revela ajustes úteis necessários para a coleta de dados
	Métodos de coleta de dados oportunista e flexível	Permite ao investigador aproveitar os temas emergentes e as características
Analisando os dados	Análise intra-caso	Promove a familiaridade com os dados e a geração preliminar de teoria
	Análise inter-caso: busca de regularidades entre os casos usando técnicas divergentes	Força o pesquisador a enxergar além das primeiras impressões e a ver evidências através de diferentes lentes perceptivas
Moldando hipóteses	Tabulação iterativa ¹² de evidências para cada constructo	Precisa e ajusta a definição dos constructos, a validade e capacidade de mensuração

¹² Iteração pode ser entendido como o processo que se repete diversas vezes para se chegar a um resultado e a cada vez gera um resultado parcial que será usado na vez seguinte

	Uso da lógica de replicação, não de amostragem, ao considerar cada um dos diferentes casos	Confirma, estende e ajusta a teoria
	Busca de evidências sobre os <i>porquês</i> por trás das relações conceituais identificadas	Constrói a validade interna
Comparação com a literatura	Comparação com a literatura conflitante	Constrói a validade interna, eleva o nível teórico e precisa/ajusta a definição dos constructos
	Comparação com a literatura similar	Define o potencial de generalização, melhora a definição dos constructos e eleva o nível teórico
Atingindo o fechamento	Saturação teórica se possível	Finaliza o processo de pesquisa quando a melhoria marginal é pequena

Fonte: Eisenhardt (1989)

É auspicioso lembrar que Stevenson e Spring (2007) dividem o exame da resiliência em diferentes níveis de hierarquia, os quais foram observados nesta tese:

- O primeiro é o mais basilar, como os processos, as máquinas, os materiais, a mão de obra, os quais podem ser feitos ajustes sem que ocorra uma reconfiguração importante, que é dependente de tecnologias de fabricação e a facilidade com a qual os ajustes gerais de curto prazo podem ser feitos.
- Na sequência, temos as opções táticas, como a modificação de volume produzido, em que o sistema pode efetivamente se alterar e ainda se manter eficaz e viável, ou a faixa em que o sistema pode alterar sua produção sem adicionar novos equipamentos.
- As estratégias no nível organizacional, que se exprimem a facilidade com a qual a empresa pode adicionar volume de produção em um longo prazo ou a capacidade interna de se adaptar às mudanças no ambiente de mercado, ou melhor, a faixa de mudança com a qual a cadeia de suprimentos existente é capaz de lidar.
- E finalmente, a interorganizacional expressa pela capacidade de alinhar informações e políticas com entidades existentes da cadeia de suprimentos para atender às mudanças estruturais importantes.

3.5 Concepção do Modelo de Simulação

O modelo é uma representação simplificada e compreensível de algo, de um conceito ou de uma atividade. Modelos podem ser representados pela matemática, pelos gráficos, normativamente e fisicamente ou alguma associação desses tipos. Sua atuação no âmbito de negócios é vasta e incluem: organização, descoberta, previsão, medição, explicação, verificação e controle. Ainda assim, em nada desvincula os propósitos deste estudo, destarte, considera-se que segundo a *Association of Business Process Management Professionals*:

os processos de negócio podem ser expressos por meio de uma modelagem em vários níveis de detalhe, desde uma visão contextual abstrata até uma visão detalhada. Um modelo de processos de negócio completo normalmente representará diversas perspectivas, servindo a diferentes propósitos (ABPMP, 2013, p. 72).

Especificamente, nesta tese, foi desenvolvido um modelo para simular os custos e margens da produção na cadeia de cana-de-açúcar, para tal, seguiram-se as etapas propostas por Chwif e Medina (2007), que segundo os autores, o desenvolvimento de um modelo de simulação é composto por três etapas principais:

- a) Concepção ou formulação do modelo;
- b) Implementação do modelo;
- c) Análise dos resultados do modelo.

A partir destas propostas de desenvolvimento, elaboramos nossas etapas. A construção do modelo de simulação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar considera os processos agrícolas e industriais que impactam os custos e margens, como os diferentes custos de produção agrícola, tecnologias de cogeração, eficiências produtivas, venda da eletricidade, incidência de impostos, entre outros. As particularidades do sistema de produção brasileiro e a falta de dados experimentais disponíveis na literatura, para a alimentação do modelo, justificam o desenvolvimento de submodelos conceituais que se adaptem às condições presentes.

A primeira etapa constitui-se na coleta de informações, como indicadores e dados de custos, na qual são explorados os valores divulgados pela literatura, bem como a identificação dos parâmetros técnicos, os quais são críticos ao processo. Nesta etapa, se observou que os dados fornecidos na literatura eram insuficientes para sua construção,

exigindo pesquisas *in loco*, e a procura de profissionais que pudessem fornecer as informações necessárias. Tais informações foram obtidas, no entanto, são consideradas não oficiosas, pelo pedido dos profissionais para não exporem a si mesmo e as empresas. Assim, optou-se por apresentar as informações, juntamente, com as obtidas pela literatura.

A segunda etapa foi a formulação e implementação do modelo em si, onde o desenvolvimento de um modelo matemático para estimar os custos e margens da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar foi construído. O modelo matemático consiste em determinar o custo por etapa produtiva e por ano, de forma a obter os percentuais relativos para o processo de produção da cana-de-açúcar, desde a preparação do solo até a entrega da cana na usina, para o elo agrícola. Continuando pelo elo industrial, se obtêm os custos e margens de uma usina produtora de etanol e açúcar em diferentes níveis tecnológicos.

Nesta etapa, um exame minucioso foi preciso para construir e operacionalizar os parâmetros críticos do processo do modelo de simulação, desta maneira, exigindo-se aqui conhecimentos das áreas:

- agrícolas, para os processos de preparo do solo, plantio, características da cana-de-açúcar, colheita, entre outros;
- termodinâmica, para o balanço energético;
- engenharia mecânica, para processos produtivos como a moagem, detalhes de funcionamento dos equipamentos;
- química, para processos como os fermentativos e de destilação;
- financeira e econômica, este de maior domínio do autor, por sua área de atuação.

A terceira fase e final, teve cunho descritivo e explicativo. Procurou-se validar o modelo com outros dados e índices disponíveis.

3.6 Estruturação do Modelo de Simulação para Custos e Margens

O modelo de simulação seguiu a estrutura de custeamentos por processo, que podem ser entendidos como produção contínua, costumam-se ser aplicados nas empresas que produzem diversas unidades de um único produto por um longo tempo (GARRISON;

NOREEN; BREWER, 2013). Pode-se citar como exemplo de organizações de produção contínua: as usinas de etanol, açúcar e entre outras (MARTINS, 2010).

Observa-se que os estudos da área tendem se a concentrar nos componentes individuais mais relevantes ou em elos específicos de sua cadeia de fornecimento. Ao não buscar por uma compreensão holística, muitas vezes, se deixa de avaliar as consequências das interações entre componentes e elos da cadeia, que podem ser importantes e, portanto, quando essas interações não são consideradas, erros de avaliação podem ser cometidos, comprometendo a qualidade do estudo (STUTTERHEIM, 2006). Este trabalho buscou evitar estes erros.

3.7 Ferramentas de Apoio ao Desenvolvimento dos Processos do Modelo

Neste trabalho, foram realizadas simulações de produção de etanol, açúcar e energia a partir de cana-de-açúcar utilizando o *Excel* e o *Matlab*.

3.8 Simbologia

A simbologia é expressa conforme suas características individuais como toneladas, quilogramas, litros, horas, dia de trabalho. No Quadro 05, mostra-se a representação dos símbolos ou caracteres para notação de unidades da cadeia de cana-de-açúcar utilizadas:

Etapas produtivas / indicador	Unidade	Terminologia
Área total produtiva	ha	Hectares
Produtividade média	t/ha	Toneladas por hectares
Cortes por ciclo	n	Numerais ordinais
ATR	kg/tc	Quilo por tonelada de cana
Preço do ATR	R\$/kg ATR	Reais por quilo de ATR
Raio Médio	km	Quilômetros
% de colheita mecanizada	%	Porcentagem
% de plantio mecanizado	%	Porcentagem
Arrendamento praticado	t/ha	Toneladas por hectares
Custos das etapas produtivas	R\$/tc	Reais por tonelada de cana
Custos das etapas produtivas	R\$/tc/ha	Reais por tonelada de cana por hectare

Quadro 05 – Simbologia / Unidade Etapa Produtiva / Indicador.

Fonte: o autor

3.9 Recolhimento de Dados

Levantou-se os dados na literatura e em consultorias para alimentar o modelo de simulação das usinas projetado para este trabalho. No que tange aos custos foram recolhidos dados para os anos de 1975-2014, este período foi maior devido à necessidade de validação e características próprias do método da curva de experiência. Para os demais dados utilizados para formar as margens, o período utilizado foi de 1998-2014, devido a impossibilidade de recolher informações anteriores a 1998.

Uma parte do recolhimento dos dados foi de fontes confidenciais de consultorias especializadas ou profissionais do ramo que pediram anonimato. No entanto, no processo descritivo desta metodologia, buscou-se, dar a maior transparência possível quanto a sua utilização; uma vez que se concentrou, principalmente, para a etapa de validação do modelo de simulação.

Todavia, retirando-se as informações conseguidas na literatura, estes dados restritos estão em poder de empresas e usinas privadas e comumente não ficam acessíveis por razões competitivas. Portanto, a análise do modelo aqui apresentada requereu ferramentas adicionais para a avaliação de sua aplicabilidade, e por esta razão, no nosso caso, aumentamos a robustez do modelo ao obter acesso privilegiado a informações, que melhoraram o desempenho geral em termos de precisão e confiabilidade, o qual não seria possível construir somente com dados livremente disponíveis, ou, com entrevistas abertas de profissionais com a identificação de seus nomes.

O levantamento dos dados empíricos é uma tarefa sensível e complicada, pois depende das informações fornecidas pelos agricultores e usineiros. Vários são os estudos que expõem essa dificuldade, apontando várias adaptações à metodologia por essas dificuldades de levantamento. Em muitos casos, não há divulgação de informações internas das empresas com clareza, por sua própria opção estratégica. Normalmente, exposição de informações é devido a uma obrigação por força de lei, por *benchmarking* ou oportunidade de aperfeiçoamento de gestão dos custos internos.

Detalhadamente, especificamos as séries de dados e informações levantadas para construção do modelo de simulação. Listamo-las:

- dados gerais das tecnologias e engenharias em questão;

- dados econômicos ou de mercado de ampla disponibilidade: inflação, preço da cana/ano, preço do bagaço/região/ano, preço de venda de energia elétrica de usinas, volume brasileiro de etanol hidratado e anidro/ano, preço do açúcar/ano, proporção de etanol produzido de cada tipo, juros, spread e amortização do BNDES para projetos de expansão e criação de usinas, tributos aplicados a geração de energia, a etanol e ao açúcar, ATR/ano, produtividade/ano e índice de mecanização/ano;
- dados de investimentos relativamente restritos: preço de diferentes *retrofits*, *brownfields*, *greenfields*, valor *turn-key* de diferentes usinas, preços de caldeiras, estações de energia e distribuição e diversos outros equipamentos de usinas reais;
- dados de operação relativamente restritos: custos de produção da cana-de-açúcar em determinada região, custos de operação de diferentes usinas, custo de insumos industriais, quantidade de litros produzidos, capacidade de moagem, com sua respectiva tecnologia e sua eficiência e equipamentos adotados para tal produção;
- e outros dados individuais de processos particulares de usinas, para validação comparativa do modelo.

3.9.1 Detalhamento das Fontes no Recolhimento de Dados

- Os Juros e o Spread foram obtidos diretamente no BNDES em uma média de projetos reais de usinas implantadas através de empréstimos realizados no Brasil. A inflação utilizada também foi a real para o período e atualizadas para o ano de 2014. Vale ressaltar que as usinas, quando fazem a implantação de novos negócios, atualizações e ampliações necessitam de capital próprio no montante mínimo de 10% do total a ser investido, sendo que o restante pode ficar a cargo do BNDES, que possui taxas de juros, spread, e tempo de amortizações diferenciados.
- Estes dados, também, foram utilizados para o cálculo da parcela de investimento a ser amortizada, que nesta tese, foram considerados para 20 anos.
- Os custos de operação e manutenção e insumos industriais foram adaptados da série de estudos publicados pelo PECEGE¹³ (Programa de Educação Continuada

¹³ Publicações da série: Custos de Produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil – Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ.

em Economia e Gestão de Empresas) entre os anos de 2007 a 2014, para anos anteriores se considerou o ano de 2007 aplicando um deflator inflacionário.

- O preço da cana-de-açúcar foi obtido através da CONSECANA/UDOP (União dos Produtores de Bioenergia), para a mesma base de anos.
- O preço do bagaço da cana-de-açúcar foi adquirido através de levantamento de preços de vendas oferecidos por produtores em diversas regiões do Brasil, obtidos através de levantamento pela internet, e-mail e contato telefônico.
- O preço de venda de bioenergia foi obtido de uma média de usinas nos leilões específicos para biomassa da ANEEL.
- Os preços das usinas e cogeração foram obtidos de projetos fornecidos por publicações anteriores da Dedini e por dados identificados na literatura.

3.10 Características Detalhadas do Modelo de Simulação

O modelo de simulação se concentra, principalmente, nas diferenças existentes entre os tipos identificados de usinas, que contribuem de forma significativa para alterar os custos do processo, na qual foram empregados parâmetros industriais tais como as eficiência e rendimentos das operações unitárias.

O motivo por optar por não dividir o modelo e simulação pelas regiões Tradicional, Expansão e Nordeste foi devido a possibilidade de comparar particularidades de diferentes opções de modelos de negócios; o que leva a algumas limitações por não representar exatamente uma região ou usina específica, devido à grande extensão territorial nacional. No entanto, o propósito foi buscar retratar o setor como um todo, de maneira mais holística.

As características detalhadas do modelo de simulação são descritas a seguir:

- 1) em primeiro lugar foi identificado e atribuída uma % de custos para cada uma das etapas produtivas ao longo dos anos para elo agrícola; em seguida criou-se uma função onde a produtividade e preço da terra afetam os próprios custos;

- 2) utilizou-se como parâmetros de matérias-primas: a cana-de-açúcar, o bagaço de cana, a quantidade de terra necessária, que são dados empíricos inseridos no modelo;
- 3) buscou-se os parâmetros usuais industriais para as variações típicas de eficiências das operações de cada unidade de trabalho, como os processos de moagem, tratamento do caldo, fermentação, destilação e a identificação das caldeiras típicas em torno de 21, 45, 65 e 100 bar de pressão e a partir daí, desenvolveu-se um efetivo desenho matemático do modelo para cada uma delas;
- 4) parâmetros de rendimentos como: ATR, litros produzidos por ATR, quantidade de sobra de bagaço por cana moída, rendimento de vapor por quantidade de bagaço, rendimento de energia por bagaço, tempo de duração da safra, produtividade agrícola média por ano, entre outros. Também foram inseridos no modelo de maneira empírica;
- 5) parâmetros das operações relacionadas com o sistema de cogeração e o *mix* entre açúcar e o etanol. Para este componente do modelo de simulação, um balanço simplificado de energia do processo foi realizado. Dados técnicos de componentes, como cálculo de consumo de combustível, ganho energético com o aumento da pressão e temperatura, assim como a distribuição de energias nos processos industriais foram obtidos na formação da base de dados do simulador, para representar o processo com maior precisão, dentre as caldeiras típicas;
- 6) a energia elétrica excedente é a diferença de energia produzida e energia para consumo próprio. Esta diferença determinando a disponibilidade para venda. Para tal avaliou-se a quantidade de bagaço de cana necessária para cogeração na safra e na entressafra. Estes valores são usados para determinar os parâmetros da cogeração e a produção das energias mecânicas, térmicas e elétricas; também se avaliou a eletrificação em substituição ao vapor;
- 7) a usina com maiores disponibilidades energéticas para venda obtém em sua margem o ganho de energia elétrica excedente, e para aquelas que o valor de disponibilidade é baixo, opta-se pela venda do bagaço;

- 8) também são utilizados e calculados para a composição do modelo de simulação, os diferentes custos de operação e manutenção, custos de investimento da usina, taxa de financiamento, spread, taxa de inflação, tributos sobre a produção, dentre outros itens que afetam os custos e margens para fazenda e usina padrão.

3.11 Fazenda Padrão

O elo agrícola, representado pela fazenda padrão, foi construído apoiando-se na área rural necessária para funcionamento de uma usina. Nesta parte do modelo de simulação baseou-se na utilização de padrões médios de redução e elevação de custo, em R\$/tc, para as etapas produtivas de preparo do solo, de plantio, de tratos culturais da cana planta, da cana soca, da colheita, dos gastos administrativos e do transporte. Adicionalmente, o modelo também é capaz de avaliar a consequência nas margens da agricultura, advindas das variações de produtividade da cana, da mão de obra e insumos, em R\$/tc/ha. Pretendendo-se avaliar como se comporta, em sua composição, a margem da agricultura como função do percentual de cada atividade.

Uma área agrícola de produção de cana-de-açúcar foi considerada. O estudo abrangeu o tamanho da fazenda, em média próxima de 33.100 ha em área total para capacidade de moagem de uma unidade próxima de 2,32 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano (Mt.p.ano)¹⁴. Esta definição foi baseada em uma solução típica da Dedini S/A Indústrias de Base (OLIVÉRIO, 2003), com 12.000 toneladas diárias de cana (TCD); esta usina tem necessidade de 2,16 milhões de toneladas de cana por safra. Somados a esta justificativa o 10º Relatório de Custos de Produção do Setor Sucroenergético em 2014 aponta que as capacidades nominais de moagem consideradas para as regiões: Tradicional e de Expansão foram de 2,4 milhões de toneladas (PECEGE, 2014, p. 27).

Quanto ao tamanho da área da propriedade padrão foi definido através da relação entre produtividade média e uma necessidade e capacidade de moagem de cana-de-açúcar da usina. A produtividade média padrão adotada foi de 79,74 toneladas por hectare, média

¹⁴ 1 - O prefixo que no Sistema Internacional de Unidades (S. I.) designa o milhão (mega) representa-se com letra maiúscula: **M**. 2 - Para a tonelada, o S. I. usa o símbolo **t** (minúscula). 3 - Sublinha-se, no entanto, que, ou no início do texto se indica a redução adotada, ou devemos evitar reduções que não sejam do domínio corrente, ou a nossa redução deve ser quanto possível elucidativa. Assim, para megatoneladas por ano, poderíamos adotar a abreviatura: Mt.p.ano (SILVAS FILHO, 2006).

entre os anos. Além disto, há de se considerar as perdas, a área colhida é aproximadamente 90%.

Adicionalmente é de praxe ter a posse de um montante significativo de terras próprias ao redor da unidade industrial, da ordem de aproximadamente 67% do que é necessário para a sua produção (PECEGE, 2014, p. 30), e o restante de 33% são terras arrendadas.

O ciclo de corte adotado foi de 5 anos. O raio médio de distância da plantação até a usina padrão adotado é de 23,33 Km (PECEGE, 2014, p. 12) objetivando eliminar eventuais distorções de transporte que pudessem interferir na análise de custo.

A tentativa de atender objetivos que reflitam os custos dos processos e produtos agrícolas com alta fidelidade, esbarra em aspectos metodológicos, uma vez que não foi feito um levantamento abrangente de diferentes propriedades agrícolas e a indisponibilidade das empresas quanto a estas informações. Além da falta de estudos em um detalhamento e padronização suficientes, o que acarretou dificuldades para construção deste elo do modelo. Gujarati e Porter (2011, p. 50) levantam uma série de problemas no estudo de ciências sociais que foram levados em consideração, entre eles, a dificuldade de obtenção de dados não experimentais.

Na construção da fazenda padrão optou-se por algumas características verificadas e atribuídas a diferentes modelos de negócio, nela constata-se vantagens e desvantagens que são opções discricionárias que podem ser adotadas no elo agrícola. As opções perpassam por: plantio, tratamentos culturais, irrigação e fertirrigação, uso de mão de obra, condução da atividade da área agrícola, aproveitamento da planta e uso da terra e acesso à cana. No Quadro 06, ainda, aponta-se o tipo que foi considerado na simulação:

Quadro 06 - Opções do Modelo de Negócio Adotado para a Simulação – Elo Agrícola

Opções do Elo Agrícola		Vantagem	Desvantagem	Simulação Adotada
Plantio	Tradicional	<ul style="list-style-type: none"> • Mão de obra já habituada • Maior controle da quantidade de insumos por touceiras 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior uso de combustível, fertilizante e mão de obra 	X
	Direto (na palha)	<ul style="list-style-type: none"> • Menores custos de plantio • Preserva nutrientes do solo 	<ul style="list-style-type: none"> • Favorece a proliferação de fungos e bactérias que prejudicam a atividade • Maior complexidade na gestão de mão de obra 	
Tratos Culturais	Controle Biológico	<ul style="list-style-type: none"> • Preservação ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa escala – difícil de implementar em grandes áreas 	
	Controle Tradicional	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Know-how</i> disseminado 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos maiores 	X
Irrigação/Fertirrigação	Salvamento	<ul style="list-style-type: none"> • Supri a demanda hídrica para a planta que acabou de ser colhida no período de seca • Favorece brotamento • Economiza água 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda controle de operações apurado e equipamento preciso para o volume adequado 	X
	Complementar	<ul style="list-style-type: none"> • Permite correto crescimento da planta • Necessária em áreas de estresse hídrico 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda sistemas de irrigação complexos e flexíveis muitas vezes custosos 	X
	Suplementar	<ul style="list-style-type: none"> • Permite o plantio na região que normalmente tem estresse hídrico durante todo ano 	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de irrigação elevados • Concorrência com outros usos ambientais e sociais 	
Uso de mão de obra	Manual	<ul style="list-style-type: none"> • Exige baixa imobilização de capital • Permite limpeza “higiênica” de algumas pragas 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige grande número de safristas migrantes com distúrbios para comunidade • Impacto ambiental da queima • Menor uso de mudas 	X

	Mecanizada	<ul style="list-style-type: none"> • Menor utilização de mão de obra de safristas • Permite recolher a palha para cogeração de energia elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige altos investimentos em máquina de plantar e/ou colheitadeiras, além de uma operação dispendiosa. • Demanda mão de obra qualificada • Reduz a produtividade da cana 	X
Condução da Atividade da área agrícola	Própria	<ul style="list-style-type: none"> • Maior controle sobre os aspectos sociais e ambientais do processo 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados montantes de capital empregado nos equipamentos • Exige altos investimentos em aquisição de terras • Demanda cuidados com gestão de grande número de trabalhadores 	X
	Fornecedores	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo de ativo imobilizado • Favorece dinamismo dos pequenos empreendedores locais e contribui com a comunidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor controle sobre aspectos das relações trabalhistas dos terceiros com mesma corresponsabilidade • Aumento do Custo Operacional Efetivo (COE) 	X
Aproveitamento da Planta	Com palhada	<ul style="list-style-type: none"> • Mantém umidade e nutrientes do solo 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminui massa a ser utilizada para a cogeração de energia • Favorece a proliferação de pragas no campo 	X
	Sem palhada	<ul style="list-style-type: none"> • Mais massa para ser usada na cogeração 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificulta a manutenção de nutrientes do solo • Emite mais gases do efeito estufa (GEE) 	X
Uso da Terra e acesso a cana	Terra e cana próprias da usina	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo contínuo de matéria-prima • Maior controle sobre as variedades e qualidades adotadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior imobilização de capital 	X
	Terra e cana de terceiros	<ul style="list-style-type: none"> • Menor responsabilidade trabalhista • Menor imobilização do capital • Menor responsabilidade ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor compartilhamento do risco do preço • Insegurança quanto ao fluxo da matéria-prima 	X

Fonte: o autor adaptado e ampliado de Postal (2014)

3.12 Usina Padrão

Quanto ao elo industrial, se propôs a modelar diferentes tipos de plantas industriais, tomando por base uma unidade com capacidade de moagem da ordem 2,32 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra¹⁵, considerada de valor médio, onde foram avaliados o padrão tecnológico da mesma, em forma de eficiências e caldeiras em diferentes tecnologias de vapor e temperatura, segmentados em torno de 21 bar, 45 bar, 65 bar e 100 bar de pressão.

Mais especificamente, também foi objeto de estudo a eficiência dos moedores na extração do açúcar, na fermentação e destilação, na eficiência global, nas perdas em torta de filtro, e na lavagem da cana.

As consequências da variação do teor de açúcares totais recuperáveis (ATR) da cana-de-açúcar, custos de operação e manutenção, bem como os valores das parcelas de amortização dos investimentos foram contempladas na simulação. Outra questão de extrema relevância, incluída nesse trabalho, foi os desembolsos necessários para suportar a geração de vapor, assim como a biomassa a ser adquirida, para permitir a geração de energia elétrica na entressafra.

É considerada uma usina padrão, uma unidade na qual são processadas 12 mil toneladas de cana-de-açúcar diárias (12.000 TCD), produzindo bioetanol hidratado/anidro e açúcar, durante aproximadamente 180 dias (ciclo da colheita da safra de cana-de-açúcar). Os dados utilizados para simular as operações unitárias foram obtidos de locais industriais e da literatura.

Foram definidos quatro níveis tecnológicos que seguem os tipos diferentes de pressões de caldeiras em torno de: 21 bar, 45 bar, 65 bar e 100 bar. As definições de pressão e temperatura de caldeira seguem uma aproximação de valores encontrados no mercado (PERDONÁ, 2013) e foram criadas com o intuito de representar os níveis tecnológicos diferentes presentes na cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar brasileira. A eficiência industrial e a energia elétrica excedente seguem o nível tecnológico.

¹⁵ A tabela de parâmetros da fazenda padrão e da usina padrão está descrita em conjunto na página 133.

Os parâmetros de funcionamento e de processo das usinas foram obtidos em diversas fontes, inclusive de dados reais de indústrias em sua operação. As usinas utilizadas como base para a adaptação estão relacionadas no Quadro 07 e no Apêndice IV. O detalhamento de suas características está no próximo item.

3.13 Detalhamento das Características da Modelagem das Usinas Padrão

I - 21 bar:

Esta usina representa um modelo antigo, *entre 21 a 22 bar de pressão e 280 a 310° C*, produzida sobretudo no final da década de 1970 e 1980. Possui instalação típica, onde se utilizam caldeiras de baixa eficiência para fazer a queima do bagaço, que operam com baixa pressão e baixo aproveitamento técnico. O Vapor que é gerado pelas caldeiras é utilizado em turbinas de simples estágio com baixa eficiência térmica, que transforma energia térmica em energia mecânica para o acionamento de moendas ou transformadas em energia elétrica através de um gerador. Esse cenário acontece em usinas mais antigas do país, que operam há algumas décadas e não foram feitas modernizações no seu parque industrial. Esta usina foi um marco na autossuficiência de energia para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Seus equipamentos têm eficiência, em geral, baixa.

II - 45 bar:

Esta usina representa um modelo *entre 42 a 45 bar de pressão e 400 a 450 ° C*, com maior utilização na década de 1990. Possui instalação típica, onde se utilizam caldeiras de média eficiência para fazer a queima do bagaço, que operam com média pressão e médio aproveitamento técnico. O Vapor, que é gerado pelas caldeiras, é utilizado em turbinas de simples estágio com média eficiência térmica, que transforma energia térmica em energia mecânica para o acionamento de moendas ou transformadas em energia elétrica através de um gerador. Esse cenário acontece em muitas usinas do país, que operam há poucas décadas e foram feitas modernizações pontuais no seu parque industrial. Seus equipamentos têm eficiência, em geral, média.

III - 65 bar:

Esta usina representa um modelo *de 60 a 68 bar de pressão, a uma temperatura de 480 a 520° C*. Possui instalação de uma caldeira de alta pressão com eficiência térmica elevada, que possibilita a otimização do uso de combustível. Normalmente, o gerador de simples estágio foi substituído por uma turbina multiestágio de condensação, que possui baixo consumo específico de combustível, possibilitando uma maior geração de energia elétrica para a mesma quantidade de combustível. Nesse cenário, observamos que é comum nesta classe de usinas optarem por fazer o *retrofit* em seu parque industrial. Normalmente faz a venda de energia elétrica à rede. Seus equipamentos têm eficiência, em geral, média.

IV - 100 bar:

Esta usina representa os projetos mais novos, mais atuais. Variando *de 90 a 120 bar de pressão, 520 a 540° C*. Possui instalação de uma caldeira de altíssima pressão com eficiência térmica elevada, que possibilita a otimização do uso de combustível. Normalmente, as turbinas de acionamento mecânico de picadores, desfibradores e moagem foram substituídas por motores elétricos de alta eficiência, assim o vapor que antes era destinado às turbinas, agora, são direcionados a um gerador. Fazem a venda de eletricidade, possuem ganho de energia elétrica excedente e muita utilização da eletrificação em substituição ao vapor ou equipamentos de energia mecânica. No cenário atual, observamos que é comum a instalação através de *greenfields*. Seus equipamentos têm eficiência, em geral, alta.

No Quadro 07, apontam-se algumas considerações técnicas adotadas para o desenvolvimento do modelo e simulação das usinas típicas padrão. Foram utilizados dados reais com algumas adaptações.

Quadro 07 - Detalhamento de alguns Dados Técnicos e Considerações de Desenvolvimento do Modelo das Usinas Padrão

Usina Padrão	I 21 bar	II 45 bar	III 65 bar	IV 100 bar
Pressão	21 a 22 bar	42 a 45 bar	60 a 68 bar	90 a 120 bar
Faixa de Temperatura	300° C	400-450° C	450-520° C	520-540° C
Ano de Fabricação¹⁶	2007	2002	2001	2012
Capacidade média	2,32 Mt.p.ano	2,32 Mt.p.ano	2,32 Mt.p.ano	2,32 Mt.p.ano
Área Plantada média	33,1 mil hectares	33,1 mil hectares	33,1 mil hectares	33,1 mil hectares
Potência Instalada	12MW	18MW	41MW	45MW
Consumo próprio	10MW	10MW	16MW	14MW
Potência Excedente	2MW	8MW	25MW	31MW
Preço de Venda médio	169,9 MW/h	169,9 MW/h	169,9 MW/h	169,9 MW/h
Energia por Tonelada de Cana	3,72 kWh/tc	11,17 kWh/tc	37,93 kWh/tc	57,46 kWh/tc
Valor Ganho por Tonelada de Cana	0,63 R\$/tc	2,53 R\$/tc	6,44 R\$/tc	9,76 R\$/tc
Usina de adaptação principal*	<ul style="list-style-type: none"> • Catanduva 	<ul style="list-style-type: none"> • Santa Cândida • Serra 	<ul style="list-style-type: none"> • Cerradinho • Santa Isabel • São Martinho • Univalem 	<ul style="list-style-type: none"> • Barra • Jataí • Univalem
Método	Potência Excedente	Potência Excedente	Dados de Produção da Raízen	Dados de Produção da Raízen

*Veja apêndice

Fonte: o autor

¹⁶ Para recolhimento dos dados de valor *turn-key*

O Quadro 08, resume o detalhamento das características da Usina Padrão, além de informações complementares:

Quadro 08 - Detalhamento das Características da Modelagem das Usinas Padrão

Usina Padrão	I 21 bar	II 45 bar	III 65 bar	IV 100 bar
1ª geração de produção de etanol	X	X	X	X
Venda de bagaço excedente	X			
Queima de bagaço excedente		X	X	X
Venda de bioenergia		X	X	X
Uso de outras biomassas durante a entressafra		X	X	X
Eletrificação em substituição ao vapor			X	X
Produção superior a 30 MW				X

Fonte: o autor

Para a determinação dos valores *turn-key* das usinas padrão foram utilizados quatro métodos. O custo total de investimento da planta foi obtido levantando os custos *turn-key* de diferentes tipos de usinas obtidas na literatura, de diversos outros projetos de *retrofits* auferidos para tentar separar o custo total da planta do seu sistema de cogeração e através de contato direto com fornecedores, para as usinas padrão de 21 bar, 45 bar, 65 bar e 100 bar. Veja o Quadro 09:

Quadro 09 - Detalhamento dos Valores *Turn-key*

Usina	Valor <i>Turn-key</i>	Método*
I – 21 bar	279.100.000	Valor base – cogeração
II – 45 bar	314.051.000	Valor base
III – 65 bar	394.361.000	Valor base + cogeração
IV – 100 bar	518.821.000	Média ponderada

*veja apêndice

Fonte: o autor

Na construção da usina padrão optou-se por algumas características verificadas e atribuídas a diferentes modelos de negócio, nela constata-se vantagens e desvantagens que são opções discricionárias que podem ser adotadas no elo industrial. As opções perpassam por: *mix* de produção, cogeração e reuso da água. No Quadro 10, ainda, aponta-se o tipo que foi considerado na simulação:

Quadro 10 - Opções do Modelo de Negócio Adotado para a Simulação – Elo Industrial

Opções do Elo Industrial		Vantagem	Desvantagem	Simulação Adotada
Mix de produção	Só açúcar	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinário e processo dedicados • Menor complexidade de gestão 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração em um único mercado aumentam os riscos. 	
	Só etanol	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinário e processo dedicados • Menor complexidade de gestão 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração em um único mercado aumentam os riscos. 	
	Mix	<ul style="list-style-type: none"> • Diversificação de produtos permite atuar em diferentes mercados e tem a funcionalidade como <i>hedge</i>¹⁷ em momentos de crise 	<ul style="list-style-type: none"> • Processos mais complexos e investimento inicial mais custoso. 	X
Cogeração	Com exportação de eletricidade	<ul style="list-style-type: none"> • Mais receita • Menor geração de resíduos (bagaço) • Melhor aproveitamento energético e balanço de Gases do Efeito Estufa 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior custo do investimento inicial 	X
	Sem exportação de eletricidade	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo de ativo imobilizado • Possibilidade de venda de bagaço 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor receita e rentabilidade 	X
Reuso da água	Com reuso	<ul style="list-style-type: none"> • Economia de água em época de escassez desse recurso natural 	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento em reorganização de processos e maquinário 	
	Sem reuso	<ul style="list-style-type: none"> • Menor investimento inicial 	<ul style="list-style-type: none"> • Desperdício • Falta de responsabilidade ambiental 	

Fonte: o autor adaptado e ampliado de Postal (2014)

¹⁷ *Hedge* é um mecanismo que tem objetivo de proteger operações financeiras com exposição a grandes variações de preços, protegendo o investidor do chamado risco de mercado, ou seja, do risco de exposição a volatilidade de determinados ativos. A estratégia consiste em assumir uma posição comprada ou vendida em um derivativo (Contratos Futuros, Opções, Termo) ou investimento, visando minimizar ou eliminar o risco de outros ativos como: *commodities*, moedas e ações (ESTEVAM; CAIXETA, 2015). “Todos os contratos são finalmente ajustados, seja pela liquidação com uma operação contrária (uma compra após uma venda inicial ou uma venda após uma compra inicial) ou pela entrega da mercadoria no mercado físico. Uma transação contrária é o método mais frequentemente usado para liquidar um contrato futuro. A entrega física acontece em menos de 2% dos casos para todos os contratos agrícolas negociados” (CME GROUP, 2009).

3.14 Usinas de etanol, de açúcar e de tipo misto

Ramos (2011) destaca que, desde a década de 1970, existe um crescimento de usinas anexas ou também chamada de tipo misto, o qual produzem etanol e açúcar. Em janeiro de 2008, segundo o Mapa (2008) existiam 372 unidades industriais, 240 mistas, sendo 117 destilarias autônomas (usinas que só produzem etanol) e apenas 15 usinas que produziam somente açúcar. De fato, Santos, Garcia, Shikida (2015) apontam que levantamento da safra de 2012/13 existiam 402 usinas, nas quais, 257 tinham a característica mista. Neste estudo foram consideradas usinas anexas ou também chamada de tipo misto, produtoras de etanol e açúcar, as quais 80% das unidades industriais concentram-se na região Centro-Sul (Tradicional e Expansão), do total de usinas produtoras de açúcar e álcool (MAPA, 2016).

Nota-se a existência de uma divergência no número de usinas *em funcionamento*, uma imprecisão percebida por conta do diferente número de usinas encontradas em variadas fontes, o que impossibilitou de conhecer o número real com acurácia.

O mesmo pode ser dito para ociosidade do setor ano a ano, o qual varia em grande grau. Para uma quantidade disponível de cana-de-açúcar de 100%, normalmente, se estabelece uma planta industrial com capacidade de 120%, ou seja, 20% de ociosidade (POSTAL, 2014). Os parâmetros obtidos foram tabulados para construir a simulação, possibilitando comparações.

A decisão do modelo de negócio no elo industrial abrange as proporções do *mix* de produção. Existe alguma capacidade de mutabilidade no sistema industrial, no entanto, é no instante da implementação do projeto e, por conseguinte, do dimensionamento dos equipamentos, que é estabelecido um limite de flexibilidade, principalmente na produção das usinas mistas de açúcar e etanol, bem como, nas proporções utilizadas do ATR proveniente da cana-de-açúcar. De acordo com profissionais do setor de projetos industriais, o padrão da indústria está em torno de 40% a 60% para açúcar ou etanol, dependendo da conveniência de preços da ocasião, com a possibilidade de chegar a 30% a 70%, em novos projetos (POSTAL, 2014) onde se permite uma margem de manobra mais favorável e maior capacidade de captura de valor referente às oscilações de preços de curto prazo.

Considera-se que o atributo de capacidade ‘flexibilidade de produção’ é um valor em si mesmo para a resiliência. Veja Quadro 11, que o percentual médio da receita do ano 2012/13 foi de 20% para eletricidade e 40% para o açúcar e etanol:

Quadro 11 - Detalhamento das Características do *Mix* de Produtos das Usinas

Principais produtos	Prazo contratual médio	Atributo de importância para usina	Compradores	% média da receita (2012/13)	Principais atores	Usinas produtoras 436 total ¹⁸ (2012/13)
Energia Elétrica	Longo Prazo	Segurança e Margem	Leilões da EPE/ANEEL e venda direta a grandes consumidores	20	ANEEL e ONS	111
Etanol	Curto Prazo	Margem	Distribuidoras e <i>Tradings</i>	40	Petrobras, Ipiranga, Shell, Alesat e <i>tradings</i> como BP, Alcotra.	357
Açúcar	Curtíssimo Prazo (<i>spot</i> ¹⁹)	Alta liquidez e Margem	<i>Tradings</i> , atacadistas, cadeias varejistas, grandes indústrias	40	Cargill, Bunge, ADM, Dreyfus, Carrefour, Grupo Pão de Açúcar, Nestlé, Ambev.	402

Fonte: o autor adaptado de Postal (2014)

¹⁸ Cada unidade pode produzir mais de um produto, portanto esta coluna não representa somatória.

¹⁹ “Mercado no qual são negociadas quantidades marginais do produto não cobertas por contratos. O mercado spot considera a oferta e a demanda do produto no momento da negociação de compra e venda para entrega imediata” (ANP, 2016).

Desta maneira, adotou-se que uma fazenda e usina padrão possuem uma série de parâmetros, indicados na Tabela 02, os quais foram perfilhados para a realização da simulação, tais como: indicadores, valores e unidades.

Indicadores	Valor	Unidade
Área total produtiva média	Próximo a 30.000	ha
Produtividade média inicial	79,74 (varia com o ano)	t/ha
Cortes por ciclo	5	n
Raio médio	23,33	Km
% de colheita mecanizada	65-90	%
Arrendamento praticado	33	%
Área colhida	90	%
ATR recuperável na Cana	Varia com o ano	ATR
Necessidade de Cana/Usina	Próximo a 12.000 TCD	t/ha
Dias de Moagem	180	dia
Tipo de Caldeira	21 – 45 – 65 – 100 (em torno)	bar
Eficiência Industrial	Varia de acordo com o tipo de usina	%
Energia elétrica excedente	Varia de acordo com o tipo de usina	MW/h

Tabela 02 - Informações Complementares: Parâmetros utilizados

Fonte: o autor

3.15 Índice de Mecanização e Operações Mecanizadas

É importante diferenciar o uso nesse trabalho do Índice de Mecanização das Operações Mecanizadas, apesar de sua relação. Define-se o primeiro como o percentual de substituição de processos agrícolas realizados por mão de obra manual por processos mecanizados (o qual o índice é normalmente extraído da colheita). O segundo trata de um dos três componentes formadores do custo total do elo agrícola, que adicionado à mão de obra manual e aos insumos compõem a totalidade de custos de cada etapa do processo produtivo do elo agrícola.

O Índice de Mecanização, normalmente, está fortemente associado com o processo da colheita feita de maneira mecanizada e de menor forma no plantio mecanizado, que vem crescendo no Brasil. No modelo de simulação desenvolvido, quanto maior o Índice de Mecanização, menor é o uso de mão de obra manual no campo e vice-versa. Desta maneira, o Índice de Mecanização afeta diretamente as Operações Mecanizadas que *são os trabalhos realizados fisicamente*, com o uso de máquinas agrícolas. Em cada uma das etapas produtivas, todos os trabalhos físicos podem ser realizados apenas de duas maneiras: por mão de obra manual ou por máquinas agrícolas.

O uso de mão de obra manual ou mecanizada tem restrições. Uma delas é a legislação, que limita alguns tipos de afazeres, por isso, nem todas operações podem ser realizadas totalmente por máquinas ou pessoas. Ainda, ressalta-se, a existência da opção do gestor no comando do seu negócio quanto à tomada de decisão de uso de um ou outro e a restrição tecnológica (como terrenos com alto índice de declividade).

3.16 Eficiências do Processo

As preocupações com as eficiências agrícolas e industriais apresentaram avanços ao longo do tempo, evidenciados, também, nos indicadores de produtividade, sendo oriundas especialmente de inovações biológicas, físico-químicas, mecânicas, do reaproveitamento mais intensivo do bagaço para a cogeração de energia e de inovações associadas às novas formas de organização do trabalho, métodos de produção e gerenciamento global da produção agrícola e industrial (SHIKIDA; PEROSA, 2012).

As perdas industriais comumente ocorrem em cada etapa produtiva como a recepção, a limpeza e preparo da cana, a moagem ou extração do caldo, o tratamento do caldo, a fermentação e destilação, além de perdas indeterminadas pelo processo industrial. Para cada uma destas etapas, uma menor quantidade de ATR é disponibilizada ao processo seguinte. As eficiências médias consideradas na modelagem e simulação foram (Tabela 03):

- a) Recepção, Limpeza e Preparo da cana:
 - Próximo a 99,00% de eficiência padrão considerada.
- b) Moagem ou extração do caldo:
 - Próximo a 96,30 % de eficiência padrão considerada.
- c) Tratamento do Caldo e Torta de Filtro:
 - Próximo a 99,46% de eficiência padrão considerada.
- d) Fermentação:
 - Próximo a 89,5% de eficiência padrão considerada.
- e) Destilação:
 - Próximo a 99,6% de eficiência padrão considerada.

f) Outras perdas menores foram consideradas: perdas evaporativas, teor de álcool na vinhaça, perdas gerais como fugas, vazamentos, resíduos e centrifugação, totalizando:

- A eficiência padrão considerada para Outras Perdas foi de 96,0%.

Foi adotado a eficiência média para os padrões de usinas padrão de 21 bar, 45 bar e 65 bar de pressão e a eficiência máxima para a de 100 bar de pressão.

Processo	Eficiência Média Considerada	Eficiência Máxima Considerada
Recepção, Limpeza e Preparo da cana	99,00%	99,53%
Moagem ou Extração do Caldo	96,30%	97%
Tratamento do Caldo e Torta de Filtro	99,46%	99,5%
Fermentação	89,5%	92%
Destilação	99,50%	99,50%
Outras perdas	96,00%	96,00%

Tabela 03 - Resumo das Eficiências Industriais consideradas na Simulação
 Fonte: CGEE (2004); Marques (2009); PES (2017); CGEE, (2009); Novacana (2007)

3.17 Cálculo dos Tributos

Na apuração do desconto TUSD/TUST empregada nesta tese, observou o percentual final de redução a ser aplicada pelas distribuidoras e transmissoras às tarifas de uso. Além disto, existem diferenças entre contratos firmados entre usinas e clientes, variando de acordo com o leilão de energia da ANEEL. Para sanar estas diferenças no modelo de simulação adotou-se um valor padrão para os quatro tipos de usinas padrão.

No Quadro 12, é demonstrado o cálculo para incidência de impostos sobre o produtor de etanol. Baseou-se em dados reais de uma usina paulista. O modelo da planilha utilizado para realizar o cálculo foi baseado no estudo sobre a carga tributária dos combustíveis de Rezende; Nakao; Abrão (2011). Quanto aos tributos do açúcar, para fins práticos, foi considerado o mesmo do etanol, o qual um estudo futuro pode aprimorar este cálculo:

Quadro 12 - Cálculo dos Tributos sobre o Etanol

A. Preço de realização	R\$ 0,8656
B. Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico – CIDE	R\$ 0,00
C. PIS/PASEP	R\$ 0,02143/L
C. COFINS	R\$ 0,09857/L
D. Preço de Faturamento sem ICMS	Ø
E. ICMS produtor $E = [(D/(1 - ICMS\%)) - D (5) 12\% = 1,12 \times 0,12]$	R\$ 0,1344
F. Preço de faturamento do produtor com ICMS $F = D + E$	R\$ 1,1200

Fonte: o autor

3.18 O Modelo Completo e seus Subsistemas

O modelo completo foi utilizado para entender, descrever e emular o comportamento de um sistema realista o suficiente para os elos agrícola e industrial da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Assim, os blocos criados representam o funcionamento de pequenas estruturas do processo, sendo útil no entendimento do desempenho interno, permitindo uma visualização e a construção da estrutura matemática por trás da concepção deste modelo. Nesse enfoque, para atender o propósito, desenvolveu-se uma série de quatro figuras, onde cada bloco ou linha possui um valor ou função matemática.

3.18.1 O Modelo de Simulação para o Elo Agrícola

No desenvolvimento desta fase, levantou-se diversas publicações onde foi possível estimar estes percentuais do processo agrícola, no qual, neste ponto, obteve-se também, informações internas da indústria. Procurou-se o máximo mitigar as distorções encontradas entre as diferentes regiões do Brasil, mas, uma vez que o trabalho é limitado a usinas do tipo mista, a amostra do elo agrícola ficou concentrada na a região Centro-Sul.

Para o primeiro teste de aderência do modelo de simulação resgatou-se os valores totais de custo operacional do ano de 2007, escolhido aleatoriamente, obtidos no PECEGE. Entendendo o comportamento deste ano, expandiu-se para montar e comparar todo o intervalo, buscando utilizar o máximo de dados empíricos obtidos.

O modelo de simulação determinou um custo associado (R\$/tc) por cada fase do processo ou etapa produtiva do elo agrícola:

- Preparo de solo;
- Plantio;
- Tratos culturais de cana planta;
- Tratos culturais de cana soca;
- Colheita.

Obteve-se os percentuais relativos (em %) em relação ao total, para os anos de 1998 a 2014. As somas dos custos associados nas fases do processo resultaram em seu custo total (R\$/tc) por ano, veja Figura 16.

- As operações mecanizadas, mão de obra manual e insumos são componentes percentuais que formam cada fase do processo ou etapa produtiva, cujo somatório preenche 100% do custo de cada etapa. Também, estão os custos administrativos rateados por cada etapa.
- Somado aos custos associados, estão o custo de carregamento e transporte ou simplesmente de transporte, onde se observou o raio médio.
- O preço da terra, produtividade, e porcentagem de mecanização são variáveis que foram alterados de acordo com o ano desejado, pois cada ano possui seu valor empírico específico que afeta o valor do custo total/ano (R\$/tc/ano).
- O percentual de arrendamento deste modelo foi considerado fixo em uma proporção de 67% de terra própria e 33% de terra de terceiros²⁰.
- O preço pago ao produtor tem seu valor empírico e é inserido de acordo com o ano.
- Para a produtividade, os valores utilizados seguiram o valor médio brasileiro para determinado ano. O modelo apresenta um desempenho melhor de respostas dentre a faixa de 65 a 90 toneladas por hectare para seus resultados, mesma faixa onde se obtiveram os valores empíricos.

²⁰Ressalta-se que o preço da terra, dentro deste modelo, afeta os custos apenas dentro do percentual arrendado – ou as terras de terceiros utilizadas, a explicação para isto está à frente, no tópico Custos.

- A porcentagem de mecanização segue o padrão observado para cada ano na literatura, onde varia de 65 a 90%, mas, o modelo tem capacidade de ser variado de 50 a 100%.

Pela metodologia de construção do modelo, a apropriação dos custos pode ser observada por dois modos: pelas etapas produtivas como, plantio, colheita, etc. ou pelas composições de custos: os quais são divididos em gastos com as operações com mão de obra manual, operações mecanizadas e insumos. As operações mecanizadas que os gestores agrícolas utilizam ao longo do tempo, se diferem. Por exemplo, na colheita no ano de 2008 o percentual de mecanização estava em torno de 50% e saltou em 2012 para algo em torno de 85%. No entanto, sabe-se que cada uma das etapas produtivas tem seu percentual de uso de operações mecanizadas as quais foram ajustadas anualmente no modelo.

O resultado do somatório deste elo é o Custo Operacional Efetivo (COE) de produção de cana-de-açúcar e assim, com a diferença de preço pago ao produtor de cana, obtemos a margem do produto cana-de-açúcar entre os anos de 1998 a 2014, formando um relatório com 16 saídas para o elo agrícola.

Figura 16 – Modelo Elo Agrícola

Fonte: o autor

3.18.2 O Modelo de Simulação para o Elo Industrial

O elo industrial se inicia recebendo as entradas de preço, margem e quantidade da cana-de-açúcar entregue à usina, por ano.

O processo continua por quatro diferentes tipos de padrões tecnológicos estabelecidos de acordo com as usinas padrão de 21 bar, 45 bar, 65 bar e 100 bar de pressão, com a capacidade de recebimento e processamento de cana pré-estabelecida em 12000 TCD – toneladas de cana diárias para cada uma.

Somam-se ao processo os valores de:

- insumos industriais (dados do PECEGE);
- os custos de operação industrial por tipo de usina padrão;
- os custos administrativos e outros gastos como laboratórios e tratamento de água;
- do custo da parcela de investimento da planta. Esta parcela é obtida com o custo total *turn-key*, mais a taxa de juros, spread e tempo de amortização obtidos no BNDES;
- a ociosidade e ATR foram valores empíricos e considerados como o padrão de cada ano.

Cada uma das fases ou etapas produtivas industriais têm sua eficiência de acordo com os quatro padrões tecnológicos:

- Recepção, limpeza e preparo;
- Moagem;
- Tratamento de caldo;
- Filtração;
- Outras perdas.

Suas eficiências produtivas são importantes levantamentos empíricos para determinação das perdas de ATR, por etapa produtiva. Assim, são aplicados um multiplicador de acordo com suas respectivas eficiências, que variam de acordo com os tipos de usinas padrão, diminuindo o ATR disponível para a produção dos produtos: açúcar ou etanol. A porcentagem de ATR que vai para cada produção (açúcar ou etanol) obedece à média brasileira. Procurou-se, alternativamente, separar os diferentes processos industriais como fermentação e destilação em termos de custos, como feito no elo agrícola, mas, optou-se por não os realizar pela baixa informação disponível.

Os ATRs disponíveis para a produção de açúcar ou etanol sofrem novas baixas em seus respectivos processos industriais:

- Evaporação;
- Cozimento;

- Centrifugação;
- Secagem;
- Fermentação;
- Destilação;
- Desidratação.

Aos dois tipos de etanol (hidratado ou anidro) e ao açúcar aplicam-se os tributos e obtendo-se, assim, os custos parciais dos produtos.

Com preço pago aos produtores de açúcar e etanol obtido na literatura para cada ano (de 1998 a 2014), são retirados os custos parciais dos produtos, adicionada a margem obtida pelo elo agrícola (positiva ou negativa), como também, adicionada à margem (positiva ou negativa) da cogeração para chegar aos valores finais de margens por padrão tecnológico e ano, formando um relatório com 64 saídas do elo industrial e final.

Para o resultado do volume produzido de etanol e açúcar foi necessário calcular a eficiência operacional padrão de cada usina padrão, que é obtido com as eficiências produtivas. A eficiência operacional padrão foi multiplicada por um fator de conversão médio para o etanol anidro, hidratado e açúcar, além da quantidade de cana processada durante a safra.

Na Figura 17 ilustra o modelo de simulação para o elo industrial.

Figura 17 – Modelo do Elo Industrial sem detalhamento da Cogeração

Fonte: o autor

3.18.2.1 O Modelo de Simulação para o Sistema de Cogeração

O custo de cogeração é determinado pelo custo de investimento industrial da caldeira, taxa de juros, spread e amortização disponibilizados pelo BNDES²¹, formando uma parcela a ser debitada no modelo. Soma-se aos custos de operação deste subsistema uma pequena parcela de outros custos incidentes (ver Apêndice I).

Foi realizado um balanço energético simplificado, que corroborando os dados empíricos obtidos de usinas, verificou-se que as usinas padrão de 45 bar, 65 bar e 100 bar, mais

²¹ Amortização é um processo que extingue dívidas através de pagamentos periódicos, é a extinção de uma dívida através da quitação da mesma e aqui, nesta cadeia de suprimentos, foi definida de acordo com os dados obtidos pelo BNDES. No entanto, sabe-se que diferentes equipamentos possuem vida útil diferentes, como até 50 anos para caldeiras e 20 a 30 anos para moendas.

eficientes, têm energia significativa para vender à rede, enquanto que a usina padrão de 21 bar, por ser menos eficiente, tem pouco excesso de bagaço, na ordem de 7% de sobra. Neste modelo, esta sobra é vendida a preço corrente no mercado, que entra como uma receita para a usina de 21 bar de pressão.

A receita de venda de energia elétrica foi obtida multiplicando a energia elétrica excedente (diferente para cada padrão tecnológico) pelo seu preço anual, descontando os tributos de TUST ou TUSD. Altos tributos e baixas eficiências afetam negativamente diminuindo a margem.

Para os três tipos de usinas padrão que venderam energia à rede são somados os custos de bagaço e operação despendidos na entressafra e acrescentado a margem financeira proveniente desta operação. O modelo da cogeração pode ser esquematizado pela Figura 18:

Figura 18 – Modelo de Cogeração

Fonte: o autor

3.18.3 O Modelo Simplificado Completo

A Figura 19 ilustra o modelo simplificado completo. Mostrando-se o elo agrícola e o elo industrial, bem como suas interdependências simplificadas, observando que atende aos quatro tipos de usinas padrão. Ao lado direito podemos observar os *inputs* necessários para simulação:

Figura 19 - Modelo Completo Simplificado

Fonte: o autor

3.19 Execução da Simulação

Ao término da etapa de construção teórica e matemática, o modelo de simulação tornou-se operacional, estando pronto para ser utilizado. Execução das rodadas de simulação – consiste na atividade do programa de acordo com os parâmetros especificados na etapa anterior. A Figura 20, mostra um exemplo de uma rodada do simulador da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Simulador de Custos da Cadeia de Suprimentos Cana-de-Açúcar/Etanol - Simulador Industrial - 2004			
capacidade 12.000 TCD - 2,32 milhoes t/safra 31 mil hectares			
	Variável		
input	Capacidade de moagem por safra do simulador	2.320.000	toneladas
input	Preço da cana	70,12	R\$/t
input	Preço da biomassa (bagaço de cana, cavaco de madeira, e outras biomassas)	35,06	R\$/t
input	Preço de venda de energia	169,9	R\$
input	Volume brasileiro total produzido etanol hidratado	19,6	bilhões de litros
input	Volume brasileiro total produzido etanol anidro	8,02	bilhões de litros
calculado base Dedini, Raizen	Preço turn key da Usina	468.820.000,00	R\$
input BNDES	Taxa de Financiamento/Juros/Spread/tempo de amortização	6% + 2,5%, 20 anos	
input	Juros BNDES	4,5	i
input	Spread	2,5	n
input	Inflação	6,03	%
input	amortização/prazo	20	anos
Informação	Caldeira até 21 bar (300°)	0	
Informação	Caldeira de 40 - 45 bar (400° - 410°)	0	
Informação	Caldeira de 60 - 65 bar (450° - 480°)	0	
Informação	Caldeira de 100 bar (540°)	X	
input	Moagem	96,3	eficiência
	Tratamento do caldo	n/d	
input	Fermentação	89,7	eficiência
input	Destilação	99,45	eficiência
input	Lavagem da cana	99,53	eficiência
input	Torta de filtro	99,46	eficiência
sim/não	Cogeração	Sim	sim/não
sim/não	Venda de eletricidade	Sim	sim/não
calculado (BNDES)	Custo de investimento	0,00	R\$/t
calculado com base na Pecege	Operação & Manutenção	5,68	R\$/t
input	Insumos Industriais	3,08	R\$/t
sim/não	Venda de bagaço	não	
input	ATR	139	padrão 139,97
calculado	Eficiência Operacional	0,850405336	
input	Conversão ATR "etanol hidratado"	1,732694662	Fator de conversã
input	Conversão ATR "etanol anidro"	1,808257476	De acordo com o r
calculado	Conversão ATR "média"	1,754635783	
calculado	Litros por tonelada de cana médio de "hidratado" e "anidro"	79,2187	
calculado	TOTAL CUSTO por litro	0,9957	R\$/L
calculado	TOTAL CUSTO por tonelada	78,8800	R\$/t
calculado	Tributos por tonelada (PIS - COFINS - ICMS) "etanol hidratado"	22,6495	R\$/t
calculado	Tributos por litro (PIS - COFINS - ICMS)	0,2859	R\$/L
calculado	Total Custo + tributos (produtor) por litro	1,2816	R\$/L
calculado	Energia elétrica excedente valor (depende da caldeira)	9,76	R\$/t
calculado	biomassa necessária para operar na entressafra	90.034,5	toneladas
input "0" padrão	fator de ociosidade para biomassa da safra	0,0	
calculado	Custo da biomassa por tonelada (comprada para geração de entressafra)	1,360607573	R\$/t
calculado	Custo da biomassa por litro (comprada para geração de entressafra)	0,0172	R\$/L
calculado	Ganho de uso de biomassa na entressafra = igual safra	9,76	R\$/t
calculado	(tributos do produtor independente) TUST ou TUSDg por MW/h	0,1708	R\$/t
calculado	(tributos do produtor independente) TUST ou TUSDg <30 MW por MW/h	0,0854	R\$/t
calculado	Energia elétrica excedente líquido (i.e, sem tributos do produtor independente)	18,07399243	R\$/t
calculado	Energia elétrica excedente líquido (i.e, sem tributos do produtor independente)	0,228153049	R\$/L
input	Preço do etanol pago ao produtor "hidratado"	1,38259	R\$/L
input	Preço do etanol pago ao produtor "anidro"	1,52943	R\$/L
calculado	Preço médio ponderado	1,425227828	R\$/L
Calculado	Margem	0,3717	R\$/L
Calculado	litros produzidos	183.787.429	
Calculado	MARGEM BRUTA	68.322.210,10	R\$

Figura 20 - Exemplo do Simulador da Cana-de-Açúcar / Etanol para o ano de 2004/100 bar

Fonte: o autor

A utilização da simulação necessitou das inserções dos ‘*inputs*’, para cada ano selecionado. De modo geral, a simulação entre os diferentes níveis tecnológicos é bastante semelhante em sequência estrutural e matemática dentro do modelo, se diferenciando, principalmente, em relação a valores relativos a suas características técnicas, como nível de eficiência, custo de operação e investimento.

Um ponto muito importante, incluído durante o processo de simulação, é a relação da escala produtiva apresentada ao longo dos anos. Incluiu-se um fator, o qual foi aplicado tanto ao elo agrícola, quanto ao elo industrial, que aumenta gradualmente a escala da fazenda e usina padrão.

O fator de escala que inclui o aumento de custo de capital como a saída do sistema, para uma configuração de usina padrão, foi determinado pelo custo atualizado da instalação de maior valor, de 100 bar, pela diferença na proporção da mais econômica, de 21 bar, formando a magnitude do fator de escala R. Este fator de escala R é um exponencial aplicado a magnitude e, os fatores de escala variaram entre 1,0 a 1,11.

Gerou-se 16 relatórios de saída – que produziram informações estatísticas, como o custo, margem, litros produzidos, energia excedente, para cada um dos quatro níveis tecnológicos, formando 64 relatórios de saída.

Por meio deste corolário, destacamos, portanto, duas questões importantes ao se obter desfecho do modelo de simulação:

- qual foi o custo estimado médio por tipo de usina padrão e ano;
- e qual é margem disponível por tipo de usina padrão para certo ano.

Estes resultados foram utilizados para a construção da curva de experiência e para curva de performance.

3.20 Análise de Sensibilidade e Validação do Modelo

3.20.1 Análise de Sensibilidade do Elo Agrícola

A diversidade de sistemas e arranjos de produção ilustram a complexidade da atividade. A identificação dos custos por etapas, como a de preparação do solo e plantio, de tratos

culturais e de colheita está demonstrada na Tabela 04, onde observamos uma análise de sensibilidade, variando 20% cada um dos fatores positivamente e negativamente, obtendo resultados diferentes (em porcentagem e R\$/t) para os custos do elo agrícola. Com isso, o resultado pode ser utilizado para compreender o peso que cada etapa produtiva e de outros elementos que afetam o todo, como os efeitos da produtividade, da mão de obra e do uso do maquinário. A variação dos parâmetros consegue observar diversas respostas de saída. A análise de sensibilidade está descrita na Tabela 04, onde observa-se o custo agrícola por etapa produtiva, os percentuais correspondem ao peso de cada operação:

	Etapas	Valor no Modelo (%)	Variação	Resultado (%)	Margem (R\$)	Max/Min
1	Preparo do solo	2,32	20%↑	100,48%	7,083	0,93%
			20%↓	99,55%	7,517	
2	Plantio	14,68	20%↑	103%	5,929	6%
			20%↓	97%	8,671	
3	Tratos culturais	8,00	20%↑	101,61%	6,558	3%
			20%↓	98,42%	8,042	
4	Colheita	40,02	20%↑	108%	3,563	16%
			20%↓	92%	11,037	
5	Gastos administrativos	10,49	20%↑	102%	6,328	4%
			20%↓	98%	8,272	
6	Transporte	15,74	20%↑	103%	5,841	6%
			20%↓	97%	8,759	
7	Remuneração da Terra Arrendada	8,81	20%↑	102%	6,483	Análise a parte
			20%↓	98%	8,117	
	Custo Operacional total	100,00				

Tabela 04 - Análise de Sensibilidade do Custo Agrícola

Fonte: o autor

- Os custos do preparo do solo correspondem a porcentagem de aproximadamente 2,32% do custo total. Ao variar 20% acima e abaixo é observado uma variação menor que 1% (0,93%) nos custos totais da produção da cana-de-açúcar.
- Os custos do plantio correspondem a porcentagem de aproximadamente 14,68% do custo total. Ao variar 20% acima e abaixo é observado uma variação de 6% nos custos totais da produção da cana-de-açúcar.
- Os custos dos tratos culturais da cana planta e da cana soca correspondem a porcentagem de aproximadamente 8,00% do custo total. Ao variar 20% acima

e abaixo é observado uma variação de 3% nos custos totais da produção da cana-de-açúcar.

- Os custos da colheita correspondem a porcentagem de aproximadamente 40,02% do custo total. Ao variar 20% acima e abaixo é observado uma variação de 16% nos custos totais da produção da cana-de-açúcar.
- Os gastos administrativos correspondem a porcentagem de aproximadamente 10,49% do custo total.
- Os custos de transporte correspondem a porcentagem de aproximadamente 15,74% do custo total. Ao variar 20% acima e abaixo é observado uma variação de 6% nos custos totais da produção da cana-de-açúcar.

As áreas mais promissoras para diminuição de custos são aquelas ligadas ao maior custo relativo em relação a todo o processo. Desta maneira, destaca-se a colheita como a etapa produtiva com maior peso relativo, que representa próximo de 40% dos custos totais do elo agrícola, seguido do transporte. Os custos de produção são muito sensíveis aos preços das matérias-primas, os quais, nomeadamente nos últimos anos, apresentaram alta volatilidade.

3.20.2 *Análise de Sensibilidade do Elo Industrial*

O modelo de simulação, no seu elo industrial, foi construído para diferentes níveis tecnológicos, o que corresponde a caldeiras de pressões e temperaturas diferentes, além da eficiência dos processos industriais, a quantidade de venda de bioeletricidade, bem como a incidência de impostos.

Observou-se que a venda de eletricidade excedente melhorou a rentabilidade do modelo, através de uma receita positiva nas usinas padrão de 45 bar, 65 bar e 100 bar. Pôde-se verificar que a produção em larga escala de bioenergia elétrica, a partir do bagaço de cana, em sistemas de cogeração, é uma alternativa econômica de potencial expressivo.

A seguir, algumas observações constatadas, após a simulação, quanto aos custos industriais:

- os custos de investimentos industriais, de maneira geral, estão subindo ao longo do tempo, pois a tecnologia empregada e projetos *turn-key* estão ficando mais caros, assim como as escalas das usinas estão aumentando;
- A Taxa Interna de Retorno (TIR) está semelhante para projetos de 21 bar e de 65 bar; isso acontece, pois, os investimentos em caldeiras de baixa pressão são relativamente módicos e já depreciados (devido a sua idade média) em comparação a caldeiras de maior pressão. O que torna o nível tecnológico mais baixo, de 21 bar de pressão, mais competitivo em relação ao de 45 bar de pressão;
- para caldeiras de pressão ainda maiores como as de 100 bar, os investimentos são relativamente caros, porém o retorno provido pela venda de bioenergia pode compensar o dispêndio maior, trazendo a maior TIR entre os níveis simulados.

Para que a geração e venda de bioeletricidade excedente constituam em fator relevante para a rentabilidade das usinas padrão, foi observado que:

- quanto maior as eficiências que permitam a elevação das sobras de bagaço, melhor. Ressalta-se que na simulação não se analisou caldeira de pressão maiores que 120 bar, por isso não se pode dizer sobre a relação custo de investimento e margem para níveis superiores a este.
- que tecnicamente se utilizem de caldeiras adaptadas para funcionar na entressafra, de modo eficiente, com variados tipos de biomassas, inclusive pontas e palha da cana-de-açúcar, bem como, resíduos de madeira, e que obrigatoriamente, a biomassa comprada durante este período esteja a um custo apropriado, e que seja adquirida nas redondezas da unidade industrial, pelo custo de transporte.
- o valor de venda da bioeletricidade, também, é um fator importante para a viabilização destes sistemas de cogeração com altíssimas eficiências, no padrão de 100 bar de pressão. A elevação de padrão de pressão e temperatura, além de melhoras na produção de energia excedente, demanda novos custos de investimentos, e como decorrência de valores mais altos e mais parcelas de financiamento incorporadas. É necessário que as receitas provenientes do novo investimento sejam adequadas, para que haja um nível de endividamento que não promova insolvência do empreendimento.

No elo industrial, o modelo e análises subjacentes apontaram uma propensão a permanência de unidades industriais com elevada capacidade de processamento, com caldeiras de alta ou altíssima pressão e temperatura, com tecnologias de maiores eficiências, com especialização da mão de obra, com a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar dissipando, paulatinamente, as usinas de menor capacidade.

Além das grandes usinas de altíssimas eficiências, um achado interessante é também, que as usinas com baixo nível tecnológico e baixa eficiência se mantenham com resiliência, pois, o investimento, já diluído por equipamentos antigos, permite baixa imobilização do capital, além de que, muitas dessas usinas menores preferem em situações desfavoráveis, fechar sua operação industrial em algumas unidades e vender ou redirecionar sua produção de cana-de-açúcar para unidades mais eficientes. Além disto, boa parte destas usinas de menor eficiência estão em regiões fora de São Paulo ou da região de expansão, o que permitem utilizar mão de obra mais barata e tecnologia mais rudimentar, de menor custo.

Assim, os mais eficientes sobrevivem por suas margens compensarem o investimento em tecnologia e os menores por seus baixos custos comparativos. Este resultado aponta que certas estruturas organizacionais promovem a resiliência dependendo de sua estrutura.

3.20.3 *Validação do Modelo de Simulação Desenvolvido*

A etapa de validação e verificação indicou se os pressupostos que estão no modelo de simulação estão corretos e se a estrutura, a lógica, a matemática e as relações causais estão condizentes para os objetivos propostos. A técnica subjetiva de validação foi utilizada através de comparação dos resultados dos submodelos, além da validação de conexões, segundo a lógica relativa ao sistema criado (ver Quadro 13):

Quadro 13 – Validação do Modelo de Simulação Desenvolvido

Etapa	Etapa Executada
Execução do conjunto completo do modelo para múltiplas situações, efetivando análises dos dados de saída	X
Rastreamento do modelo investigando a consistência nos comportamentos dos submodelos e suas saídas	X
Verificação dos termos técnicos correntes	X
Coleta de dados pertinentes e relevantes	X
Emprego teorias efetivas ao modelo	X
Investigação outros modelos criados previamente	X
Aquisição de experiência e intuição na produção do modelo	X

Expandido de Balci (1997, 1998) e Silva (2005, 2006)

Para esta validação foram realizadas comparações com dados locais e empíricos para confrontar os resultados do simulador. Esse processo de validação foi confirmado a partir dos resultados satisfatórios, na qual afere que o modelo está representando a realidade.

A partir de 2007, o PECEGE construiu uma série de estudos sobre os custos do setor sucroalcooleiro no Brasil. Esse estudo se destaca por um grande levantamento de dados empíricos, explorando os custos agrícolas e industriais. Nesta série, utilizou-se uma quantidade de usinas em torno de 30 a 40 em média e variou em detalhamento (ao longo do período das publicações), a supressão de alguns dados em versões mais recentes deixou uma lacuna na compreensão, por exemplo, dos detalhamentos da evolução de custos das operações industriais, dentre outros, os quais são raros de se encontrar na literatura.

Antes destes trabalhos, foi desenvolvido, durante a década de 70 e 80, um levantamento de custos de produção pela FGV, com chancela do Governo Brasileiro, que tinha o objetivo de servir de base de pagamento aos produtores de cana e usineiros, uma vez que os preços eram fixados.

A base comparativa utilizou-se dos dados de Marques (2009); Xavier, Zilio, Sonoda, Marques (2009); Xavier, Sonoda, Zilio, Marques (2011;2012); Xavier, Sonoda, Rosa, Marques (2013;2014); PECEGE, (2014). Na comparação com trabalhos cujos resultados podem ser correlatos, tomando por base os estudos de Oliveira e Nachiluk (2016), Silva

et al. (2014), Nastari (2014) destacam-se a heterogeneidade de custos obtidos. No entanto, nenhum desses trabalhos produzem um modelo, o que limita a comparabilidade de alguns resultados, mas, auxiliam em uma revalidação dos resultados agrícolas para nosso modelo.

Para a validação da colheita e transporte também se utilizou de informações da UDOP, como as diferenças entre preços da cana-de-açúcar na esteira e entrega à usina, em conjunto às informações das distâncias médias percorridas.

Observou-se que as diferenças constatadas nos custos, nesta validação, decorrem dos divergentes sistemas de produção e entre as diferentes regiões produtoras de cana-de-açúcar, o que proporcionam diferenças entre as etapas produtivas e os custos totais.

Dados do MAPA e de outros trabalhos como o de Dantas Filho (2009) e profissionais do setor ajudaram nesta validação, quanto aos custos industriais.

3.21 Aspectos Metodológicos e Limitações da Curva de Experiência

A curva de experiência pode ser utilizada como um fundamento importante para apoiar o entendimento de todo o desenvolvimento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, ao longo do tempo. Para as duplicações de volume foram utilizadas a cana-de-açúcar para o elo agrícola, e o etanol para o elo industrial.

Assim para a cadeia de cana-de-açúcar, e para a maioria dos produtos e serviços, a passagem do tempo por si só, não leva a reduções de custos, mas sim, acumulação de experiência. Em muitos casos, as interrupções ou mesmo a estagnação nos diferentes processos de produção são capazes de causar perda dessa experiência e retornar a custos superiores.

A abrangência desta pesquisa, no que tange a curva de experiência, contemplou todo o território brasileiro, no período que se iniciou em 1975 e terminou em 2014. A escolha deste período, inicialmente, foi relativa a um intervalo de tempo onde poderia se comparar e confrontar com um estudo que vinha sendo desenvolvido, que identificasse com acuidade, o tamanho e desenvolvimento da frota de veículos brasileira, do consumo de combustíveis e a decisão do consumidor frente aos preços; devido ao lançamento do

veículo exclusivo a etanol, em 1979. No entanto, no decorrer deste trabalho, optou-se por descartar parte deste estudo em especial, decidindo-se por concentrar esforços no estudo da resiliência e no modelo de simulação em um momento avançado dos trabalhos.

Uma vez que os estudos já elaborados não afetariam o resultado buscado e, ainda, permitiriam uma avaliação mais completa dos principais mecanismos capazes de interferir positivamente ou negativamente na composição de custos e margens e os efeitos sobre a resiliência, optou-se por mantê-la. No decorrer do trabalho, também foi observado que vários autores reforçavam o entendimento de que a curva de experiência é uma ferramenta com melhores resultados em longo prazo, por este motivo, a decisão de manter um maior intervalo de tempo foi preservada.

Dados específicos são necessários para construção de curvas de experiência, sendo imprescindível a obtenção dos custos da matéria-prima e do processamento industrial, se quisermos aplicar ao elo agrícola e ao industrial, o qual são completamente quantitativamente orientados. Isso exigiu dados sobre a produção cumulativa de cana-de-açúcar e etanol no Brasil, assumindo a aprendizagem nacional. Foram coletadas séries de dados para os custos, no período compreendido entre 1975 a 1997, e a partir deste período, os dados utilizados vieram do modelo de simulação já descritos e constituíram a base para a construção das curvas de experiência do elo agrícola e do elo industrial, pós 1997. Para os dados de volume, utilizou-se os dados de estatísticas disponibilizados pela UNICA e MAPA.

Na etapa de processamento de dados, todos os custos foram corrigidos pelas taxas de inflação pelo uso do deflator IGP-DI. As publicações durante esse período sem a notação exata do mês de cálculo são consideradas como uma média anual. Dessa forma, todos os custos, preços, etc. foram expressos em valores comparáveis em R\$ atualizados para dezembro de 2014.

Sabe-se que entre o conjunto de dados obtidos até 1997, em certos anos, o preço foi utilizado como *proxy*²² de custos, mas não se encontrou na literatura outro conjunto de dados confiáveis e disponíveis para anos anteriores a 1997. Sem a condição de obter uma

²² *Proxy*, neste trabalho é utilizado como sinônimo para substituto, que age como intermediário para atuar em um dado de maneira similar, mantendo algumas de suas características.

visão detalhada dos cálculos de nenhuma instituição ou usina produtora não tínhamos outra opção, senão assumir que os cálculos eram confiáveis e corretos.

O problema da alocação de custos por tipo de usina padrão foi agravado por conta que, dentro de usinas mistas, a maior parte do etanol é produzido em combinação com o açúcar, sem uma distinção clara de seu rateio. Procurou-se mitigar este problema assumindo que os custos já haviam sido segregados em proporções iguais as produzidas em certo ano, como também, assumir, apenas, os custos finais para cada usina padrão.

Para a criação da curva de experiência, no entanto, não está claro o quanto de esforço deve ser colocado em tentar distinguir entre os fatores de efeito de escala e aprendizagem. Uma vez que os dados disponíveis do modelo são frutos tanto das economias de escala, quanto de aprendizagem e são agrupados em uma única taxa de progressão por tendência; a estimação pode ser mais simples, como de maior confiança e, portanto, mais útil do que os esforços para extrair os dois efeitos diferentes a partir dos dados do simulador, e em seguida, tratá-los separadamente em modelos diferenciados de energia de longo prazo.

Para produção da curva de experiência acumulou-se os valores produzidos em relação aos custos. Aplicou-se uma função log-log, e com os resultados criou-se a curva. De acordo com índice de experiência característico de cada período, os dados foram segmentados e estudados.

3.22 Aspectos Metodológicos da Resiliência e o E.P.I.L.E de Desempenho

Nas várias disciplinas em que o conceito de resiliência é utilizado foi notado diferentes perspectivas. A natureza dispersa da literatura de resiliência e a noção ampla de o que o conceito significa levou a se destacar o problema da falta de consenso na literatura sobre sua definição.

Se argumenta que qualquer definição da resiliência de um sistema econômico sem o custo está incompleto (TUKAMUHABWA *et al.*, 2015). A eficiência de custos foi identificada como uma característica de sistemas resilientes (veja Fiksel, 2003) e a redução dos custos, através de uma coordenação rápida e eficaz, é um foco necessário nas cadeias de suprimento resilientes (XIAO; YU; GONG, 2012).

Além disso, uma cadeia de suprimentos resiliente não deve ser considerada apenas os aumentos da flexibilidade, a criação de redundância e a formação de relacionamentos colaborativos da cadeia de suprimentos, mas também ter a capacidade de responder de uma maneira melhor e mais econômica do que os concorrentes; e, neste processo obter uma Vantagem Competitiva (veja PORTER, 1980). Estudos apontam que uma empresa que responde melhor a disrupção pode melhorar sua posição de mercado (veja HAMEL; VALIKANGAS, 2003; YAO; MEURIER, 2012).

Tukamuhabwa *et al.* (2015) preencheram esta lacuna ao propor um conceito que foi definido como mais que meramente a capacidade de gerenciar o risco, mas também, a capacidade de responder ao risco de maneira melhor e mais econômica que os concorrentes e no processo obter uma vantagem competitiva. No entanto, o conceito proposto ainda foca em eventos disruptivos como fogo, terremoto, inundações e por isso foi necessária sua adaptação.

A partir da formulação de Tukamuhabwa *et al.* (2015), adaptamos e estabelecemos a nossa própria definição da cadeia de suprimentos resiliente (SCRES) como:

capacidade de adaptação para se preparar e/ou responder a E.P.I.L.E. de desempenho, para fazer uma recuperação econômica e em tempo efetivo, avançando para um estado pós-intervenção²³ das operações – idealmente em um estado melhor do que o anterior.

- Onde E.P.I.L.E. de desempenho significa: Evento Perturbador Identificado de Longo Efeito.

É importante diferenciarmos definições passadas do que está sendo proposto, pois diverge em pelo menos um ponto relevante; que é a diferença entre evento disruptivo e E.P.I.L.E. de desempenho. Sendo o primeiro de alto impacto, como eventos extremos e desastres naturais e o segundo um evento ou conjunto de eventos que causam perturbações de efeito prolongado como, uma mudança política, tecnológica ou econômica.

Optamos pela troca da palavra ‘disrupção’ na definição por ‘intervenção’, porque acreditamos que disrupção tem um efeito pontual, marcante e bem definido enquanto intervenção pode passar a ideia de efeitos continuados, que podem perdurar ou não.

²³ Ato de exercer influência em determinada situação na tentativa de alterar o seu resultado; interferência.

Devemos nos atentar para o fato que o E.P.I.L.E de desempenho é sempre negativo em um primeiro momento, o que não impede, de que ele reaja e em um prazo maior, se recupere e se torne por meio de aprendizagem, positivo por elevar o nível de performance.

Outra forma de entender o E.P.I.L.E de desempenho é conceitualizá-lo como o conjunto de Fatores de Vulnerabilidade que afetaram a resiliência em dado período. Bem como o os Fatores de Capacidade que podem ser utilizados para mitigar ou otimizar a resiliência no momento seguinte.

Em uma análise mais aprofundada sobre o conceito de E.P.I.L.E de desempenho, pode-se destacar que o mesmo pode tratar de um evento ou um conjunto de eventos. Neste sentido, sua formação depende puramente de um decrescimento de performance e sua recuperação, formando, em última análise, um Triângulo de Resiliência.

3.22.1 *Cálculo da Integral na Resiliência*

Aplica-se técnicas de integração para cálculo de áreas de figuras planas regulares, sendo facilitados devidos às fórmulas matemáticas existentes. Consegue-se retratar algebricamente uma curva por meio de uma função. A integral de uma função é empregada para determinar áreas específicas sob uma curva em um plano cartesiano, quando se assume como função dos limites a e b de integração, onde $y = \phi(x)$ e $A = \text{área}$, como mostrado em (1).

$$A = \int_a^b \phi(x)dx = f(b) - f(a) \quad (1)$$

Calcula-se a área da região delimitada A usando a integral função $\phi(x)$ ²⁴ (lê-se integral da função ϕ (*Phi*) na variável x), entre o intervalo a e b. Graficamente a expressão pode ser calculada ao dividir a área delimitada em trapézios ou retângulos, onde a área sob a curva $\phi(x)$ pode ser aproximada como a soma das áreas das figuras geométricas de altura y e base dx. Mostra-se na Figura 21 um exemplo contendo vários retângulos de base dx e

²⁴ Esta notação é devida a Joseph Fourier (1768-1830).

altura y para formar a área A , em uma função $y = f(x)$ (GRANVILLE; SMITH; LONGLEY, 1961):

Figura 21 – Representação da função $y = f(x)$ segmentada em diversas áreas sob a curva de base dx e altura y , para compor a área A

Fonte: Silva (2017)

3.23 Limitações Metodológicas

3.23.1 Limitação do Modelo de Simulação

Os *inputs* da simulação precisam ser inseridos para um ano em específico. No entanto, alguns *inputs* variam em períodos menores. Por conta desta característica do modelo de simulação, em alguns lançamentos adotaram-se as médias anuais, o que traz como efeito adverso, uma menor precisão. Mesmo no período considerado, sabe-se que oscilações de preços mensais podem, algumas vezes, interferir de maneira considerável nos resultados de curto prazo.

O modelo de simulação não foi construído considerando o mercado internacional, sendo assim, alterações de preços internacionais, principalmente do açúcar, não afetam suas margens, limitando-se a utilização de preços correntes do mercado nacional. O efeito disso, nos resultados, é que para a safra de 2003/2004 o modelo não captou bem as margens das usinas padrão, o que leva ao entendimento, que as usinas que exportaram, principalmente neste ano, estejam em melhores condições do que as voltadas ao mercado interno, que possuíram margens menores, pelo nosso modelo.

Percebe-se, também, uma existência significativa de diferenças de custo entre as regiões brasileiras, advindas do rendimento de cada atividade produtiva. As operações verificadas

nas diferentes regiões do país compõem-se basicamente das mesmas atividades, porém, possuem características peculiares, o que aumenta a imprecisão em uma análise comparativa mais regional e específica.

Diferenças de uso de tecnologias, diferentes gestões, tipos de manejo, tipo de operação, também interferem na precisão percebida do modelo de simulação, principalmente, caso sejam aplicados a uma usina em particular dentro da cadeia de suprimentos.

O modelo não consegue explicar o modo como os custos de certas etapas produtivas afetam a produtividade. É importante ressaltar que aqui a ordem é relevante, pois o modelo consegue simular como a produtividade afeta os custos, mas o inverso não é possível.

Há uma dificuldade de se identificar gastos e valores individuais dentro de certas atividades, utilizadas para a validação, o que leva a suspeitar de casos de dupla contagem de um mesmo item, podendo então existir imprecisões e interferências destes mesmos gastos e valores.

A precisão do modelo de simulação de custos e margens tem sua exatidão limitada pelos diferentes tempos de amortização dos diferentes equipamentos industriais, neste modelo, o tempo de amortização foi considerado não variável.

No longo prazo, as mudanças de tecnologias com potencial de contribuição para a produtividade da cana-de-açúcar podem exigir uma nova validação, ou mesmo, ajustes no modelo de simulação.

3.23.2 Limitação de Estudo de Caso

Existem algumas limitações no estudo de caso, com isto, é importante tomar as precauções e cuidados necessários para se evitar as críticas e subjetividades, que podem distorcer ou influenciar a direção das descobertas e conclusões (YIN, 2001). Nenhum método de pesquisa é de uso fácil e pode ser aplicado de forma mecânica e automática, a análise das evidências é um estágio difícil de ser realizado no estudo de caso e vale ressaltar que se foi criterioso desde a fase inicial da pesquisa qualitativa.

3.23.3 Limitação de dados da resiliência

Estudo da resiliência foi limitado pelos dados antes de 1998, pois apresentou baixa confiabilidade e pouca disponibilidade de dados bibliográficos adequados.

3.24 Conclusões do capítulo – metodologia

Neste capítulo, explicitou-se o tipo de pesquisa adotado, bem como seus enquadramentos metodológicos, onde ressaltou-se a importância de tomar cuidados e precauções para evitar distorções em seus resultados.

Demonstrou-se a construção do modelo de simulação onde se explicitou a dificuldade de recolhimento de dados, bem como, o grande esforço no desenvolvimento e representação de um modelo, cuja precisão fosse suficiente para o propósito de avaliar quantitativamente o desempenho da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Com este intuito, construiu-se uma fazenda padrão, uma usina padrão com quatro níveis tecnológicos, até passar pela etapa de validação.

A construção do modelo completo, com seus respectivos dados financeiros, econômicos e técnicos, necessitou de diferentes especialidades dentro da engenharia e administração, tanto nos elos agrícolas quanto industriais da cadeia. Sendo necessário, entender os diferentes modelos de negócios possíveis.

Finalmente, O E.P.I.L.E. de desempenho foi uma adaptação necessária para o enquadramento conceitual da resiliência, da maneira que foi proposta nesta tese.

4 RESULTADOS

Os resultados, aqui apresentados, começam com uma cronologia levantada da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Para uma análise pormenorizada foi arbitrado dois intervalos, períodos pré e pós desregulamentação: de 1975 a 1997, e um segundo de 1997 a 2014. Este compartilhamento foi criado por dois motivos: o primeiro intervalo é fruto, em grande parte, de uma conjuntura que concedeu as premissas de sustentação para o segundo intervalo, que coincide com o período da resiliência, com a mudança estrutural do setor e com a introdução de menor intervenção estatal. Além disto, a curva de experiência apresenta melhores resultados de longo prazo, por isso se optou por um período mais extenso, no primeiro intervalo. Deve-se, ainda, ressaltar que os períodos são aproximados e são representados por um algarismo romano, pelo símbolo ‘≅’ e de um período temporal.

Na Curva de Experiência reunimos dados sobre o acúmulo de produção e reduções de custos. Simulamos custos agrícolas e industriais, estimamos as taxas de aprendizagem, analisamos sua variabilidade ao longo dos anos, além de avaliarmos a sua utilidade para aplicações em modelos de energia de longo prazo e a evolução dos custos apresentada.

Para a Resiliência, construímos os constructos de capacidade e vulnerabilidade identificados para cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Reconhecemos e distinguimos os fatores de influência que afetam os custos e margens, onde os classificamos em três tipologias: tecnologias do elo agrícola e industrial, instrumentos políticos e opinião pública e reações de mercado.

Ainda, para a Resiliência, através de uma adaptação conceitual e metodológica de abordagem quantitativa, fizemos a medição inédita da cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar e discutimos seus resultados.

Um quadro geral de amarração foi construído. O mesmo concedeu as bases para alinharmos a cronologia levantada, eventos deflagradores, estratégias adotadas e seus resultados mais significativos, para mostrar a relação de causa-efeito entre as abordagens qualitativas e quantitativas.

4.1 Cronologia dos Eventos Deflagradores

4.1.1 Período Pré-desregulamentação

I $\cong$ (anteriores/1975) – Em 1971, houve a implementação do programa de equalização de custos, através de subsídios, que teve por objetivo de remunerar e preservar os produtores de cana-de-açúcar estabelecidos em regiões com custos de produção mais elevados. O intuito era o aumento da produtividade através da melhoria das variedades e implementação das novas tecnologias de produção, além da racionalização através do uso de quotas e diversos estímulos financeiros com a implantação do Programa de Racionalização da Agroindústria Açucareira e do Programa de Melhoramento da Cana-de-Açúcar - PLANALSUCAR (FERREIRA, ENÉAS RENTE; ALVES, 2009; RODRIGUES, 1986; VEIGA; YOSHII, 1990).

Em 1973, época de crise do petróleo, o Centro Técnico Aeroespacial - CTA ficou designado, na figura do engenheiro brasileiro Urbano Ernesto Stumpf, de promover pesquisas e experiências técnicas sobre o motor a etanol, ao longo de três anos. Seus resultados foram demonstrados ao presidente Ernesto Geisel, que, em consequência do seu sucesso favoreceu decerto para a criação do PROÁLCOOL (BNDES; CGEE, 2008).

Um dos fatores para elevação dos custos da cana-de-açúcar foi a falta de investimentos nas lavouras provocados pelos baixos preços do açúcar no mercado mundial, anteriores a 1975, que causaram uma descapitalização generalizada na cadeia (AZEVEDO, 2002). O crescimento da taxa de inflação quase dobrou em 1974, em relação a 1973. Mesmo considerando a crise internacional e a instabilidade monetária, que ocorriam à época, o produto interno bruto (PIB) obteve um avanço em torno de 8% em 1974 (SPOLADOR, 2006).

O PROÁLCOOL, criado em 1975, veio com a finalidade de produzir etanol carburante para substituir importações de petróleo, que fragilizavam as contas externas brasileiras, tendo como intuito de diminuir o déficit no balanço de pagamentos. Somado a este fator, criava-se uma alternativa para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar para seu escoamento de produção a preços mais competitivos.

II $\cong$ (1976/1978) – No período de 1976 a 1978, houve diversas alterações na legislação, doze portarias do CNP (Conselho Nacional do Petróleo) promovendo aumentos da

proporção de etanol anidro na gasolina. Em algumas regiões de São Paulo, a proporção saltou de 11% para 20% (MAPA, 2011). Nessa fase inicial foi estimulada a produção de etanol anidro para ser empregado como aditivo à gasolina.

Até 1977, a cana-de-açúcar era remunerada em sua maioria pelo seu peso. A partir de 1978, o Instituto do Açúcar e do Alcool aprovou a adoção da remuneração da cana-de-açúcar pelo seu Teor de Açúcar (ATR), medida essa que foi gradualmente implantada no estado de São Paulo, em 1983. O novo sistema beneficiou a produtividade industrial, bem como prejudicou as áreas agrícolas pouco produtivas.

É possível argumentar que um ângulo importante a ser considerado é o aumento gradual do volume de produção de etanol no ano de 1978, que teve uma evolução significativa, da ordem de 70% de aumento em relação ao ano anterior. No período, também houve uma elevação da área plantada.

III $\cong$ (1979/1985) – Um ponto importante para elevação dos preços da cana-de-açúcar, e talvez, o principal no período, foi devido a uma grande elevação dos preços do petróleo no mercado internacional, o que agravou, ainda mais, as condições das contas externas brasileiras. Esse período é denominado ‘segundo choque do petróleo’ e ocorreu em 1979 (BRAY; FERREIRA; RUAS, 2000).

Ainda neste período, através do PROÁLCOOL, o governo ajustou os preços pagos ao produtor de etanol e açúcar acima do custo de produção, remunerando-os de maneira elevada; nos postos, certificou que os preços, também, fossem compensadores: o etanol teria de valer menos que 50% do preço da gasolina. Se gerou todo um conjunto de requisitos para que se viabilizasse o etanol como um produto acessível ao mercado: proporcionou uma boa margem ao produtor, concedeu um preço muito gratificante ao consumidor e às distribuidoras de combustíveis instituiu benefícios fiscais (GORDINHO, 2010).

O volume de etanol hidratado e anidro produzido no ano de 1979, saltou de 3,383 bilhões de litros para 3,706 bilhões em 1980, indo até 11,820 bilhões em 1985, ou seja, de 1979 a 1985, a produção multiplicou aproximadamente 3,5 vezes. Em 1983, a produção de apenas do etanol hidratado cresceu na ordem 2,4 vezes, quando comparado ao ano anterior. Os números falam por si só, para este alto crescimento acelerado do volume de etanol (veja Anexo III).

Quanto à mistura de etanol na gasolina, houve um pequeno aumento no período, saindo de 20% para 22%. Foi a política governamental influenciando o setor ao estimular a produção de maneira indireta, ao exigir maior adição de etanol à gasolina.

Em 1979, o Fiat 147, foi o primeiro veículo do mundo movido a álcool, fabricado em série. Seus motores foram preparados com materiais anticorrosivos e mais resistentes, como o carburador e o coletor de admissão, como também, uma adaptação para maior rendimento e eficiência através de alta taxa de compressão, o qual é mais adequada ao etanol. A utilização do etanol como combustível exclusivo mostrou rápido crescimento, chegando a 95,8% dos automóveis licenciados no Brasil em 1985 (QUEIROZ, 2008).

A partir de 1982 foi notado o aumento gradual da produção de cana-de-açúcar, etanol, açúcar para maiores quantidades (MAPA, 2012; MAPA, 2015). Somado a isto, no ano de 1983, coincidiu com um novo sistema de remuneração da cana.

Dentro desta perspectiva, foi estimulado a diminuição de custos ao longo de sua duração. Em relação a este reforço, os números mostram uma rápida aceleração nos projetos de usinas. Eles passaram de 295 em 1980 para 537 em 1985, um aumento de 82% (CAVALCANTI, 1992).

Apesar da inserção de novas áreas produtoras subsidiadas como o Rio de Janeiro, o Espírito Santo e Minas Gerais, que se somaram ao Nordeste, o qual já era subsidiado, é possível argumentar que o programa PLANALSUCAR foi relativamente exitoso, reduzindo os custos no setor agrícola até o final da safra de 1983/84, em algumas regiões. A partir 1985, os subsídios foram eliminados nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (RODRIGUES, 1986), o que em parte pode explicar a grande elevação de custo neste mesmo ano, no elo agrícola.

IV $\cong$ (1985/1987) – Dando continuidade, pôde-se observar que nos anos seguintes, as áreas paulistas apresentaram maiores níveis de produtividade agrícola. Durante o programa PLANALSUCAR houve ampliação na produtividade nos estados de Minas Gerais, Alagoas e Pernambuco – respectivamente – excluindo o Rio de Janeiro, causado por fatores climáticos, o que provocou uma baixa de produtividade neste local (RODRIGUES, 1986; VEIGA; YOSHII, 1990). Dessa maneira, os custos agrícolas predominantes de longo prazo puderam ser reduzidos, devido ao aumento da produtividade.

Em 1985, observou-se que o número de projetos de usinas e o montante dos investimentos sofreram uma grande redução (CAVALCANTI, 1992). Neste enfoque é importante destacar que os preços de compra garantidos foram estabelecidos abaixo dos custos médios de produção no período 1986/1987. No entanto, a produção de açúcar para exportação aumentou, as vendas de veículos a etanol, em 1985, atingiram índices superiores a 90%, o que deu crédito ao governo para tirar ainda mais força dos programas vigentes. Os preços continuavam sendo estabelecidos pelo governo. A produção de etanol hidratado estagnou.

V $\cong$ (1987/1990) – Como consequência de preços, significativamente, mais baixos do petróleo, cujos preços começaram a cair mais fortemente em 1986, somado as taxas extremas de inflação e incertezas políticas e a falta de álcool, a confiança no PROÁLCOOL foi prejudicada. A economia do Brasil estava de mal a pior, desde 1988, uma época de limitação de recursos financeiros, com baixos investimentos. Em 1989 a questão inflacionária chegou à uma nova marca: 1500% ao longo de três anos. Medidas foram tomadas, houve a extinção do IAA e restrição da atuação estatal (GORDINHO, 2010).

A produção de etanol tornou-se relativamente cara, em comparação com as importações de petróleo a preços baixos. Ao mesmo tempo, os preços do açúcar no mercado mundial vinham se recuperando, o que favoreceu as usinas do tipo mista, enquanto que as destilarias autônomas tiveram dificuldades. Ocorreu falta de recursos públicos para o financiamento de novas usinas e equipamentos. Incentivos financeiros eram necessários para salvar o programa PROÁLCOOL, no entanto, em primeiro lugar, a verba para Pesquisa e Desenvolvimento foi diminuída, como também, foram interrompidos os financiamentos e subsídios.

As empresas passaram a operar de acordo com as condições existentes, sem um período de adaptação. Isso criou problemas financeiros graves para os produtores com consequente endividamento. Entre 1986 e 1990, grande parte dos fornecedores independentes de cana-de-açúcar abandonou a atividade (GORDINHO, 2010, p. 79).

O aumento do preço do açúcar e a liberalização da exportação deste produto ocorreram em 1988 (KOHLHEPP, 2010), e na temporada seguinte, de 1989/90, *houve uma escassez significativa* de etanol. Deve-se lembrar que o preço pago ao produtor continuava sendo

estabelecido pelo governo, assim o aumento da produção interna de etanol foi impedido, devido à queda brusca dos preços internacionais do petróleo, que abaixaram os preços da gasolina e consequentemente limitaram os preços do etanol, o que tornava baixo ou mesmo negativo as margens dos produtores. Acrescentam-se a estes fatos, que, na década de 1990, houve uma queda na produção de beterraba para açúcar, devido aos problemas causados pela difícil transição de seus produtores no sistema comunista na Europa Oriental, o que induziu, ainda mais, a produção de açúcar em detrimento ao álcool.

A confiabilidade do PROÁLCOOL *despencou*, ocasionando uma intensa baixa na demanda deste combustível e nas vendas de veículos movidos a álcool.

VI $\cong$ (1991/1997) O PROÁLCOOL continuou como um plano de combustível alternativo à gasolina, mas com horizonte nebuloso e transtornos institucionais até fins de 1995. Houve estagnação na produção alcooleira nacional até a safra de 1993/1994, e nas seguintes, obteve-se um pequeno crescimento. Nas seguintes palavras de Cruz; Guerreiro; Raiher (2016, p.145) foi exemplificado a situação da época:

Em 1990, o percentual de venda de veículos movidos a álcool declinou para 12,4% em decorrência da crise de abastecimento do álcool de 1989, provocando descrédito do mercado quanto ao abastecimento futuro e também por aspectos políticos. [...] o Brasil foi obrigado a importar álcool hidratado para o pleno abastecimento dos postos. [...] Essa crise de abastecimento de etanol, somente foi superada com a introdução no mercado da mistura MEG²⁵. Essa mistura sujeitaria o país a efetuar importações de etanol e metanol a fim de garantir o abastecimento do mercado na década de 1990.

Em 1993, aumentou-se a mistura de etanol anidro na gasolina, sendo mais uma tentativa do governo para recuperar o setor. Dando continuidade à adaptação do setor, houve um movimento de verticalização²⁶ no processo de produção e fabricação, em uma estratégia de produzir mais internamente. Além disto, buscou-se aumentar o controle da comercialização dos seus derivados. Foi bastante sugestivo a preocupação notada em diferenciar produtos e favorecer as marcas próprias.

²⁵ MEG: Mistura de Metanol 33%, Etanol 60% e Gasolina 7%.

²⁶ Verticalização: é a estratégia que prevê que a empresa produzirá internamente tudo o que puder, visando otimizar os recursos disponíveis através de agregação de outras empresas de sua cadeia de suprimentos.

No ano de 1997 foi elaborado novo sistema de pagamento da cana pela CONSECANA e a posteriori, investiu-se no gerenciamento de transportes e logística, que além de reduzirem os custos de longo prazo, facilitou a expansão para mercados internacionais.

4.1.2 Período Pós-desregulamentação

I $\cong$ (1998/2001) – Desde de 1995, o baixo preço do petróleo e da gasolina pressionavam o resultado dos produtores da cadeia, pois estimulava o uso de veículos à gasolina em detrimento aos veículos a etanol. Economicamente, a queda dos preços do petróleo tornou difícil a sustentação do PROÁLCOOL, pois etanol dependia de suporte do governo para competir com a gasolina, cuja sociedade estava insatisfeita com a situação econômica do país. No final de 1999, observou-se um aumento de demanda por veículos a etanol, devido aos incentivos proporcionados por políticas estaduais e municipais, bem como pela vantagem proporcionada pela alta dos preços da gasolina, que transformou o etanol mais compensador para uma parcela dos consumidores (BARROS; MORAES, 2002).

Dessa maneira, procurou-se identificar o que estaria afetando o movimento desses custos. É importante notar que na gestão de FHC (1995-2002) o etanol deixou de ser uma prioridade estratégica. As preocupações com a inflação, a reforma do Estado, as mudanças nas áreas fiscal, cambial e monetária foram prioritárias naquele período. Houve uma rápida desregulamentação e a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar reorganizou-se. Isocronicamente, no período deste mandato, ocorreu também, a desregulamentação dos mercados de açúcar e etanol combustível na cadeia de suprimentos em seus elos de produção, distribuição e comercialização, com preços regidos pela oferta e procura.

O preço dos combustíveis no Brasil era regulado pelo governo, que tinha a Petrobras como agente principal do setor. Em maio de 1997, os preços do etanol anidro deixaram de ser controlados e, em fevereiro de 1999, o mesmo ocorreu com todos os preços do setor (GOLDEMBERG *et al.*, 2004; SACHS, 2007).

Surgiu um novo processo de delineamento das atividades da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, o planejamento e as atividades de produção e comercialização deixaram de ser orientados pelo governo e passaram a fazer parte da administração privada (MARJOTTA-MAISTRO; BURNQUIST, 1998). Muitas das empresas produtoras de

açúcar e etanol não se adaptaram com a diminuição do protecionismo estatal, ampliando os problemas de endividamento, ocasionando a diminuição do número de usinas e destilarias. Ainda assim, perante a essas dificuldades, a maioria das empresas que sobreviveram à desativação do PROÁLCOOL modernizaram-se, passando de um setor dependente do governo para outro desregulamentado, inserindo-se numa economia de livre mercado (RAMOS, PEDRO, 1999; SIQUEIRA; JUNIOR, 2011).

Além das dificuldades já presentes, a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar passou por uma crise de superprodução de etanol, começando em 1997, ela foi representada pelos baixos preços do etanol carburante para os produtores e por um expressivo excedente do produto no mercado (ZYLBERSZTAJN; FAVA NEVES, 2000).

No período iniciado em 1999, houve aumento dos investimentos em P&D, como o Projeto Genoma Cana, apoiado pela FAPESP e CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, com o objetivo de otimizar tecnologias ligadas a cana-de-açúcar (OLIVEIRA, 2007).

A cadeia de cana-de-açúcar comportou grande gama de fusões e aquisições, a partir deste período, passando por intensa concentração e centralização de capitais. No ano de 2000, houve sete fusões e aquisições, sendo uma delas realizada pelo o grupo Louis Dreyfus. Também, houve a profissionalização do setor, com a mudança gradativa da administração familiar por executivos de mercado e a maior capitalização das usinas, diante da recuperação do mercado internacional, a partir de 2000. Estas foram as peças fundamentais para a aceleração do processo de fusão e aquisição no setor (BORGES; COSTA, 2009; SIQUEIRA; JUNIOR, 2011).

Observou-se que a partir de 1999, ainda houve um aumento de estudos com o objetivo de contribuir com conhecimentos aplicáveis à utilização de biomassa na geração de energia elétrica, em usinas. Muitos autores trataram da cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar nesta época (DANTAS FILHO, 2009).

No final da década de 1990, aconteceram novos movimentos empresariais na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, o que acarretaram transformações na estrutura no setor. Ocorreu a transferência de parte do empresariado paulista para regiões agrícolas de preços mais baixos de terras, promovendo uma mudança de cenário, com as expansões das áreas de plantio. Ademais, realizou-se a construção do terminal açucareiro da Copersucar no

Porto de Santos – SP, considerado um marco logístico na distribuição e transporte com capacidade de armazenagem de açúcar e etanol.

A maior imobilização de recursos financeiros foi fundamental, movido não só por exigências ambientais, mas também, legislativas; um desembolso progressivo em equipamentos, em máquinas agrícolas e o aumento do uso da cogeração ocasionaram em custos maiores no que se refere à exigência de capital, o que levou a uma necessidade superior de acesso a financiamentos.

Ainda, os anos finais da década de 1990, entre 1997/1999, foram definidos pelos efeitos da desregulamentação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Foi catastrófico para a maioria dos produtores de cana e etanol, marcado por incertezas e diminuição da intervenção estatal. O setor teve que reaprender para sobreviver as turbulências e vulnerabilidades surgidas, muitas vezes através da diversificação dos seus produtos, buscando aumentar assim a resiliência.

II $\cong$ (2002/2003) – Desde da safra de 1985/1986 até a safra de 2001/2002 a produção de etanol total (anidro e hidratado) praticamente não havia se alterado no Brasil, refletindo, portanto, uma estagnação do setor. Entretanto, nessa época, ainda se mantinha algumas políticas originárias do PROÁLCOOL, como a regulamentação da compra pelo ATR, a adição de etanol anidro à gasolina e a regulamentação do preço da gasolina.

Durante as safras de 2002/04 se iniciou a elevação do preço do petróleo no mercado internacional e, por conseguinte, da gasolina. Em 2002, o preço internacional do petróleo era de US\$152,98/m³ e em 2004 chegou a US\$ 252,55/m³, uma elevação de 65,1% em dois anos. A produção nacional de etanol se expandiu durante os anos de 2001 e 2003 passando de 11,5 bilhões de litros para 14,7 bilhões de litros de etanol. Também se aumentou a produção de açúcar, devido a maior exportação deste produto (BACCARIN, 2005).

A partir do ano 2000, o preço do petróleo vinha mostrando um movimento de elevação e em 2003 apresentou maior ímpeto. É lícito supor que este movimento contribuiu para as pesquisas de biocombustíveis e sua aplicação em solo nacional. Assim, no ano de 2003, aconteceu o lançamento dos veículos *flex-fuel* (FFV), que logo começaram a dominar o mercado brasileiro. Esta tecnologia começou a ser desenvolvida com a injeção eletrônica na Bosch em 1988 (SANTOS *et al.*, 2009), o qual utilizavam dois sensores, mas não era

adequados a presença de etanol hidratado. Em 2003, a Magneti Marelli lançou no mercado brasileiro um sistema através de microprocessadores que permitiu identificar a mistura de gasolina e etanol com alta precisão, independentemente, da quantidade de proporção dos combustíveis.

Esta nova tecnologia permitiu o aumento da demanda de etanol, ao conceder aos motoristas o livre arbítrio na escolha, tanto do etanol como da gasolina, sem ter que optar por uma motorização única por tipo de combustível. A consequência foi o aumento da demanda de etanol após sua chegada, pois seu preço estava competitivo em relação ao alto preço da gasolina.

A introdução da tecnologia *flex-fuel* (FFV) permitiu ampliar significativamente o mercado interno de etanol no Brasil. O aumento da venda de veículos *flex-fuel* fez a produção de cana-de-açúcar e de etanol mudar de patamar, sendo esta a razão responsável pelas elevadas taxas de crescimento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, experimentadas pelo menos até 2008 (CORTEZ, 2016). A entrada da nova tecnologia dos veículos *flex-fuel* expandiu a demanda por etanol, em uma situação favorável ao seu preço em relação à gasolina, houve uma efetiva pressão na direção de elevação da demanda por etanol (SILVÉRIO, 2007).

Esta elevação no preço do petróleo havia alavancado o debate sobre a busca de fontes alternativas renováveis de energia ao redor do mundo. A preocupação com questões ambientais ganhou força impulsionando os biocombustíveis fora de países tradicionalmente produtores, como o Brasil e Estados Unidos, onde se examinavam seus benefícios e seus custos para substituição dos derivados do petróleo.

III $\cong$ (2003/2004) – Nastari (2006) aponta para uma diminuição do ritmo de expansão da oferta de sacarose, de fato, foi observado para o ano de 2004 um estacionamento no nível de evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar. No entanto, neste período, houve um aumento do volume em dólar, da exportação de açúcar (PEREZ; TORQUATO, 2006).

O Brasil em 2003/2004 presenciou um aumento dos canaviais (veja anexo III), devido a expectativa favorável que ocorria nesta fase, de melhorias de preços, de um aumento de demanda e havia, também, uma possibilidade de abertura do mercado americano para exportação do etanol. O plantio avançou para além das áreas tradicionais do interior de

São Paulo e do Nordeste, espalhando-se pelos cerrados, em regiões de terras mais acessíveis economicamente, como Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul. A iniciativa privada liderou este movimento com a construção e ampliação de novas usinas.

Isto trouxe mudanças estruturais internas para a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar: áreas de expansão precisam de um preparo especial para o primeiro cultivo, com maior uso de máquinas, mais insumos, mão de obra mais especializada. Já no elo industrial, normalmente, optou-se por usinas mais modernas e com maior escala, com o uso de caldeiras de pressões e temperaturas maiores, bem como o uso de equipamentos mais eficientes, além de maior capacidade produtiva, o que transformou o panorama de custos do setor em sua composição de gastos.

IV $\cong$ (2004/2007) – A tecnologia *flex-fuel* (FFV) na frota brasileira de veículos leves e de carga teve um impacto significativo no padrão de demanda por combustível no país e continuou assim neste período analisado. Em particular, observou-se o seguinte: a existência de uma quebra estrutural nas séries temporais de demanda de etanol hidratado e gasolina C; e a crescente importância, em termos de demanda, da variável preço relativo do etanol-gasolina (GOMEZ; LEGY, 2015).

Salienta-se que existe uma relação estreita entre o mercado de açúcar, etanol e gasolina. Balcombe e Rapsomanikis (2008) confirmam essa inter-relação entre os três mercados. Quanto ao preço da gasolina, um choque positivo causa um aumento na produção na demanda de etanol. A mesma dinâmica é observada para o mercado de açúcar, com um choque positivo no preço da gasolina, a demanda por etanol aumenta, menos açúcar é produzido, com isso o preço do açúcar aumenta, aumentando assim a produção de açúcar no período seguinte. Percebe-se que esses efeitos são vistos no curto e no longo prazo (MELO; SAMPAIO, 2016).

Nota-se que a partir de meados 2004, os preços do etanol estavam abaixo do preço da gasolina e assim permaneceram até pelo menos 2007, que vinha com os preços da gasolina em patamares altos, o que proporcionava a produção do etanol e sua venda a preços moderadamente inferiores em relação à gasolina. Isto favoreceu o aumento do consumo de etanol hidratado (SOUZA e POMPERMAYER, 2015).

Houve, também, a maior conscientização sobre o Protocolo de *Kyoto*, que a partir de 2005 entrou em vigor, reativando projetos de substituição de combustíveis fósseis pelos

renováveis, com o surgimento do mercado de carbono. Abriu-se oportunidade para usinas utilizarem o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) e até 2006, havia 46 usinas com projetos registrados (MENEGUELLO; CASTRO, 2007). Para as nações comprometidas com as propostas do Protocolo de *Kyoto*, com créditos de carbono, puderam-se obter exploração econômica através de projetos de MDL, dentre outros.

V $\cong$ (2007/2009) – No ano de 2008/2009 destacou-se a ocorrência de uma crise mundial que abalou a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, que vinha confiante desde 2003. Tal perspectiva favorável, o qual o setor encontrava-se em períodos anteriores, motivou-o a se endividar e aumentar a produção (CAMPOS, 2015). O crescimento rápido da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar foi suportado pela alavancagem das usinas, que, atrelado ao período necessário para o *payback* dos investimentos e para a geração de caixa, se transformou paulatinamente em elemento impeditivo para que se contraíssem novos débitos. A conjuntura negativa de crédito, se intensificou ainda mais com a crise financeira internacional de 2009. Consequentemente, os agentes financeiros retraíram mais o crédito, incluindo o giro às empresas da cadeia. Comprimidas pela falta de capital de giro em uma fase de necessidade de recursos, essas empresas apressaram as vendas de etanol durante a safra, o que diminuiu fortemente os preços. Essa circunstância tornou a capacidade de investimentos ainda mais deteriorada. Em 2007 e 2008, não havia nenhuma empresa da cadeia entre as empresas com os vinte maiores prejuízos líquidos. Em 2009, após o surgimento da crise, sete empresas do setor se incluíam entre os vinte maiores prejuízos líquidos entre as mil maiores empresas do Brasil (MILANEZ *et al.*, 2012).

A cogeração parece ser estimulada nos momentos de maior vulnerabilidade, de 2008 para 2010 houve um crescimento de 13,63% no uso por parte das usinas para a cogeração, saltando de 88 para 100 unidades. Em 2009, o mercado de biomassa, através da produção de cana-de-açúcar, obteve uma boa performance: registrou expansão de 33% nas vendas de energia para o SIN (SOUZA, 2010). Estas informações indicaram um impulso da cadeia para modernização do parque industrial, através de *retrofits* com a troca por caldeiras e equipamentos de maior eficiência.

Além disto, outros fatores contribuíram para um momento ruim no período: condições climáticas adversas, perdas cambiais significativas em muitas usinas, queda das exportações devido contração da demanda de etanol no exterior. O resultado foi uma descapitalização generalizada, com escassez de financiamentos internos e externos, que

somada a uma baixa intervenção estatal fizeram com que muitas usinas e produtores falissem, portanto, a alternativa encontrada pelo setor foi reestruturar-se financeiramente através de fusões e/ou aquisições.

VI $\cong$ (2009/2010) – Entre 2008 e 2010 a oferta de etanol praticamente estagnou e os preços da gasolina seguiram em queda de valor real. A partir de 2010, a situação melhorou em decorrência da elevação persistente dos preços do açúcar e do etanol, o que contribuiu na direção da retomada dos investimentos, seja para aumento da oferta de cana, seja para expansão ou implantação de novas usinas. A energia elétrica vendida à rede, também teve destaque. Este período marca o início do uso de caldeiras de 100 bar de pressão, tendo por exemplo: as unidades de Jataí em Goiás e Barra Bonita em São Paulo, da Raízen (AGROLINK, 2010; PROMON, 2017).

VII $\cong$ (2010/2013) – Se considerou a ocorrência de problemas como os relativos à contenção do preço da gasolina ocorrida especialmente entre 2011 e 2014, que prejudicou o setor de modo substancial (ALMEIDA; OLIVEIRA; LOSEKANN, 2015).

Houve uma redução do volume de cana disponível, entre os anos de 2010 e 2011, pelo baixo investimento na área agrícola e pelo clima não favorável (MAGOSSY, 2011), além de preços menores no período (FARIA, 2013). Neste período, a oferta nacional de cana-de-açúcar recuou 9,86%, em consequência da estiagem e da diminuição de produtividade por conta do envelhecimento de canaviais. Ocorreu uma baixa renovação dos canaviais, aumentando a idade média das plantações e reduzindo a produtividade. Os canaviais envelhecidos são mais suscetíveis a fatores climáticos desfavoráveis, a doenças e pragas (BACCHI *et al.*, 2017). Notou-se um decrescimento de produção do açúcar (-6,2%) e do etanol (-17,7%) (CONAB, 2017).

Em abril de 2011, a ANP passa a regular e fiscalizar a produção de etanol, agora considerado um biocombustível líquido. O percentual do etanol anidro poderia variar de 18 a 25% dependendo da regulamentação governamental (CASTRO, 2012).

Neste mesmo ano, os produtores de etanol anidro das usinas, ficaram obrigados a possuir estoque próprio em volume, com no mínimo, 25% da comercialização que teve com o distribuidor no ano anterior. Também foi exigido, no mínimo, cento e vinte dias de autonomia de sua produção em estoque; dentre outras exigências legislativas. A obrigação

do estoque próprio, exige maior capital, o que explica em parte o grande aumento de custos observados na curva de experiência entre 2011 e 2012.

Com o preço do etanol pouco atrativo frente ao da gasolina para o consumidor nos postos de combustíveis, no ano de 2011, as importações de gasolina ultrapassaram as exportações, movimento que veio a esfriar apenas em 2013, consequência do aumento da capacidade de refino da Petrobras e, mais uma vez, a elevação da proporção de etanol anidro na gasolina, de 20% para 25% (ALMEIDA; OLIVEIRA; LOSEKANN, 2015).

Nesse enfoque ressalta-se que em junho de 2012 a Petrobras aumentou o preço da gasolina nas refinarias, o qual não foi transferido ao consumidor final, uma vez que o governo ajustou em zero a Contribuições de Intervenção no Domínio Econômico – CIDE – sobre os combustíveis.

VIII $\cong$ (2013/posteriores) – A continuidade da contenção do preço da gasolina no Brasil utilizada para segurar os preços da inflação, com consequente distanciamento dos preços praticados internamente em relação aos preços internacionais, deixou o etanol menos conveniente ao consumidor. Este fato provocou uma crise na cadeia, com o fechamento de usinas que processavam etanol, uma vez que o preço máximo do etanol é estabelecido em torno de 30% abaixo da gasolina. Em 2014, houve estiagem expressiva no centro-sul, com fenômenos climáticos adversos, acarretando uma diminuição da cana-de-açúcar de 3% na produção (CONAB, 2017).

Foi percebido uma tendência de aumento do uso da bioeletricidade nas usinas (TIEGO, 2017). Além de surgimento de novas tecnologias como a cana-energia, onde se diz que é possível um aumento de produtividade em t/ha por um valor de no mínimo 85%, segundo Mariano (2015).

O setor pressionado pelas baixas rentabilidades requisitou aumento da proporção da mistura de etanol anidro à gasolina e então em março de 2015, foi atendido com elevação para 27%. O Governo, através da PETROBRAS, conteve os preços da gasolina até meados de 2015, quando ela volta a ser reajustada para o consumidor.

O ano de 2015 foi marcado pelo ponto de reviravolta no ciclo de maiores dificuldades para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, ou seja, o etanol e o açúcar obtiveram um princípio de melhorias de preços. Houve uma elevação na procura por abastecimento de etanol, os preços, nesta época, não subiram rapidamente porque os estoques ainda

estavam elevados. Os consumidores responderam rapidamente a diferença de preço dos combustíveis e o etanol se tornou um maior concorrente em comparação à gasolina, e, em vários estados brasileiros, voltou ser consumido (DUARTE; RIZZARDO, 2015).

A Figura 22, expõe de maneira bem sucinta a cronologia dos eventos deflagradores mais significativos. Salienta-se a mudança de análise entre a pré e pós desregulamentação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Figura 22 – Cronologia pré e pós desregulamentação

Fonte: o autor

4.2 Resultados da Curva de Experiência

Os custos baixos são um importante fator de capacidade, por isso, entendemos que a curva de experiência pode contribuir para uma análise mais aprofundada desta temática. As margens podem ser definidas pelo preço oferecido pelo mercado subtraído dos custos, assim, se justifica a integração, a relação desta análise de custos como um item importante para o entendimento da resiliência.

Somados a este argumento salienta-se que Meyer (1982) sinalizou que as empresas absorvem o impacto das perturbações de duas maneiras: por meio de uma reação, denominada resiliência; ou adotam novas práticas ou configurações por meio de mudanças e de aprendizagem, que pode ser identificada matematicamente por meio da curva de experiência.

Para entender fenômenos e variáveis que afetam a cadeia e consequentemente a resiliência é preciso entender as mudanças no setor do etanol, bem como da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, decorrentes da mudança do volume de produção e seu respectivo impacto nos custos.

Estudos que investigam os avanços e reduções de custos na cadeia da cana-de-açúcar por meio da curva de experiência são relativamente escassos. Para indústria de etanol brasileira, os trabalhos identificados mais citados foram dos seguintes estudos: Goldemberg (1996), Moreira e Goldemberg (1999), Goldemberg *et al.* (2004), Bake (2006), Bake *et al.* (2009). A aprendizagem, ou seja, a redução de custos conforme acontece o acúmulo da produção, tem sido utilizado como ferramenta para analisar este comportamento de custos. Na cadeia da cana-de-açúcar muitos fatores afetam a resiliência e rentabilidade deste setor.

Os custos da produção do etanol anidro e hidratado foram exaustivos de se coletar, pois não haviam dados confiáveis em um só lugar disponível, além disto, as poucas séries históricas eram limitadas e se contradiziam. Nota-se ainda, que a diferença entre os custos e preços encontrados para o etanol e a cana-de-açúcar muitas vezes era *negativa*. Isto é uma boa indicação de incerteza e sensibilidade em relação a confiabilidade dos dados.

Como resultado, dados confiáveis dos custos de produção não estavam amplamente disponíveis e estudos individuais não forneceram as séries necessárias durante todo

intervalo estudado. Até 1997/1998 os valores foram baseados em custos de produção encontrados na literatura; a desregulamentação total do mercado do etanol hidratado em fevereiro de 1999, tornou-se impossível encontrar novas séries de custos de produção, com a exceção de estudos do PECEGE, a partir de 2007. Outros autores, para mitigar o problema, utilizaram o preço como *proxy* para custos, mas isto é somente adequado em situações onde realmente não conseguimos constatar ou averiguar minimamente o custo ou em situações onde precisa-se estimá-lo. A partir de 1998, os dados de custos de produção do etanol e da cana-de-açúcar foram calculados pelo modelo de simulação.

A Tabela 05 exhibe os valores para preço e custo, por ano, da cana-de-açúcar. Os dados de preços foram obtidos na CONSECANA/UDOP, sendo os de custos pelo PECEGE. Os custos obtidos no modelo de simulação estão no mesmo patamar das informações do PECEGE.

Ano	Preço	COE	CT	COE Comparação	CT Comparação
2007	35,18	39,16	48,11	$P < C$	$P < C$
2008	39,66	39,01	51,45	$P \approx C$	$P < C$
2009	46,22	31,53	49,72	$P > C$	$P < C$
2010	56,20	32,12	59,33	$P > C$	$P < C$
2011	68,46	36,32	70,73	$P > C$	$P < C$
2012	64,06	48,18	80,73	$P > C$	$P < C$
2013	60,95	51,23	81,24	$P > C$	$P < C$

Tabela 05 - Preço, Custo Operacional Efetivo (COE) e Custo Total (CT) - Cana-de-Açúcar

Fonte: o autor com dados de CONSECANA/UDOP (2016), PECEGE (2007:2013)

Observe-se que ao compararmos os dados da coluna Custo Total (CT) com o preço, percebemos que *todos os custos totais superam os preços*, o mesmo não ocorre quando se utiliza o Custo Operacional Efetivo (COE), explicando assim o motivo dos produtores de cana-de-açúcar se manterem no mercado, mesmo quando se é esperado que deixassem a atividade.

Além disto, estes resultados estimularam um olhar no âmago da questão, ou seja, a criação do próprio modelo, o qual simula os custos e margens com intensão de aprofundar o conhecimento das relações que afetam estes valores, com uma visão apurada dos processos internos da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e, com isto, ampliamos o discernimento, clareza e elucidação do funcionamento deste sistema.

Ao avaliar as curvas de experiência ressalvamos que cuidados devem ser tomados, pois existem armadilhas que o analista pode enfrentar, levando-o a conclusões equivocadas: como o uso do preço quando as margens não permanecem constantes ao longo do tempo, a utilização de tendências com pontos e períodos que induzem a algum resultado em particular, a influência significativa da produção acumulativa inicial nas PRs calculadas e assim por diante.

Nos resultados apresentados, certamente se incluem efeitos de escala, uma questão levantada desde a década de 1970, e vinham associadas com a complexidade em distinguir os seus efeitos sobre a variação de custos pela experiência acumulada, dos quais residiam nas economias de escala. Atualmente, existem trabalhos que demonstram a identificação e desmembramento destes efeitos: o efeito de escala apresenta um deslocamento gradual à frente ao longo da curva de custos médios, conforme vai progredindo a escala de produção, quanto ao efeito de aprendizagem o deslocamento da curva de custo é diretamente descensionalmente (OLIVEIRA, 2012). Sua influência sobre o custo pode ser estimada pela aplicação de um fator de escala determinado empiricamente, como neste trabalho, ou determinado teoricamente.

4.2.1 *Curva de Experiência do Elo Agrícola*

A segmentação dos custos, separando-os da parte agrícola e industrial contribuiu para o melhor entendimento do fenômeno, uma vez que podemos examinar com maior profundidade cada um destes elos, optou-se por separar por tendências, com intuito de uma análise mais detalhada. É possível notar três tendências: de 1975 a 1981; 1981 a 1997; 1997 a 2014.

Deste modo, decidiu-se por dividir, no Gráfico 03, que abrange o período de 1975 a 2014 a relação de custo por produção de cana-de-açúcar (R\$/t) acumulado, representando os custos do elo agrícola. Onde custo pertence ao eixo y, e volume ao eixo x.

- O primeiro período, representado pela tendência em azul, dos anos iniciais de 1975 a 1981, não apresentou diminuição de custos, e sim uma tendência de elevação considerável com uma PR de 1,290. Esta é uma indicação que neste período os custos da cana-de-açúcar aumentaram, quase certamente devido ao aumento da demanda pelo produto.

- No segundo período, representado pela tendência de cor laranja, de 1981 a 1997, houve uma reversão da tendência de crescimento de custos (PR de 0,595). A propósito, o rápido decréscimo de custos a partir de 1981, mostrou uma diminuição de 38,4% de custos por dobra de volume produzido de cana-de-açúcar.
- No terceiro período, representado pela tendência de cor cinza, 1997 a 2014, indicou que os custos se elevaram (PR de 1,260), depois de uma grande queda nos anos de 1998 e 1999. Observou-se uma maior dispersão dos custos a partir de 1998, período no qual coincidiu com a desregulamentação do setor. Ressaltamos que, a partir de 1997, optamos por criar uma nova tendência independente, por entender que este ponto apresentou uma nova conjuntura na cadeia de suprimentos. Esta tendência mostrou um resultado importante que é o aumento dos custos do elo agrícola.

Observe o Gráfico 03:

Gráfico 03 – Volume de Cana-de-Açúcar por Custo Agrícola (log-log) - Tendências

Fonte: o autor

4.2.2 Curva de Experiência do Elo Industrial

Neste ponto analisamos somente o elo industrial. Deste modo, observou-se no Gráfico 07, uma curva de experiência para o período compreendido de 1975 a 2014. Ela mostrou a relação de custo por volume de etanol produzido em m^3 . Onde custo pertence ao eixo y, e volume ao eixo x. Estes representaram as tendências de custos industriais, exclusivos

para o elo industrial, ou seja, os custos agrícolas aqui foram desconsiderados. Foram criadas três tendências: de 1975 a 1981; 1981 a 1997; 1997 a 2014. Observe o Gráfico 04:

- A primeira tendência representada na cor azul, indicou que no período os custos se elevaram (PR de 1,076). Foi importante notar que nesta tendência o volume de etanol aumentou em proporção maior que ao volume de cana e seu custo cresceu em menor proporção.
- Na segunda tendência, representada pela cor laranja, houve uma reversão de elevação, e declinou (PR de 0,754). Onde observou-se o rápido decréscimo de custos industriais, a partir de 1981 a 1997, uma redução de custos próxima a 25% por dobra de volume de produção.
- A terceira tendência, representada pela cor cinza, indicou que os custos continuaram a diminuir, a uma taxa menor ao do período anterior (PR de 0,857), uma redução de aproximadamente 14% por dobra. A partir de 1997, observou-se uma grande dispersão. Alguns anos tiveram custos excepcionalmente baixos para o período. São os casos dos custos dos anos 1978, 1983, 1998, 2003 e 2010. Além disto, esta construção também optou por separar em uma nova tendência, a partir de 1997, período pós-desregulamentação e notou-se uma tendência de diminuição, a qual pareceu compensar o aumento de custos agrícolas observados no período.

Gráfico 04 – Volume de Etanol por Custo Industrial (log-log) - Tendências

Fonte: o autor

4.2.3 Curva de Experiência: custos totais

Para melhor entendimento da evolução do comportamento de custos, no setor sucroalcooleiro brasileiro, optou-se por construir um gráfico log-log para a curva de experiência, com intuito de compreender com maior pertinência as transformações dos custos ao longo do tempo. Os custos totais de produção do etanol (R\$/m³) no qual inclui os custos de matéria-prima, foram feitos para o período de 1975 a 2014, englobando os elos agrícolas e industriais.

Apresenta-se, no Gráfico 05, a relação entre custo por m³ produzido, pelo volume acumulado de produção. Onde custo pertence ao eixo y, e volume ao eixo x. O gráfico de volume de etanol por custo mostra algumas datas importantes:

- Observe o rápido decrescimento de custos a partir de 1982 a 1990. Foi um período de grande queda.
- De 1990 a 2000 a taxa de decrescimento dos custos foi menor.
- E de 2000 a 2010 com uma taxa ainda menor, com grande variação de custos totais.
- De 2011 a 2014, os custos voltaram aos patamares dos anos 2000s.

Ainda, se demonstraram os custos totais de produção de etanol, incluindo tanto os custos do elo agrícola quanto do elo industrial. A tendência é de decrescimento de custos ao longo do tempo de 1975 a 2014, representada pela linha de tendência preta pontilhada. A PR é de 0,782 o que significa que a cada dobra do volume produzido o custo diminui em aproximadamente 22%. O r^2 é de 0,8768 e mostrou a dispersão dos pontos no gráfico, percebemos uma maior dispersão a partir de 1996, período onde se intensificou a desregulamentação do setor. O resultado da tendência global obteve a observação de uma grande redução nos custos de produção, apresentado na “curva de aprendizado” (sic).

Gráfico 05 – Volume de Etanol por Custo Total (log-log) – 1975 a 2014

Fonte: o autor

4.2.4 Curva de Experiência: custos totais por tendências

Ao percebermos diferenças conjunturais na evolução dos custos totais, os quais a literatura e nossos resultados apontaram para efeitos de alterações de estrutura da cadeia de suprimentos em períodos específicos. No Gráfico 06, optou-se por separar as tendências por períodos, com intuito de uma análise mais detalhada. Assim, dividiu-se em três períodos, os quais foram: 1975 a 1982; 1982 a 1997; 1997 a 2014.

O elo agrícola apresentou um forte aumento de custos até o ano de 1978, seguido por uma tendência de decréscimo. Já o elo industrial, indicou que no período até 1981 houve pequena elevação de custos.

Sucedeu grande dispersão neste intervalo se considerarmos as curvas separadamente. Ao reunir os dois elos o decréscimo dos custos agrícolas praticamente compensou essa diferença, se mantendo relativamente estável como a PR do Gráfico 06 aponta.

Os dados de custos do período até 1997 foram colhidos de Bake *et al.* (2009), os autores afirmaram que foram coletados de várias fontes, porque nenhum único conjunto de dados foi encontrado. Na série entre 1975-1986, foram coletados a partir de publicações em revistas históricas como o Brasil Açucareiro, sendo esta, um periódico do IAA, que acompanhou os custos de produção para fins de subsidiar políticas do setor. Essa

explicação, a princípio, afastou a possibilidade de que os custos neste período fossem na verdade preços, o que poderia explicar essa volatilidade.

Outro ponto a ser considerado é o aspecto metodológico. Os dados de custos de produção da cana-de-açúcar são relativamente fáceis de serem encontrados, ao contrário dos custos industriais do etanol e açúcar, que possuem um alto grau de sigilo.

Notou-se uma aparente incoerência na redução dos custos. Veja que os períodos de maior estímulo governamental, através de subsídios, de definições de preço vantajosas, de cotas, de financiamento com taxas baixíssimas, com venda e planejamento de exportação garantidos, ocorreram no início do PROÁLCOOL. Houve uma mudança radical no período posterior, em torno de 1986, onde passou a existir um contexto de profunda crise econômica, e ainda assim o custo diminuiu.

Observou-se como o custo se manteve estável, nesta primeira tendência, mesmo com os diversos incentivos do governo, a razão principal parece ser esclarecida como os números demonstraram: houve um avanço, principalmente, na quantidade de usinas para atender o PROÁLCOOL e não uma preocupação com a otimização. Além disto, leva-se algum tempo até o setor reagir adequadamente.

Uma possível explicação/argumentação para isto, na segunda tendência, pode ser uma concentração de usinas e empresas mais eficientes que sobreviveram no mercado, comprando empresas mais frágeis, ou mesmo, os menores produtores falindo ou mudando de atividade. Observou-se, que em certos períodos históricos, os produtores podem ter diminuído sua margem de lucro ou mesmo trabalhado com prejuízos. Se os custos presumidos tiverem os preços como componente para esta presunção, uma parte da variabilidade pode ser explicada por essa consideração técnica.

Para os anos de 1975 até 1982, indicam que, nesta tendência, em cor azul, os custos do etanol não diminuíram, PR de 1,009 – acima de 1. Este valor apontou que neste período os custos do etanol não decaíram, ficando próximo de um aprendizado nulo. Neste período, apresentou pouca variação de custos.

Sabe-se que quando acontece uma expansão da área plantada, como houve no período, os custos agrícolas, inicialmente, tendem a subir devido aos custos da implantação da lavoura em novas áreas, então, parte da elevação desses custos podem ser justificada por

esse fator. Como exemplo, temos locais não explorados em safras anteriores, não tão favoráveis para sua produção e colheita, acarretando, com isso, aumento de custo de transporte por aumento da distância e pode, também, pressionar os custos de mão de obra, além de outros fatores.

Observe-se como 1982 foi um ano de inflexão para os custos totais. Além do aumento de escala notado nesta tendência, bem como, o aumento gradual da produção de cana-de-açúcar, etanol, açúcar em volumes maiores, levaram a uma concentração de capital, tendo por consequência uma integração maior da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar de maneira vertical, o que indiretamente resultam na otimização e redução de custos.

Para a tendência de 1982 a 1997, em cor laranja, os custos diminuíram rapidamente, com de PR de 0,725 ou seja, 27,5% de redução a cada dobra do volume. Houve uma redução significativa e constante nos custos de produção. Tanto os agrícolas, quanto os industriais tiveram forte decréscimo.

No ano de 1983, com o novo sistema de remuneração da cana, proporcionou maior teor de ATR na cana-de-açúcar, o que afetou os custos nos transportes, melhora a eficiência dos processos internos da indústria, bem como, obrigou aos produtores adotarem variedades de cana de melhor qualidade. Por esses motivos, explicam-se uma parcela da redução gradual dos custos industriais a partir de 1981, e o aumento de produtividade agrícola entre 1981 e 1983, que acabou não se manifestando de forma expressiva no exame de redução de custos a curto prazo.

Os anos de 1978 a 1985 apresentaram uma diminuição de custos agrícolas; em 1979, veio diminuindo com grande intensidade, até o ano de 1984. Ao se considerar o custo industrial, entre os anos de 1978 a 1981, observou-se uma elevação, com diminuição no ano de 1982 até 1985, mas com maior dispersão a partir desta data.

Em 1985, o governo iniciou o corte de subsídios refletindo no custo do elo agrícola; os custos industriais permaneceram com tendência de queda, apesar da estagnação da produção do etanol hidratado, quanto ao açúcar apresentava bons preços no mercado internacional. Em 1989, houve um grave problema de desabastecimento do álcool, enquanto o açúcar continuava a apresentar bons preços internacionais. As receitas de exportação do açúcar brasileiro cresceram consideravelmente a partir desta data, mais

especificamente a partir de 1999, e atingiram seu ápice em 2006 (FERREIRA; TEIXEIRA; SOUZA 2009).

De 1997 a 2014, apresentada pela tendência em cor cinza, continuou havendo um decrescimento. A partir de 1997, observou-se uma maior dispersão dos custos. A redução acentuada dos custos observada em 1998 e 1999, assim como a variação acentuada dos custos nesta última tendência pôde ser elucidada pelo início da desregulamentação nesse setor, quando o governo reduziu os preços pagos aos produtores de cana-de-açúcar. Isso afetou os custos médios de produção observados e através do modelo, podemos notar que estes pontos apresentaram custos superiores aos preços praticados no mercado, pressionando para um valor do etanol para abaixo do preço de custo. Percebeu-se um grande salto entre 2004 e 2005, 2010 e 2011 nos custos, seguido por um período de redução até 2014. A PR foi de 0,979.

A terceira e última tendência, demonstrada na cor cinza, possui custos bem oscilantes, além de ser importante notar que ao se comparar exclusivamente os anos de 1997 e 2014 para os custos totais diminuiriam levemente. De maneira geral, os custos do elo agrícola estão subindo o que se refletiu na taxa de aprendizado acima de 1 (hum), e apresentou uma tendência de crescimento de custos. Dentro desta perspectiva, vale notar que os primeiros anos desta tendência (1997 e 1998) tiveram custos mais baixos que o ano de 2014, e ainda assim, notou-se um movimento de ligeiro decrescimento na tendência. Vale notar que os anos de 1997 e 1998 foram anos conturbados, portanto de menor elucidação no contexto.

A evolução de custos da cadeia se manteve oscilante, não só na indústria, tal qual, nas plantações de cana. A imobilização de maiores recursos financeiros foi necessária, pois motivado não só por exigências ambientais, bem como, legislativas; existindo um dispêndio crescente em equipamentos, em máquinas agrícolas e em todas fases produtivas que acarretaram em custos maiores no que diz respeito à área financeira, necessitando também, de mais acesso a financiamentos. É lícito supor que parte do aumento de custos observados nesta tendência é um reflexo desta situação.

O aproveitamento da palha e do bagaço da cana utilizados na cogeração de energia, o qual foi acentuado seu uso nesta terceira tendência, foi também responsável por parte do aumento dos custos industriais, mas também nas margens. A curva de experiência pôde

examinar, neste caso, somente os custos, não conseguindo captar os efeitos das margens financeiras positivas do uso do bagaço, além do impacto ambiental que é importantíssimo.

Pode-se afirmar que um mecanismo muito importante para reduzir os custos de produção é o aumento de seu volume produzido. Na produção agrícola, pelos seus atributos requerem um emprego eficaz dos fatores produtivos, esta decisão repercute no seu custo total, que pressiona os ganhos da atividade como um todo. As reduções de custos da cana-de-açúcar, predominantemente, são atribuídas ao aumento dos rendimentos agrícolas ou de produtividade.

A partir da terceira tendência, os aumentos dos custos agrícolas podem ser responsabilizados pelo aumento da mecanização, da absorção de novas tecnologias e modernização, assim como, exigências legislativas, além do custo de arrendamento, entre outros. Quanto às reduções dos custos industriais podem ser imputadas em sua grande maioria aos aumentos de escala dos processos de moagem, fermentação e automatização, além das diminuições de perdas de ATR, ou seja, de aumento de eficiências industriais. Estes fatores foram importantes na primeira e segunda tendência, e, a partir da desregulamentação, as fusões e aquisições, o aumento de escala e concentração de mercado, as melhorias das eficiências industriais, bem como, a elevação das vendas de bioenergia explicam às reduções de custos industriais para à terceira tendência.

Pode-se argumentar que o desenvolvimento tecnológico foi um dos grandes responsáveis pela diminuição de custos para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar nas tendências apresentadas. A investigação dos avanços tecnológicos ao longo do tempo, mostra que na primeira tendência, o objetivo foi focar em elevar a capacidade produtiva aceleradamente, tendo em vista que o pensamento primordial era a criação de novas usinas para atender a demanda interna, cada vez maior, pelo aumento da proporção do etanol anidro à gasolina e posteriormente ao veículo a álcool. Isto ocorreu, inclusive sem preocupação de otimização de eficiências altas, pois a política governamental de garantia de compra, concedia aos produtores subsídios e boas margens. Na segunda tendência, veio a preocupação com as eficiências, pois diminuíram os subsídios, aumentaram a criação de usinas de maiores portes, concentração em áreas mais adequadas ao cultivo, com a importação e absorções de tecnologias mais modernas. A terceira tendência pode ser caracterizada pelo avanço de técnicas gerenciais, pela maior competitividade do mercado,

liberdade de preços, menor intervenção estatal e aumento no número de fusões e aquisições, além de melhoramento das margens pelas vendas de bioenergia.

Gráfico 06 – Volume de Etanol por Custo Total (log-log) – Três Tendências – 1975 a 1982; 1982 a 2010; 2011 a 2014

Fonte: o autor

4.2.5 Razão de Progressão (PR) das Curvas de Experiência

Criou-se uma tabela para sintetizar os resultados das Progressões de Razão (PRs) das tendências observadas (ver Tabela 06), no qual incluiu as análises dos custos totais, do elo agrícola e do elo industrial.

Nota-se que na primeira tendência os elos agrícolas e industriais cresceram, mas com maior aumento do elo agrícola. Já na segunda tendência, tanto o agrícola e o industrial diminuíram, com a maior diminuição do elo agrícola. Finalmente, na terceira tendência, os resultados foram divergentes, o agrícola subiu e o industrial diminuiu, com uma pequena tendência de baixa para os custos totais.

	Primeira Tendência	Segunda Tendência	Terceira Tendência
Custo Total	1,009 (+0,9%)	0,725 (-27,5%)	0,979 (-2,1%)
Elo Agrícola	1,290 (+29,0%)	0,595 (-40,5%)	1,260 (+26,0%)
Elo Industrial	1,076 (+7,6%)	0,754 (-24,6%)	0,857 (-14,3%)

Tabela 06 – Tendências, Razão de Progressão e Variação por Dobra

Fonte: o autor

4.2.6 *Discussão com Trabalhos Similares*

Goldemberg (1996) - O trabalho de Goldemberg (1996) merece destaque pela inauguração do estudo de redução de custos através da curva de experiência para o etanol brasileiro. Seus resultados apontaram que para o período de 1982 a 1990 o custo de etanol declinou rapidamente a uma PR de 70% e depois de maneira mais lenta a 90%. Este comportamento pode ser interpretado como uma alta expansão da produção anual e do progresso tecnológico, resultando em um decrescimento acelerado de custos. Depois de 1990, o nível de produção estagnou, e o preço reduziu de maneira mais lenta. Goldemberg (1990) ainda apontou que existia naquele momento duas direções de avanços tecnológicos para redução de custos: avanços na produção de cana, com melhoramentos na área industrial e o uso eficiente do bagaço para a cogeração de eletricidade.

Os preços podem ser parâmetros muito imperfeitos de custos. Os dados utilizados por Goldemberg (1996), por exemplo, foram colhidos com base nos preços pagos aos produtores de etanol no Brasil, e um olhar mais atento ao seu artigo original sugeriu que esses preços têm, em certa medida, oscilações devido aos preços internacionais do petróleo. Assim, parte da oscilação, refletiu não a variabilidade dos custos de produção de etanol, mas a volatilidade nos mercados internacionais de petróleo. Ainda assim foi um marco por sua originalidade no estudo das evoluções de custos para a cadeia de cana-de-açúcar.

Moreira e Goldemberg (1999) - Moreira e Goldemberg (1999), em seu artigo intitulado '*The Alcohol Program*', exporam o processo de produção do açúcar e do etanol, as características técnicas do combustível, bem como uma discussão da evolução do custo de produção, problemas ambientais, cogeração de energia, consequências sociais, e discutiu o futuro do PROÁLCOOL.

Quanto à evolução dos custos, a produção de etanol foi perto de 100 dólares por barril, nos estágios iniciais do programa, e em 1980, caiu rapidamente devido às economias de escala e do progresso tecnológico para metade desse valor. Já nos anos de 1990, seguiu para um declínio mais lento nos custos com uma PR de 90%. O trabalho expôs algumas áreas onde existia, à época, potencial de redução industrial e agrícola e levantou elementos onde os maiores avanços ocorreram. Discutiu-se o porquê do baixo

aprendizado a partir de 1990, além disto, o trabalho realizado, pôde ser considerado uma continuação mais aprofundada do primeiro artigo.

Goldemberg, Coelho, Nastari, Lucon (2004) - Goldemberg, Coelho, Nastari e Lucon (2004) demonstraram, por meio da experiência brasileira com o etanol, que as economias de escala e avanços tecnológicos levaram ao aumento da competitividade deste combustível renovável, reduzindo a diferença de custos com os combustíveis fósseis convencionais. Mostraram-se que a taxa de progressão do etanol brasileiro atingiu a razão de 93% para o período de 1980 a 1985 e 71% para o período de 1985 a 2002.

Bake, Junginger, Faaij, Poot, Walter (2009) - Bake *et al.* (2009) fizeram uso de curvas de experiência para avaliar a evolução de custos de produção no setor agroindustrial e fizeram uma previsão das consequências no decorrer do tempo. Tal estudo, juntamente com trabalhos desenvolvidos anteriormente, proporcionou informações valiosas ao abordar os fatores que conduziram a um longo e progressivo período de decrescimento de custos, em que foi significativa esta redução. A partir desses estudos, acreditaram, que subsidiariam melhores avaliações, conduções e estimativas na evolução dos custos, permitindo previsões de modo mais confiáveis. Atenta-se para o fato de que este trabalho foi decorrente, em boa parte, da dissertação de Bake (2006).

O objetivo principal de Bake *et al.* (2009) foi compreender reduções de custos alcançadas dentro da indústria de produção de bioetanol brasileiro, ao longo de 30 anos. Procurou-se averiguar se o conceito de curva de experiência poderia ser usado para descrever separadamente os custos industriais dos agrícolas. Ainda se concluíram, que os custos de produção de etanol têm diminuído de forma contínua nas últimas três décadas. Sua análise utilizou os preços como *proxy* dos custos de produção em anos onde não se obteve dados de custos.

Os cálculos sobre a curva de experiência da produção de etanol apresentaram uma razão de progresso $RP = 0,79$, $r^2 = 0,77$, no período de 1975-2004. O qual foi próximo do resultado encontrado neste trabalho de $RP = 0,78$, diante disto, podemos constatar que a taxa de aprendizado não se alterou nos últimos 10 anos, apesar de todas as oscilações observadas no período.

A curva de experiência sobre a produção de cana-de-açúcar mostrou uma $RP = 0,68$, e o $r^2 = 0,81$. Os custos declinaram ao longo de três duplicações cumulativas de aproximadamente R\$ 80,00 a tonelada em 1975 para abaixo de R\$ 30,00 em 2004.

O processo industrial declinou de aproximadamente R\$ 1000,00/m³ para quase R\$ 300,00/m³ ao longo de seis duplicações acumulativas, resultando em $PR = 0,81$, $r^2 = 0,80$.

O custo de produção total por metro cúbico declinou quase 75% de R\$ 2200,00/m³ para R\$ 600,00/m³ dentro de aproximadamente seis dobras acumuladas.

Com os custos da matéria-prima contribuindo com aproximadamente 60% do total dos custos de produção de etanol, a redução dos custos da matéria-prima contribuiu fortemente para as reduções de custo global. Seus resultados foram limitados pelo uso do preço como *proxy* de comportamento do custo, entre os anos de 1999 a 2004.

Foi o primeiro artigo que provou que a divisão da curva de experiência nos seus elos agrícolas e industriais, ao ser aplicada em diferentes partes da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, pode melhorar o entendimento sobre os fatores que direcionam as reduções de custos.

4.3 Resultados da Resiliência

4.3.1 Fatores de Capacidade e Vulnerabilidade da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar

Ao longo dos anos a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar vem alternando movimentos de turbulências e incertezas com períodos de bonança. A análise detalhada da literatura identificou os Fatores de Vulnerabilidade e Fatores de Capacidade através de uma pesquisa exploratória.

Os resultados dos Fatores de Vulnerabilidade e Capacidade estão alinhados à literatura. A passagem abaixo exemplificou a questão da vulnerabilidade. Apesar de tratar-se de uma crise específica, o artigo permanece representativo para o intervalo do nosso estudo, em um contexto em que a palavra crise tem sido amplamente utilizada para indicar diversas situações, ou fatores de vulnerabilidade como:

[...] a baixa rentabilidade e as reduzidas margens econômicas, a interrupção do funcionamento ou o fechamento de indústrias, a redução do investimento e o alto grau de endividamento [...] a contenção dos preços da gasolina; a não compensação tributária relativa aos impactos dos combustíveis fósseis; a elevação dos custos de produção; e a lenta adoção de tecnologias disponíveis para elevar a produtividade. [...] ineficiências na gestão das indústrias e da agricultura são também causas históricas de dificuldades [] estão [] entre os fatores mais listados para explicar os resultados negativos (SANTOS; GARCIA; SHIKIDA, 2015, p. 29).

Para a explicação das capacidades, foram identificados potencializadores de resiliência, entre eles, respostas organizacionais às ameaças externas, confiabilidade organizacional, adaptabilidade de modelos de negócios, fatores de capital humano e princípios de *design* que reduziram vulnerabilidades e interrupções da cadeia de suprimentos.

Os Fatores de Capacidade que se concentraram em recursos da dimensão organizacional centraram-se em forças financeiras, com a capacidade para absorver flutuações no fluxo de caixa, com estratégias para obterem margens mais altas, bem como, a capacidade de obter custos totais relativamente baixos dentro da cadeia de suprimentos. Esta foi uma das principais capacidades identificadas na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Enquanto a habilidade de produzir com custos baixos foi uma capacidade identificada na organização, obter preços elevados para o açúcar, etanol e energia elétrica são fatores majoritariamente macroambientais, principalmente a curto prazo. Além disto, nenhuma firma individualmente, por maior que seja, pode, deliberadamente, reivindicar o controle total e gerenciamento da resiliência de toda a cadeia de suprimentos. Atenta-se para o fato, de que é possível mudar o perfil de produção a médio prazo, optando, por exemplo, por produtos normalmente mais valorizados como o etanol anidro, o açúcar líquido invertido, o açúcar orgânico, entre outros, direcionando seus modelos de negócios a margens mais elevadas.

Existiu, também, uma variedade de fatores de capital humano que puderam aumentar a resiliência da cadeia de suprimentos; influenciando nas capacidades, nos conhecimentos, nas competências e nos atributos de personalidade que favoreceram a realização de trabalho de modo a produzir valor econômico diferenciado, assim como, a capacidade de reagir após a intervenção da cadeia de suprimentos.

Quanto aos princípios de *design* foram identificados estruturas físicas e organizacionais, as quais promovem flexibilidade, redundância e velocidade de reação. A flexibilidade se apresenta, por exemplo, na decisão de produção do açúcar e do etanol. Existe uma elasticidade na opção de escolha para qual produto será mais vantajoso ou mesmo de maior margem dentro da safra. A redundância, como o aumento de volume de produção, o qual se refletiu no aumento das escalas das usinas, da mesma maneira que, o balanceamento entre a ociosidade e ocupação dentro da cadeia. Quanto à velocidade de reação, percebeu-se que respostas mais rápidas às adversidades levam a menores perdas financeiras.

É importante destacar que os fatores que promoveram resiliência podem estar na dimensão organizacional (interna) ou na dimensão macroambiental (externa). Tal diferenciação tornou-se relevante em razão da compreensão da predominância entre os fatores de capacidades, relativas à resiliência na dimensão organizacional, implicando, talvez, numa subsequente subestimação da importância da dimensão macroambiental para os fatores de capacidade. Nesse sentido, observou-se, uma predominância de fatores macroambientais para a vulnerabilidade e uma predominância de fatores de dimensão organizacional para a capacidade, ao se avaliar o quadro proposto por Pettit; Fiksel; Croxton, (2010).

O Quadro 14 exibe os Fatores do construto de Vulnerabilidade identificados na cadeia de cana-de-açúcar e foi construindo com base no *framework* conceitual de Pettit; Fiksel; Croxton (2010), o qual o detalhamento de sua construção e operacionalização podem ser encontrado em outro trabalho, de Pettit; Croxton; Fiksel (2013):

Quadro 14 - Fatores do Construto de Vulnerabilidade identificados na Cadeia de Cana-de-Açúcar

Fator de Vulnerabilidade	Definição	Subfatores	Fatores de Vulnerabilidade identificados na cadeia de cana-de-açúcar
Turbulência	Ambiente caracterizado por mudanças frequentes em fatores externos que vão além do seu controle.	Flutuações nas moedas e preços	Flutuação preço do petróleo/gasolina Flutuação no preço do etanol
		Imprevisibilidade da demanda	Superprodução de etanol
		Falhas tecnológicas	Preocupação com as eficiências agrícolas Falta de uso da cogeração. Dependência de Informações Climáticas relativamente precisas
		Catástrofes naturais	Fatores climáticos desfavoráveis.
		Disrupções geopolíticas, pandemias.	Não identificado.
Ameaças deliberadas	Ataques intencionais destinados a interromper operações ou causar danos humanos ou financeiros.	Roubo, terrorismo / sabotagem, conflitos trabalhistas, espionagem, grupos de interesses especiais, responsabilidade por produtos defeituosos.	Segurança no trabalho, direitos trabalhistas
Pressões externas	Influências, não especificamente direcionadas à empresa, que criam restrições ou barreiras comerciais.	Mudança política / regulatória	Mudança estrutural (desregulamentação). Contenção do preço da gasolina.
		Inovação competitiva	Início de fusões e aquisições de empresas agroindústrias.
		Pressões de preços	Diminuição da expansão da oferta de sacarose. Dificuldade de crédito. Preço baixo da gasolina.
		Mudança social / cultural, responsabilidade corporativa, mudança ambiental.	É observado uma mudança na responsabilidade corporativa
Recursos limitados	Restrições da produção com base na disponibilidade dos fatores de produção.	Capacidade do fornecedor, produção e distribuição, disponibilidade de matérias-primas e serviços públicos, recursos humanos.	Falta de cana-de-açúcar. Falta de capital de giro e recursos financeiros.
Sensibilidade	Importância de condições cuidadosamente controladas para a integridade do produto e do processo.	Complexidade, pureza do produto, materiais restritos, fragilidade, confiabilidade dos equipamentos, perigos de segurança, visibilidade dos <i>stakeholders</i> , perfil simbólico da marca, concentração de capacidade.	Controle de qualidade no processo de fermentação, controle de proporções de concentração de teores, fornecimento de cana-de-açúcar limitado pela distância
Conectividade	Grau de dependência e de interdependência de entidades externas.	Rede sem escala, dependência de informações, grau de terceirização, canais de importação e exportação, dependência de fontes / origens especiais.	Dependência de cana-de-açúcar de fornecedores
Perturbações fornecedor / cliente	Suscetibilidade de fornecedores e clientes a forças externas ou perturbações.	Confiabilidade do fornecedor, perturbações do cliente.	Seleção adequada de fornecedores.

Fonte: o autor ampliado de Pettit; Fiksel; Croxton (2010)

Os fatores de vulnerabilidade levantados no arcabouço desenvolvido por Pettit; Fiksel; Croxton (2010) foram turbulências, ameaças deliberadas, pressões externas, recursos limitados, sensibilidade, conectividade, perturbações do fornecedor e cliente. Que foram definidos e caracterizados por seus subfatores. A ampliação do autor se dá posteriormente, com a inclusão dos fatores identificados na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Esta auxiliou a realizar um passo intermediário para a relação de causalidade. As organizações trabalham sob vários graus de pressões macroambientais, tanto técnicas quanto institucionais, diante dos desafios de sua própria cadeia de suprimentos.

O Quadro 15, exibe os Fatores do construto de Capacidade identificados na cadeia de cana-de-açúcar. Para mitigar riscos, os gerentes enfrentam o difícil desafio de escolher entre conjuntos de estratégias, avaliando cuidadosamente seus custos e benefícios. Em muitas ocasiões, os E.P.I.L.E.'s de desempenho não podem ser evitadas, e, portanto, sugere-se que na cadeia de suprimentos, o gerenciamento deve se concentrar no aprimoramento de capacidades de resiliência, ou seja, para resistir e recuperar, sem necessariamente evitá-los (URCIUOLI *et al.*, 2014). Observou-se que os fatores de capacidade têm, basicamente, caráter interno, onde a empresa pode se reorganizar estrategicamente para melhorar sua resiliência.

Quadro 15 - Fatores do Construto de Capacidade identificados na Cadeia de Cana-de-Açúcar

Fator de Capacidade	Definição	Subfatores	Fatores de Capacidade identificados na cadeia de cana-de-açúcar
Flexibilidade no abastecimento	Habilidade de mudar rapidamente os fornecedores ou o modo de receber as entradas.	Desenho modular de produto, múltiplos usos, flexibilidade de fornecimento, múltiplos fornecedores.	A usina tem a opção de escolher entre produzir a própria cana ou comprar de fornecedores.
Flexibilidade no pedido do cliente	Habilidade de mudar rapidamente o canal de distribuição ou o modo de efetuar as entregas.	Canais alternativos de distribuição, compartilhamento de risco, adiamento de produção, gerenciamento de inventário, requisitos de reencaminhamento.	O modal utilizado é sobretudo rodoviário. Alguns grupos dispõem de terminais logísticos próprios.
Capacidade	Disponibilidade de ativos para permitir níveis de produção sustentados.	Capacidade de reserva, redundância, fontes de energia de <i>backup</i> e comunicações.	As usinas trabalham com certo grau de ociosidade que pode ser aproveitada em momentos de necessidade.
Eficiência	Capacidade de produzir resultados com requisitos mínimos de recursos.	Eliminação de resíduos, produtividade do trabalho, utilização de ativos, redução da variabilidade do produto, prevenção de falhas.	Aumento de escala, uso de equipamentos mais eficientes, reciclagem de resíduos.
Visibilidade	Conhecimento do estado dos ativos operacionais e do meio ambiente institucional	Recolhimento de <i>Business Intelligence</i> , tecnologia da informação, produtos, visibilidade de ativos e pessoas, intercâmbio de informações	Uso de ERPs, capacidade de produzir etanol de segunda geração, capacidade de produzir açúcar orgânico
Adaptabilidade	Capacidade de modificar operações em resposta a desafios ou oportunidades	Rápido reencaminhamento de requisitos, redução de <i>lead time</i> , jogos estratégicos e simulação, aproveitando as vantagens de disrupções, desenvolvimento de tecnologias alternativas.	Algumas usinas são capazes de suspender completamente sua operação em Períodos desfavoráveis. Maior flexibilidade na produção através de usinas mistas com a decisão de produzir açúcar ou etanol
			Foi observado o desenvolvimento de várias tecnologias diferentes: novas variedades de cana-de-açúcar, mecanização do campo, aumento de pressão das caldeiras, desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, entre outros.
Antecipação	Capacidade de discernir eventos futuros ou situações em potencial	Monitoramento de sinais de alerta precoce, modelos de previsão, <i>near-miss</i> ²⁷ , planejamento de contingência, preparação, gerenciamento de riscos, planejamento de continuidade de negócios, reconhecimento de oportunidades.	Brigada de emergência, administrar para minimizar eventos adversos como risco de liquidez, operacional, etc.

²⁷ *Near-miss* – quase-acidentes: são entendidos como sinais iminentes de um acidente.

Fator de Capacidade	Definição	Subfatores	Fatores de Capacidade identificados na cadeia de cana-de-açúcar
Recuperação	Capacidade de retornar ao estado operacional normal rapidamente	Gerenciamento de crise, mobilização de recursos, estratégia de comunicação, mitigação de consequências de desastres.	Possuir fornecedores reservas para eventualidades, capacidade de negociação de fornecedores e clientes, acesso a recursos financeiros privilegiados.
Dispersão	Distribuição ampla ou descentralização de ativos	Tomada de decisão distribuída, capacidade e ativos distribuídos, descentralização de recursos-chave, empoderamento específico de localização, dispersão de mercados.	É percebido um aumento de implantação de usinas em áreas chamadas de expansão, também é identificado que os grupos empresariais têm usinas em diferentes localidades.
Colaboração	Capacidade de trabalhar eficazmente com outras entidades para benefício mútuo	Previsão colaborativa, gestão de clientes, comunicações, adiamento das ordens, gerenciamento do ciclo de vida do produto, compartilhamento de riscos com parceiros.	Foi observado uma política de colaboração dentro das cooperativas. Políticas públicas como o aumento da proporção do etanol na gasolina.
Organização	Estruturas de recursos humanos, competências e cultura	Incentivo a qualificação dos funcionários, responsabilização e empoderamento, trabalho em equipe, resolução criativa de problemas, treinamento cruzado, substituição da liderança, cultura de cuidar.	É percebido uma preocupação com a mão de obra do setor, e uma melhora gradual na qualidade do trabalho. Aumento de tecnologia e qualificação do funcionário para seu uso.
Posição de Mercado	Status de uma empresa ou seus produtos em mercados específicos	Diferenciação do produto, fidelização / menção do cliente, parcela de mercado, patrimônio da marca, relacionamento com clientes, comunicações com clientes.	Ao final da cadeia foi observado uma preocupação em diferenciar tipos de açúcares, etanóis especiais, alguma fidelização a bandeira de postos de combustíveis. Algumas empresas possuem alta concentração de mercados regionais.
Segurança	Defesa contra intrusão ou ataque deliberado	Proteções em camadas, restrições de acesso, colaboração de troca de informação com governos, segurança cibernética, segurança da informação.	Dentro dos padrões de mercado.
Força Financeira	Capacidade para absorver flutuações no fluxo de caixa	Seguros, diversificação de carteiras, riscos financeiros e liquidez, margem de preço, rentabilidade.	É a principal capacidade identificada na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. A habilidade de produzir a custos baixos, obter preços elevados para o açúcar, etanol e energia elétrica, obtendo as margens mais altas possíveis, praticamente determinam a resiliência do setor. Grupos com poder de realizar fusões e aquisições.

Fonte: o autor ampliado de Pettit; Fiksel; Croxton (2010)

4.3.2 *Resiliência e Aprendizagem: fatores identificados*

A resiliência de uma cadeia de suprimentos depende, em parte, da sua capacidade de lidar com mudanças através da aprendizagem, mas também, de sua adaptabilidade, reação, coevolução, auto-organização e emergência. Estas características conceituais se refletem em questões reais ou comportamentos atribuídos a estruturas organizacionais, modelos de negócios, e também elementos físicos, como os atributos próprios da cana-de-açúcar ou a capacidade de moagem de uma planta industrial. Conceitualmente e empiricamente estas características devem estar alinhadas às propriedades atribuídas a resiliência para se obtê-la.

Os mecanismos por trás das reduções de custos e aumento de margens foram identificados, sendo feitas tentativas para explicá-los de uma perspectiva ampla e abrangente. Foi importante, dentro desta análise, a identificação dos responsáveis pelos mecanismos e das forças impulsionadoras que suportam a resiliência. Portanto, este estudo buscou uma visão da integralidade dos fatores de influência na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e seu desenvolvimento levou em consideração a metodologia apontada por Eisenhardt (1989).

Nesta fase do trabalho, procurou-se focar não somente em um aprofundamento das características da resiliência, mas também, nos pontos de sinergia da resiliência com a curva de experiência. Estas inter-relações permitiram a construção de um panorama onde se rastreia, na integralidade, os fatores de influência, em uma tentativa de elucidar dois tipos de efeitos: a observação de efeitos discretos ou contínuos menos evidentes e indicadores injuntivos²⁸ que incitam a realização de um planejamento e controle estratégico.

Os eventos e efeitos marcantes e os menos evidentes se expressam, normalmente, com características próprias:

- Os marcantes e pontuais são os mais explícitos na literatura e a cronologia que captura esta influência os tornam evidentes. As cadeias de suprimentos podem ser projetadas, construídas e estruturadas para responder a eventos de alto perfil (extremos), por um período de tempo discreto.

²⁸ Injuntivo neste texto, indica o procedimento para realizar, executar, ou não, determinada ação.

- Os contínuos, normalmente, não são tão nítidos na literatura, mas têm igual importância. Existem ameaças contínuas, com muitos efeitos de longo prazo, os quais as cadeias de suprimentos precisam ser resilientes e que recursos como a adaptação e a coevolução podem ser ainda mais relevantes. Assim como capacidades advindas, entre outros, de inovações incrementais.

Cronologia, Eventos Deflagradores, Estratégias e seus Resultados - A maior parte da cronologia mostra eventos e efeitos deflagradores, normalmente as de efeitos mais marcantes. As identificações destas ocorrências deflagradoras, muitas vezes, se confundem com estratégias adotadas, provocando novos eventos ou efeitos deflagradores nos períodos seguintes. Veja como exemplo a estratégia adotada para o evento deflagrador: “primeira crise do petróleo”. A estratégia adotada: “PROÁLCOOL”, reflete um conjunto de medidas tomadas, que se repercutem, por exemplo, no desenvolvimento dos veículos a álcool e depois aos veículos FFV, que podem ser considerados novos eventos deflagradores, com novos efeitos.

Suas reações, como aumento ou diminuição de volume de produção, são observações dos resultados frente às estratégias, e causam alterações ao mercado. Em algumas ocasiões, também se confunde com eventos deflagradores. Por exemplo, “primeira crise do petróleo, foi um evento externo deflagrador, mas, não pode ser considerado uma estratégia. No entanto, a extinção do IAA é tanto uma estratégia adotada, como um resultado de outras estratégias que trouxeram alterações no mercado.

Tecnologias, Reações de mercado e Políticas - As tecnologias, as reações de mercado e os instrumentos políticos e opinião pública devem ajudar a compreender as tendências dos custos e margens na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Isso requereu um conhecimento geral sobre tecnologias empregadas, políticas desenvolvidas, atividades organizacionais e forças de mercado durante o tempo pesquisado, acrescentando e complementando ao estudo da resiliência.

Vulnerabilidade e Capacidade - Os constructos de capacidade e vulnerabilidade, também, estão relacionados e são detalhados aqui. Por exemplo, aquisições e fusões de empresas podem ser tanto classificadas como um fator de capacidade chamado “Posição de Mercado” como enquadrado em “Reações de Mercado”.

Para o cumprimento do papel de trazer estes mecanismos à tona, percebeu-se que a divisão por tecnologia, mercado, política, bem como as capacidades e vulnerabilidades, tinham correspondência na competitividade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Por isso, foi criada uma série de três quadros, onde se analisam grupos de influência sobre custos ou margens, destacando os três diferentes tipos reunidos.

Os fatores identificados foram agrupados nos seguintes conjuntos: Tecnologia, Instrumentos Políticos e Opinião Pública, e Reações de Mercado. Esta construção, também, foi útil para reforçar a relação de causa e efeito entre as análises qualitativa e quantitativa mais a frente, quando se aborda a medição da resiliência. Os oito componentes apresentados nesta tese: capacidade, vulnerabilidade, reações de mercado, tecnologias, instrumentos políticos, cronologia, estratégias adotadas, resultados das estratégias, que se relacionam e interagem criando sinergia dentro desta análise.

Assim como Cumming *et al.* (2005) apontam uma questão a considerar é se impressões teóricas e empíricas levantadas descobriram toda a gama de fatores que levam à resiliência e que se as impressões existentes, podem ser diretamente aplicáveis ou transferíveis para diferentes contextos no futuro. Nesse sentido, em alguns fatores, o modelo dá respostas prescritivas a comportamentos esperados e tomadas de decisão possíveis a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar, como a mecanização, e a produtividade.

4.3.2.1 Tecnologias do Elo Agrícola e Industrial

O elo agrícola da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar tem se esforçado em trazer melhor eficiência e tecnologia superior para os diversos processos agrícolas, onde se observou que tem ocorrido melhorias em máquinas, implementos e equipamentos que favorecem maior lucratividade para o setor. Os tópicos, a seguir, tratam das tecnologias agrícolas identificadas neste estudo.

O desenvolvimento tecnológico e sua transferência para as usinas de etanol e açúcar foram, inicialmente, dificultados pelo nível técnico baixo que prevaleceu durante meados dos anos 1970, entre as usinas. A escala de produção aumentou e se tratando de eficiências industriais, também houve aprimoramentos, inovações tanto incrementais quanto

radicais, onde a técnica acompanhou o mercado criando diferenciais competitivos, onde buscaram-se satisfazer as demandas do mercado ao oferecer soluções para as dificuldades que afetam ao setor.

No Quadro 16, abaixo, lista-se uma série de tecnologias, de acordo com seus tipos, que contribuíram para esta redução de custos ou aumento de margens que permite um maior entendimento do papel da tecnologia na competitividade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, cada um destes fatores tecnológicos identificados é descrito a seguir.

Quadro 16 – Evolução das Tecnologias Agrícolas e Industriais Identificadas

TECNOLOGIAS DO ELO AGRÍCOLA	
Cana-de-açúcar	<ul style="list-style-type: none"> • Evolução do número de cortes: de 3-4 a 5-7 • Contínuo desenvolvimento de novas variedades • Controles biológicos na produção da cana • Custo – diminuição de R\$/tc 134 a R\$/tc 77
Máquinas Agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do consumo de combustível • Agricultura de precisão – via satélite • Otimizações do corte, colheita e carregamento, além de maior integração • Índice de mecanização na colheita: 30-40% década de 90, a 97% em 2015 • Índice de mecanização no plantio: 32,6% em 2009 a 76,7% em 2015
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Maior capacidade por viagem – 20t na década de 1980, 40t na década de 2000, chegando a 60t nos dias atuais. • Implantação da rede de tubulação para transporte, Etanolduto na distribuição (SP, RJ, MG, GO) • Ampliação de infraestrutura logística, integrada a terminais portuários.
Resíduos	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de vinhaça como fertilizante, visando maior produtividade agrícola • Uso da palha e pontas como fertilizante e cogeração • Uso do bagaço como fertilizante, alimentação animal e cogeração
Fatores climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Existem fatores climáticos que podem ser abrandados com tecnologia, com o uso de irrigação, com variedades mais resistentes, dentre outros.
TECNOLOGIAS DO ELO INDUSTRIAL	
Moagem	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da capacidade e eficiência média de moagem, eficiência de 91% em 1970 até 98% atualmente. • Custo de implementação e manutenção pode cair à metade com um conjunto de recepção, transportadores, DVU, moendas de 100” e 90” • Limpeza da cana com sopragem de ar seco ao invés de água
Fermentação	<ul style="list-style-type: none"> • Maior eficiência 83% em 1977 e 92% em 2015 • Diminuição do tempo no processo fermentativo foi identificado
Caldeiras	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de caldeiras de maior pressão e calor, com consequência direta para o balanço energético das Usinas
Destilação	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência e 99,5% em 2015 • Uso de novas técnicas como o peneiramento molecular
Reuso da Água	<ul style="list-style-type: none"> • Maior taxa de reuso da água
Automação	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de ERPs - <i>Enterprise Resource Planning</i>, através de sistemas de supervisão e controle, uso de Controladores Lógicos Programáveis (CLP), fornecendo maior controle e confiabilidade.

Fonte: o autor com base em Bake (2006); Barbosa da Silva (2012); Brunelli (2013); COPERSUCAR (2017); CTC (2009); UNICA (2007); Marques (2009); Novacana (2015); PES (2017); Stesse (2011); Vasconcelos; Barreto; Coêlho (2009)

4.3.2.1.1 Tecnologias do Elo Agrícola

Cana-de-Açúcar - As pesquisas do Projeto Genoma da Cana, o qual reuniu vinte e duas instituições para estudo do mapeamento de genes funcionais, relacionadas a cana-de-açúcar para geração de plantas mais eficientes, foram um projeto pioneiro, de grande repercussão e seus resultados tornaram-se referência para mundo neste campo (MARQUES, 2012). Esta, no entanto, não foi a primeira iniciativa de melhoramento de variedades de cana. Houve programas, desde do final dos anos 1980, com parcerias do CTC, Copersucar e do PLANALSUCAR, onde variedades foram otimizadas para aumentar a quantidade de ATR e diminuir os custos.

Visando a preservação ambiental e do negócio, a cadeia apresenta programas de controle biológico de pragas, diminuindo o uso de defensivos agrícolas, e até mesmo dispondo de laboratórios próprios. Nestes casos, a estrutura de custos pode ser alterada e gerar inclusive economia.

Máquinas Agrícolas - O melhoramento das máquinas agrícolas ocorreu, principalmente, junto com a evolução do processo da colheita mecanizada, com redução no consumo de combustível, utilização da agricultura de precisão - via satélite, e maior integração e otimização do corte, colheita e carregamento. Avanços têm sido vistos nas máquinas agrícolas com relação ao uso de veículos autônomos e no processo de plantio.

Pelos resultados do modelo de simulação desenvolvido pode-se afirmar que o processo de mecanização é altamente ligado ao custo de se obtê-lo, pois cada 1% a mais de mecanização no elo agrícola, em média:

- se diminuiu em 0,30% em seu custo produtivo, sem o custo de investimento;
- se aumentou em 0,21% em seu custo produtivo, com os custos de investimentos médios.

Evolução do Transporte - Foi observado uma maior capacidade de carga por viagem e ampliação da infraestrutura logística. O transporte de açúcar na cadeia brasileira é feito, essencialmente, pelo modal rodoviário. A implantação de rede de Etanolduto, o primeiro duto do mundo, exclusivamente, para escoamento de etanol, iniciou a sua obra em 2010 e em 2013 entrou em pré-operação, movimentando um volume gradativamente maior. Sua operação, com capacidade ociosa, mostra que tem potencial de crescimento no

volume transportado, com redução de custos logísticos em todo o processo e contribuindo, também, para mitigação do impacto rodoviário e ambiental.

Resíduos - A melhoria, através do desenvolvimento e uso integral da vinhaça, palha, pontas e bagaço como fertilizante, além da palha e bagaço na cogeração. Estes aproveitamentos têm impactos tanto ambientais como nos custos e margens, como já descrito anteriormente no modelo de simulação.

Fatores Climáticos - Os fatores climáticos foram, particularmente, uma questão difícil de serem classificados neste contexto, e talvez, merecesse sua própria classificação, isto porque, a tecnologia não abranda todas as intempéries, podendo estes fatores ser pensados como uma questão externa. Porém, existem várias adversidades que podem ser abrandadas com tecnologia, como por exemplo, o uso de irrigação, de variedades de cana-de-açúcar mais resistentes, dentre outros.

As adversidades climáticas interferem nos crescimentos dos canaviais promovendo, quando inadequados, quebras das safras, afetando o ATR médio e a produtividade e consequentemente os gastos agrícolas, principalmente.

4.3.2.1.2 Tecnologias do Elo Industrial

Moagem - Desenvolvimento de sistemas de moagem com maiores capacidades e eficiências, uso de outros equipamentos como o DVU²⁹, com menor custo de investimento inicial, e manutenção. Desenvolvimento de limpeza da cana com sopragem de ar seco ao invés de água melhorando o processo fermentativo e consequentemente a melhoria na qualidade do açúcar.

Fermentação - Melhoria das eficiências e diminuição do tempo do processo de fermentação, através da implementação de novas tecnologias.

Caldeiras e cogeração- Constata-se o uso mais intenso de caldeiras de maior pressão e calor, com consequência direta para a melhoria da eficiência e o balanço energético das usinas.

²⁹ DVU: Desfibrador Vertical Único

Destilação - A destilação, por estar em um nível alto de eficiência, tem apresentado pouca evolução no decorrer dos últimos anos, as novidades aparecem no uso de novas técnicas como o peneiramento molecular, utilizando minerais zeólitos.

Reuso da Água - O reuso da água pode prover economia em situações de escassez ou estresse hídrico, sendo mitigado o desperdício deste recurso natural, com melhor preservação dos níveis dos aquíferos.

Automação - Usinas com centros de operações comandando toda a planta industrial, através de uso de ERPs – *Enterprise Resource Planning*, de sistemas de supervisão e controle, de CLPs – Controladores Lógicos Programáveis, conectados em redes de informação, já é uma realidade. Pode ser entendido como como uma ferramenta auxiliar eficaz, sendo uma forma de lidar com os processos de maneira rastreada e interconectada, controlando-se melhor os equipamentos com ações antecipadas e menos reativas.

4.3.2.2 Instrumentos Políticos e Opinião Pública

No Quadro 17, abaixo, mostra como os instrumentos políticos e fatores externos influenciam na cadeia de produção agrícola e industrial, através de incentivos governamentais e mecanismos regulatórios fornecidos pelos governos. Pesquisas anteriores já apontaram o papel dos governos para assegurar a produção contínua e o reabastecimento de estoques críticos (TANG, 2006b). Além disso, este trabalho sugere que uma colaboração mais estreita com os governos pode melhorar as oportunidades para as empresas em termos regulatórios, além da harmonização de padrões de qualidade e programas ambientais:

Quadro 17 – Instrumentos Políticos e Opinião Pública

INSTRUMENTOS POLÍTICOS E OPINIÃO PÚBLICA	
Instituições e Programas criados pelo governo para formular políticas e fixar diretrizes	<ul style="list-style-type: none"> • PROÁLCOOL, PLANALSUCAR, IAA, CINAL, CIMA, CNAL, CENAL, Programa de Racionalização da Agroindústria Açucareira, entre outros.
Mecanismos de intervenção política	<p>Algumas das políticas adotadas ao longo do tempo foram:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Política de subsídio, com bonificação ao produtor de cana-de-açúcar em áreas menos produtivas; • Compra garantida de etanol através da Petrobras; • Preços e produção fixados pelo governo; • Cotas de exportação e produção de açúcar; • Desonerações fiscais; • Aumento das proporções de etanol anidro à gasolina; • Regulamentação da compra pelo ATR; • Baixas taxas para linhas de financiamento do Banco do Brasil e BNDES; • Contenção do preço da gasolina através da Petrobras; • Obrigação de estoque regulador de armazenamento de etanol.
Pesquisa científica, tecnológica e desenvolvimento	<ul style="list-style-type: none"> • Houve contribuição significativa do conhecimento científico à cadeia, o qual remete a um importante papel desempenhado por diversas instituições como: universidades públicas, iniciativa privada através de grandes grupos, institutos e centros de pesquisas, na medida em que estas são as principais fontes de geração de conhecimento.
Opinião Pública	<ul style="list-style-type: none"> • A opinião pública preza por políticas ambientais, de proteção aos ecossistemas e da mitigação de emissões dos gases do efeito estufa – GEE.

Fonte: o autor

Mecanismos de Intervenção Política - Dentro dos mecanismos de intervenção política, estão as Instituições e Programas criados pelo governo para formular políticas e fixar diretrizes. No início do PROÁLCOOL, existiam elevados subsídios que foram gradativamente retirados, e hoje como resultado, já se *supera em bilhões, em tributos, todos os aportes já concedidos* destes benefícios.

Quanto ao custo de armazenamento de álcool por 6 meses representou um encargo financeiro sério, particularmente, após o fim da inflação em 1994. Inicialmente, a Petrobras cobria esses custos, mas gradualmente foram transferidos em parte para os produtores. Este movimento tem sido percebido em outras políticas governamentais, onde tem se transferido a responsabilidade de atividades ao setor privado.

As políticas adotadas, ao longo do tempo, assim como as instituições e programas mais importantes criados pelo governo para formular políticas e fixar diretrizes, exemplificadas no quadro, na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, foram exploradas na cronologia, portanto, é inoportuno estender-se no conteúdo deste tópico.

Pesquisa Científica, Tecnológica e Desenvolvimento - Estimular o mercado para uso de tecnologias mais modernas, dentro da cadeia, por intermédio de incentivos, de investimentos públicos e de P&D é um dos meios mais eficazes para proporcionar oportunidades de aprendizado e melhorias de margens. Conforme se desenvolvem, sendo implementados no mercado, estes investimentos paulatinamente são recuperados. Para isso, se carece de políticas estáveis de longo prazo. O não fomento inviabiliza o sucesso no futuro, não permitindo que tenham possibilidade de se tornar viáveis comercialmente, em um momento onde a competição com outras tecnologias, ainda era exequível.

A partir de certo ponto de desenvolvimento, as empresas passam a se interessar comercialmente, onde o próprio setor privado efetua investimentos e os incentivos do governo frequentemente são suprimidos. Os programas P&D não podem ser independentes do mercado. Essas medidas de impulso tecnológico precisam ser combinadas com medidas que impulsionem o mercado, ou mesmo, de outras estratégias para fomentar a comercialização da tecnologia e permitir que a cadeia de suprimentos obtenha experiência, isto é, aumento da produção e uso do produto.

Opinião Pública - A preocupação com a sustentabilidade é uma realidade. Ao se comparar aos derivados de petróleo, o etanol tem a vantagem de ser menos poluente. O setor tem avançado na área, a cana-de-açúcar, por exemplo, garante uma produção mais eficiente em termos energéticos e com uma menor emissão de gases do efeito estufa - GEE com relação a outras culturas, além de tratar cada vez melhor seus resíduos. Além disto, é um produto genuinamente brasileiro, com produção nacional que gera a criação de renda, de empregos e de tributos.

4.3.2.3 Reações do Mercado

No Quadro 18, lista-se o terceiro tipo identificado, as reações do mercado, que contribuíram para reduções de custos ou alterações nas margens na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Quadro 18 – Reações do Mercado

REAÇÕES DO MERCADO	
Motores automotivos e o mercado de automóveis	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento do motor à álcool • Desenvolvimento do motor bicomcombustível, <i>flex-fuel</i> (FFV)
Fusões e aquisições	<ul style="list-style-type: none"> • As fusões e aquisições de empresas agroindustriais impulsionaram as concentrações de ativos com consequente aumento de poder de mercado
Novos investidores e parcerias empresariais	<ul style="list-style-type: none"> • Dizem respeito a novos investidores na bolsa de valores, fundos de investimentos, Sociedade de Propósito Específico - SPEs, que podem ajudar financeiramente às empresas
Venda e preço de bioenergia elétrica à rede	<ul style="list-style-type: none"> • Em um primeiro momento, houve a autossuficiência na produção de energia própria, e posteriormente a venda para transmissão e distribuição, aumentando faturamento através de receita de longo prazo
Aumento do mercado de etanol e açúcar	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento anual do açúcar 2% ao ano • Crescimento do etanol é dependente do seu preço em relação à gasolina
Produtividade agrícola e industrial	<ul style="list-style-type: none"> • O aumento da produtividade agrícola e industrial interferem diretamente na estrutura de custos
Diversificação de produtos e marcas	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do portfólio de produtos oferecidos ao mercado
Preços da cana-de-açúcar, etanol, açúcar e gasolina	<ul style="list-style-type: none"> • Os aumentos de preços aumentam margens com possíveis reflexos na melhoria dos processos produtivos
Ociosidade ou Capacidade Ociosa	<ul style="list-style-type: none"> • A capacidade ociosa da produção no setor de cana-de-açúcar pode ser entendida como o potencial produtivo não utilizado, o qual, os custos continuam a ser incorridos mesmo com uma diminuição da produção
Preço da terra	<ul style="list-style-type: none"> • O preço da terra impacta a viabilidade econômica em novos projetos e também o valor dos arrendamentos realizados
Custo de mão de obra	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: manual ou mecanizado
Localização	<ul style="list-style-type: none"> • Exerce influência em outros fatores
Economias de Escala	<ul style="list-style-type: none"> • Diluem os custos fixos promovendo uma economia em maiores volumes produzidos

Fonte: o autor

Motores Automotivos e Mercado de Automóveis – A introdução do veículo à álcool teve um resultado notável. A evolução das vendas no Brasil, decorrido entre 1979 e 1988, contribuiu de modo predominante para a comercialização dos totais de automóveis no país e aumentou a demanda por etanol. O uso do etanol combustível tem como legado o programa governamental do PROÁLCOOL. Sua tradição e cultura de uso facilitou a recepção da tecnologia *flex-fuel* (FFV) que atingiu êxito na comercialização de automóveis no Brasil, a partir de 2003. A sua difusão simbolizou uma nova etapa de expansão do etanol, sendo um componente central da crescente demanda por esse combustível.

Fusões e Aquisições - A cadeia de cana-de-açúcar foi palco de grande número de fusões e aquisições, o fundamental impulsionador foi o acréscimo de margens e lucros que estas concentrações de ativos foram capazes de oferecer, pela expansão do Poder de Mercado, Economia Tecnológica e Economias Pecuniárias (BORGES; COSTA, 2009; SAMUELS; WILKES; BRAYSHAW, 1998; SHEPHERD; SHEPHERD, 2003). Nas Fusões e Aquisições - F&A's, se absorvem concorrentes, tendo seu efeito dependente do *market share* dentre as empresas envolvidas, assim podemos destacar alguns dos possíveis efeitos: economias de escala de produção; concentração do poder de mercado; diversificação de risco; diminuição dos custos de transação, aumento de poder de barganha da própria empresa, frente a fornecedores e clientes, com todos estes efeitos influenciando os custos e margens da cadeia.

Notou-se, também, a uma concentração de capital e de mercado, tendo por consequência uma integração maior da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, o que indiretamente resulta na otimização e redução de custos.

Novos Investidores e Parcerias Empresariais - Novos investidores na bolsa de valores e fundos de investimento podem fornecer capital para as empresas se reestruturarem. A abertura de capital ou a associação com fundos de investimentos são capazes de se constituírem como alternativa para captação de recursos financeiros para as empresas da cadeia de cana-de-açúcar, objetivando metas de expansões, ampliações, investimentos e diversificação de modelos de negócios. Como também, reorganizar a gestão de seu passivo como pré-pagamento de dívidas ou substituição de dívidas de menor custo, através de lançamento de ações, incremento de capital próprio, ingresso de novos sócios

ou não, que deve ser otimizada para assegurar uma estrutura de capital adequada a gestão da empresa. Destacam-se ainda, outras formas de sociedades e parcerias como a criação de Sociedade de Propósito Específico - SPE ou alianças empresariais como o *joint venture*.

Venda e Preço de Bioenergia Elétrica à Rede - A maior inserção da bioeletricidade trouxe benefícios claros à disponibilidade de energia elétrica, mas, também, segundo Claudino e Reis (2015), vê que a maior inserção da bioeletricidade aumentou a resiliência do setor sucroenergético, em razão da alta volatilidade dos preços do etanol e açúcar. No mercado energético, pode existir contratos que proporcionam uma receita estável e de longo prazo, o qual pode durar 25 anos ou mais, melhorando assim o perfil econômico dos que realizam esta operação.

Ainda, existe a receita de curto prazo, no mercado *spot*, mas este tipo de leilão esbarra com outras formas de geração, que tem estruturas de custos não comparáveis e às vezes mais baixas, como as eólicas, o que torna a bioeletricidade uma geração, em alguns leilões, menos competitiva. Portanto, a criação da alternativa da construção de cogeração em usinas de altíssimas eficiências para venda de energia à rede, pode ter seu futuro comprometido, caso não haja uma baixa nos reservatórios das hidrelétricas, ou, caso não seja estimulado um tipo de leilão específico para esta modalidade.

Além disto, foi observado que a obrigação da ligação à rede, é da usina, sendo este um obstáculo a mais a viabilidade econômica positiva do elo industrial. Nestes casos são importantes as análises dos pontos de equilíbrio – PER. O investimento maior para a venda de energia à rede, faz com que seu Valor Presente Líquido - VPL seja menos atrativo (SENNÁ, 2011). Este problema pode ser minimizado com uma maior oferta de linhas de financiamento vantajosas, por meio do BNDES.

Aumento do Mercado de Etanol e Açúcar - Ao explorar o aumento da comercialização de etanol e açúcar devemos observar tanto o mercado brasileiro quanto o externo. O açúcar é um produto de demanda inelástica que possui crescimento vegetativo próximo de 2% ao ano (SILVEIRA, 2004). O aumento do consumo está relacionado ao aumento da população e da evolução do Produto Interno Bruto (PIB). Através do crescimento econômico se aumentam os gastos com a alimentação de uma parcela da população e ocorre a expansão do mercado. Quanto ao mercado externo de açúcar as previsões são

menos claras, pois estão sujeitas às decisões políticas da Organização Mundial do Comércio (OMC), de acordos bilaterais e a variação de consumo de cada país.

O mercado atual para o etanol hidratado carburante cresceu, principalmente, em consequência da comercialização dos veículos *flex-fuel* (FFV). O advento desta tecnologia trouxe ao consumidor a opção de escolha do combustível no momento do abastecimento, tendo em vista à disponibilidade, o desempenho do veículo e principalmente, ao preço do combustível, que deve ficar abaixo de 70% do preço da gasolina.

Embora haja uma procura mundial crescente, não existe um mercado internacional estabelecido para o etanol carburante. Isso se deve, em função dos subsídios e as barreiras comerciais que desequilibram o comércio internacional, dificultando o fluxo comercial à transações eventuais, essencialmente quando ocorrem escassez de suprimentos (PIACENTE, 2006).

Produtividade Agrícola e Industrial - Para considerar melhorias nos índices de produtividade são necessários que seja feito investimentos adicionais aos rotineiros. Fatores como o preço e ATR são de relevância e devem ser objeto de atenção, assim linhas de financiamento diferenciadas para a ampliação, renovação e uma manutenção adequada dos canaviais são imprescindíveis.

O aumento da produtividade é uma medida importante para a redução de custos, pois mostra os resultados da melhoria do gerenciamento como, por exemplo, um controle de pragas adequado, a aplicação de fertilizantes de maneira otimizada, entre outros.

Pelos resultados do modelo de simulação desenvolvido, *a cada tonelada a mais por hectare de produtividade, se diminuiu, em média, R\$ 0,80 Tc de seu custo produtivo*, com os mesmos parâmetros, isto é, sem variar as quantidades e custos de insumos empregados.

Diversificação de Produtos e Marcas - Algumas empresas optaram por estratégias de diferenciação e segmentação de mercados. Procuraram variar sua gama de produtos, com especificações diferentes para qualidade e preço, seguindo exigências de pureza, cor e granulação para consumidores pulverizados de acordo com suas necessidades. Foram identificados que alguns grupos passaram a administrar a distribuição de seus produtos e marcas no varejo (WAACK; NEVES; MORAES, 1998).

Dentro da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, alguns grupos optaram por ofertar produtos das áreas químicas em geral, farmacêuticas, cosméticas, alimentícias e bebidas. Dentre elas, encontraram obstáculos à aquisição de tecnologias protegidas por patentes, porém, alianças estratégicas têm se efetivado, inclusive com parcerias internacionais para minimizar o problema.

Depois da desregulamentação do mercado a visão de *marketing* passou a ser importante, a gestão do mercado consumidor passou a agregar um valor importante ao produto. A partir daí um planejamento e estratégia próprios para este nicho se tornaram importantes.

Preços da Cana-de-Açúcar, Etanol, Açúcar e Gasolina - Preços elevados de cana-de-açúcar permitem rentabilizar melhor os produtores agrícolas, assim como, também, preços elevados permitem as usinas atingirem ganhos mais elevados, os quais possibilitam a aplicação de práticas e condutas mais pertinentes, com utilização de maior quantidade e qualidade de insumos, melhor gerenciamento e tecnologia. Dando continuidade, é possível argumentar que preços superiores auxiliam a capacidade financeira da cadeia de suprimentos, como também, favorecem uma maior inclinação de investir em novos projetos (MILANEZ *et al.*, 2012).

Em situações de vulnerabilidade podem-se observar uma diminuição dos investimentos, que causam impactos negativos sobre diferentes processos. O preço é definido não somente, no tocante ao somatório de custos que se incorporam nas fazendas e usinas, mas, dentro de uma conjectura atrelada a oferta e demanda do mercado. Ainda assim, os preços podem ser caracterizados por sua natureza cíclica, sofrendo influências de vários aspectos de mercado e se mostrando com elevada volatilidade, o que pode se constituir em uma barreira maior, especialmente quando o produto é classificado como uma *commodity* (MARTINS e MARTINELLI, 2010).

O etanol tem seu potencial competitivo interligado à gasolina. Para ser viável, depende de uma diferença, onde é necessário que valha 70% ou menos que a gasolina. Esta relação é pressionada pelo mercado ou por políticas governamentais que intercedem nos valores, nos preços, nos custos, de um ou de outro combustível. Esta situação descaracteriza as expectativas e suposições de comercialização, como estimativas e previsões de margens, de lucros e de investimentos. A associação dos mercados de etanol e açúcar, no contexto brasileiro, é intenso, devido principalmente ao compartilhamento da matéria-prima e da

capacidade industrial de produção. Os preços do açúcar seguem políticas de mercado, seja internamente ou para a exportação, também estão sujeitos às oscilações de preços e demanda.

Ociosidade ou Capacidade Ociosa - A capacidade ociosa da produção no setor de cana-de-açúcar pode ser vista como o potencial produtivo não utilizado: usina sem uso ou apenas parcialmente em uso; que não inclua as oscilações decorrentes de razões sazonais (THOMSON, 2007). Um fator que aumenta a ociosidade das unidades é a falta de investimentos agrícolas, os quais afetam a produção final de cana-de-açúcar. A natureza dos custos de ociosidade é normalmente fixa, que continuam sendo incorridos mesmo em redução do nível de produção ou parada total da usina. No instante da implementação já se determina uma capacidade ociosa padrão que é usada rotineiramente, dando flexibilidade para o maior proveito das oscilações de preços dos produtos.

Preço da Terra - Nas avaliações técnico-econômicas de novos projetos de usinas de açúcar e etanol, um item teve grande importância: o preço das terras de plantio. Seu alto valor, pressionou negativamente sua viabilidade econômica em novos projetos, principalmente. Por este motivo, passou-se a considerar opções fora do eixo da plantação tradicional da cana-de-açúcar, que se concentrava em São Paulo. Neste cenário a região centro-oeste, Paraná, e Minas Gerais se destacavam por valores mais baixos de terras. São Paulo apresentava um preço em 2003, o qual os outros estados só atingiram em 2008. Entre 2004 e 2007, quando alguns novos projetos estavam sendo elaborados, os preços por hectare custavam em torno dos 10 mil reais, com pouquíssimas exceções, o valor do hectare na região de Ribeirão Preto, em 2003, já se encontrava em R\$ 15.518,00 (POSTAL, 2014). Em Goiás, por exemplo, a expansão começou a ganhar força a partir de 2004, quando a soja apresentava preços baixos no mercado internacional. Este foi o estímulo inicial para empresas se instalarem nestas novas áreas, associado as grandes extensões de terras adequadas ao cultivo de cana, condições climáticas favoráveis e apoio do governo estadual (OLIVEIRA, 2009).

Custo de Mão de Obra - Quanto à mão de obra, decisões importantes se apresentam tais como: o método a ser empregado, se de modo manual ou mecanizado ou misto, pois ao se fazer esses trabalhos, além da necessidade de observar questões de ordem legal, torna-se necessário avaliar quais os reflexos nos custos da opção de se adotar as operações mecanizadas, de um modo parcial ou total.

Localização – A localização exerce um papel importante na estrutura financeira dos elos estudados. Exerce influência em diversos fatores já mencionados. Podemos citar os diferentes preços de terra, que impactam nos preços de arrendamento e nos custos iniciais de investimento; as condições logísticas da área; a distância da usina à rede de transmissão e distribuição, entre outros.

Economia de Escala - As escalas das plantas industriais aumentaram, principalmente, devido às baixas taxas dos financiamentos, promovendo economias de escalas. Além disso, o aumento do escalonamento leva a concentração do capital, que por sua vez, leva à maior integração vertical, o que indiretamente resultou na otimização da cadeia de produção. Nota-se que, para muitos componentes da planta, existem tamanhos ótimos que gradativamente aumentam os custos à medida que se alteram, afastando-se destes tamanhos. Assim, as usinas têm uma escala ideal em que os custos específicos de produção são mínimos, portanto otimizados (NGUYEN; PRINCE, 1996; WIT *et al.*, 2010).

4.3.3 Medição da Resiliência

Na avaliação longitudinal que se teve como proposta, objetivou avaliar quantitativamente a resiliência da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. A definição já conhecida de Tukamuhabwa *et al.*, (2015) delimitou quatro aspectos que são amplamente utilizados para nossos resultados: a capacidade adaptativa de uma cadeia de suprimentos com o intuito de se preparar para um conjunto de eventos disruptivos; responder ao evento; fazer uma recuperação atempada e econômica; e avançar para um estado pós-interrupção das operações com idealmente, em um estado melhorado do que antes da interrupção. A partir daí, passamos a usar nossa própria definição através do E.P.I.L.E. de desempenho e da intervenção.

Resgatou-se aqui os resultados dos sessenta e quatro relatórios obtidos na simulação para elaborar um quadro no qual foi segmentado as usinas padrão desenvolvidas e sua correspondente porcentagem, dentro da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Isto proporcionou uma visão das margens médias ponderadas, por nível tecnológico, em R\$/tc dado um certo ano (veja APÊNDICE VI).

As margens médias ponderadas foram utilizadas como um *proxy* para a resiliência, nesta tese. O Gráfico 03 obtido com estas informações, foi dividido em oito blocos de áreas de análise (observe os algarismos romanos), o qual, novamente, foram subdivididas em vinte e três subáreas para cálculo das respectivas integrais definidas (A1, A2, A3, etc.). O eixo das ordenadas é a margem médias ponderada em R\$/tc e das abscissas é o ano, em um intervalo entre 1998 a 2014.

Ainda é importante a informação de como foi obtido o Po, ou nível de performance normal. Tukamuhabwa *et al.* (2015), definiram como o nível de performance antes da ocorrência de uma disrupção. Este nível, na prática, se mostrou impossível de se obter, pois não possuímos dados anteriores a 1998 que mostrassem este marco de performance inicial. Sua construção foi fixada até certo ponto, de maneira um tanto discricionária. Houve uma preocupação de buscar uma margem média para o setor, porém esta informação se mostrou indisponível na literatura e nas empresas pesquisadas, por serem consideradas confidenciais. A solução foi analisar o intervalo pesquisado e definir o valor de acordo com a saúde das empresas: número de empresas que fecharam, que desativaram, que voltaram a funcionar ou de novas implantações (veja Apêndice V), comparando-os os resultados de margens obtidos no modelo. Assim, o valor obtido foi fixado em 0,10 R\$/tc de margem para que as usinas padrão mantenham suas operações normais em um nível aceitável.

Observe as seguintes considerações para o Gráfico 07:

- Veja a curva de desempenho, na cor preta;
- Po é o nível de performance normal, representada pela linha vermelha;
- Pa é o nível de desempenho mínimo aceitável abaixo do qual as operações de usinas presumidamente encerram as atividades operacionais;
- Observe a divisão de quatro períodos: A, B, C e D. Depois de sofrer com os E.P.I.L.E's de desempenho, podem-se ser observados as formações dos triângulos pela curva de desempenho;

- Formam-se 8 blocos de áreas, com suas respectivas subdivisões (A1, A2, A3, etc.), em cada um destes blocos foi realizado o cálculo da integral para a medição da resiliência;
- O ponto de recuperação (seta verde) é definido como o ponto imediatamente superior após o ponto mais baixo da curva de desempenho, em cada um dos quatro períodos;
- Três conceitos são importantes para esta medição, sendo eles: Resistência, Recuperação e Crescimento;
- Toda a área da curva de desempenho anterior ao ponto de recuperação até o limite do Po é considerada área de resistência ($A_{Resistência}$) ou (RES);
- Outra maneira de visualizar a Resistência (RES) é através de sua formação, o qual é visualizada por toda área da curva de desempenho em decrescimento abaixo de Po, com exceção das áreas em decrescimento que estão após Po, no mesmo período;
- A área de recuperação ($A_{Recuperação}$) ou (REC) é definida como a área após o ponto de recuperação até o limite de Po;
- Todas as áreas acima da Po, formam a área de crescimento ($A_{Crescimento}$) ou (CRES).

Gráfico 07 - Resiliência na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar – Curva de Desempenho
Fonte: o autor

A Resistência, conceitualmente, pode ser explicada como impacto sofrido pela E.P.I.L.E. de desempenho; a Recuperação, a fase de recuperação propriamente dita; e o Crescimento é a área acima da Po, e só acontece quando a pós-intervenção está em estado melhorado.

Uma discussão relevante é a definição matemática da resiliência. Uma resiliência alta é o período onde o seu nível também persiste em alta performance, ou seja, o período onde a curva de performance se manteve mais alto acima de Po, com o mínimo possível de E.P.I.L.E. de desempenho, em dado período de tempo. A fórmula (1) para corresponde a esta realidade é dada por:

$$Resiliência_{(t)} = A_{Crescimento} - (A_{Resistência} + A_{Recuperação}) \quad (1)$$

O cálculo das integrais pode ser visto na Tabela 07, assim como o demonstrativo do cálculo da resiliência para as áreas A₁, A₂, A₃, A₄, A₅, A₆, A₇ e assim por diante.

Estes são os resultados da resiliência para cada período estudado:

- Período A: -0,077;
- Período B: 0,225;
- Período C: -0,163;
- Período D: -0,067.

O resultado observado é que o Período B, de 2003 a 2007, é o período de maior resiliência, seguido pelo Período D, Período A, sendo o Período C de menor resiliência.

Um ponto observado é que um dos aspectos de resiliência o qual Tukamuhabwa *et al.*, (2015) delimitaram, não foi encontrado. Dos aspectos: preparação, resposta a um evento, recuperação atempada e econômica e avançar para um estado pós-interrupção das operações, de preferência, em um estado melhorado do que antes da interrupção, não se verificou empiricamente a primeira fase, isto é, a preparação.

$I = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$ $= 0,058 + 0,121 + 0,090 + 0,039$ $= 0,306$	<u>Período A</u> $A_{Resistência} = A_1 = 0,058$ $A_{Recuperação} = A_2 + A_3 + A_4 = 0,249$ $A_{Crescimento} = A_5 + A_6 + A_7 = 0,230$ $E.P.I.L.E = A_{Resistência} + A_{Recuperação} = 0,307$ $Resiliência = -0,077$
$II = A_5 + A_6 + A_7$ $= 0,002 + 0,138 + 0,091$ $= 0,230$	
$III = A_8 + A_9$ $= 0,014 + 0,021$ $= 0,035$	<u>Período B</u> $A_{Resistência} = A_8 = 0,014$ $A_{Recuperação} = A_9 = 0,021$ $A_{Crescimento} = A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} = 0,260$ $E.P.I.L.E = A_{Resistência} + A_{Recuperação} = 0,035$ $Resiliência = 0,225$
$IV = A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13}$ $= 0,039 + 0,138 + 0,081 + 0,002$ $= 0,260$	
$V = A_{14} + A_{15} + A_{16}$ $= 0,032 + 0,111 + 0,051$ $= 0,194$	<u>Período C</u> $A_{Resistência} = A_{14} + A_{15} = 0,143$ $A_{Recuperação} = A_{16} = 0,051$ $A_{Crescimento} = A_{17} + A_{18} = 0,031$ $E.P.I.L.E = A_{Resistência} + A_{Recuperação} = 0,194$ $Resiliência = -0,163$
$VI = A_{17} + A_{18}$ $= 0,008 + 0,023$ $= 0,031$	
$VII = A_{19} + A_{20} + A_{21} + A_{22}$ $= 0,001 + 0,035 + 0,053 + 0,009$ $= 0,097$	<u>Período D</u> $A_{Resistência} = A_{19} + A_{20} = 0,036$ $A_{Recuperação} = A_{21} + A_{22} = 0,061$ $A_{Crescimento} = A_{23} = 0,030$ $E.P.I.L.E = A_{Resistência} + A_{Recuperação} = 0,097$ $Resiliência = -0,067$
$VIII = A_{23}$ $= 0,030$	

Tabela 07 - Cálculo das Resiliências

Fonte: o autor

Dados os valores e o gráfico podemos visualizar que o Período A teve a maior reação, obtendo também o maior valor em Recuperação e com o segundo maior crescimento.

O Período de maior resiliência foi o B, onde a Resistência e Recuperação foram de menores valores. Uma Resistência e Recuperação com valores baixos, ao contrário dos outros valores, são melhores resultados, pois significa que sofreu menos E.P.I.L.E. de desempenho e recuperou rapidamente, exatamente o que ocorreu neste Período. Uma maior área acima de P_o (Crescimento), também é muito importante para uma boa Resiliência. Este Período foi o de maior Crescimento.

O Período C teve a pior queda da curva de desempenho, o que refletiu no valor de maior Resistência. Além disto, foi o de pior resiliência, com um Crescimento pouco expressivo.

O Período D pode passar a falsa impressão de menor Resistência, pois o valor mínimo para a curva de desempenho foi o maior, porém, a continuidade do mau desempenho fez com que obtivesse área maior abaixo de P_o , em relação ao Período B, de menor Resistência. O crescimento da pós-intervenção veio tardiamente, mostrando assim o efeito do tempo sobre a resiliência. Foi o período de segundo menor E.P.I.L.E. de desempenho. Ressalta-se que para um pleno entendimento deste período, ainda precisamos aguardar um novo ciclo, através de novo E.P.I.L.E e nova Resistência, uma vez que não sabemos o comportamento futuro (em oscilação de alta ou de baixa) da curva de desempenho, o que torna este período, a rigor, inconclusivo no período estudado.

P_a é o nível de desempenho mínimo aceitável abaixo do qual as operações de usinas presumidamente encerram as atividades operacionais; de fato, verificou-se um fechamento acentuado de usinas nos anos de 1999 e 2009, reforçando a fidelidade do modelo de análise com a realidade das épocas.

Uma vez medida a resiliência e levantado os eventos deflagradores, sua cronologia e os eventos identificados, foi possível criar um quadro onde podemos constatar as relações temporais e de causa e efeito. Na Tabela 08, podemos verificar estas relações, onde foram expostos os Fatores de Vulnerabilidade e os Fatores de Capacidade identificados dentro do período estudado.

Principais Fatores de Vulnerabilidade/Capacidade			Principais Fatores de Vulnerabilidade/Capacidade		
Período A					
I ≅98/2001	<ul style="list-style-type: none">Baixo preço do petróleo/gasolinaMudança estrutural/desregulamentaçãoSuperprodução de etanolBaixa eficiências agrícolasInício de fusões e aquisições de empresas agroindustriaisIntensificação da cogeraçãoDesativação e falência de usinas	RES=0,058	II ≅02/2003	<ul style="list-style-type: none">Aumento do preço do petróleo/gasolinaAumento de volume do etanol e açúcarAumento da demanda de etanol pela introdução do automóvel <i>flex-fuel</i> (FFV)Diferenciação de produto	
		REC=0,249			
		CRES=0,230			
		RESI= -0,077			
Período B					
III ≅03/2004	<ul style="list-style-type: none">Diminuição da expansão da oferta de sacaroseExpansão dos canaviaisImplantação de usinas em áreas de expansão	RES=0,014	IV ≅04/2007	<ul style="list-style-type: none">Aumento da demanda de etanol pela expansão do uso veículo <i>flex-fuel</i> (FFV)Preço alto da gasolinaProtocolo de <i>Kyoto</i>Aumento da responsabilidade corporativa	
		REC=0,021			
		CRES=0,260			
		RESI=0,225			
Período C					
V ≅07/2009	<ul style="list-style-type: none">Dificuldade de créditoFalta de capital de giroPreço baixo do etanolIntensificação da cogeraçãoDesativação e falência de usinasFusões e aquisições	RES=0,143	VI ≅09/2010	<ul style="list-style-type: none">Aumento de preço de açúcar e etanolInício do uso de caldeiras de 100 barEfeitos de escala	
		REC=0,051			
		CRES=0,031			
		RESI= -0,163			
Período D					
VII ≅10/2013	<ul style="list-style-type: none">Contenção do preço da gasolinaFatores climáticos desfavoráveisDiminuição da expansão da oferta de sacaroseFalta de cana-de-açúcar	RES=0,036	VIII ≅13/2014	<ul style="list-style-type: none">Contenção do preço da gasolinaFatores climáticos desfavoráveisAumento do uso de bioeletricidade nas usinasPreocupação com as eficiências agrícolas	
		REC=0,061			
		CRES=0,031			
		RESI= -0,067			

Tabela 08 - Exposição dos Principais Fatores de Vulnerabilidade e Fatores de Capacidade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar com a medição da resiliência

Fonte: o autor

A Tabela 08 expõe os fatores de vulnerabilidade e os fatores de capacidade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar para os períodos: A, B, C, D, com seus respectivos blocos (expresso em algarismos romanos) e intervalo de tempo, onde foram identificados os efeitos dos E.P.I.L.E's de desempenho e, complementarmente, expressas suas medições.

Um ponto importante é que pela estrutura proposta de Pettit; Fiksel; Croxton (2010) existe um conjunto de capacidades adequadas para um conjunto específico de vulnerabilidades. Estas características trazem considerações interessantes.

Por exemplo, a introdução e expansão dos veículos flex-fuel (FFV) trouxe mais resiliência à cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar, encaixando tanto nos fatores tecnológicos que promovem a resiliência, quanto uma reação de mercado. O constructo de fatores de capacidade tem um foco interno e parece não ter nenhum fator correspondente para classificá-lo nesta estrutura, já que o desenvolvimento desta tecnologia, foi fruto de uma iniciativa estratégica fora do âmbito das usinas. Para estes casos, denominou-se “sem enquadramento”.

Ainda assim, foi possível extrair correlações entre as estruturas aqui propostas, ao passo que esta etapa, trouxe mais uma amarração, que levou a confirmação de credibilidade do estudo proposto.

Os fatores de vulnerabilidade identificados foram:

Tecnológicas:

- baixas eficiências agrícolas – Turbulência

Instrumentos Políticos e Opinião Pública:

- mudança estrutural, desregulamentação – Pressões externas
- contenção do preço da gasolina – Pressões externas

Reações de Mercado e Econômicas:

- baixo preço do petróleo/gasolina - Pressões externas
- superprodução de etanol – Turbulência
- diminuição da expansão da oferta de sacarose – Pressões externas
- dificuldade de crédito – Pressões externas
- preço baixo do etanol – Pressões externas
- fatores climáticos adversos – Turbulência

Os fatores de capacidades foram:

Tecnológicas:

- aumento da demanda de etanol pela introdução e expansão do veículo *flex-fuel* (FFV) – (sem enquadramento)
- Evolução da eficiência das caldeiras – Adaptabilidade
- Intensificação do uso da cogeração – Adaptabilidade e Eficiência
- aumento de venda de bioeletricidade – Adaptabilidade
- Efeitos de escala – Capacidade

Instrumentos Políticos e Opinião Pública:

- linhas de financiamento do BNDES – Colaboração
- Pesquisa científica e desenvolvimento – Colaboração

Reações de Mercado e Econômicas:

- fusões e aquisições de empresas agroindustriais – Força Financeira
- aumento do preço do petróleo/gasolina (sem enquadramento)
- aumento do preço de açúcar e etanol (sem enquadramento)
- aumento do volume do açúcar e etanol (sem enquadramento)
- Diferenciação de produto – Posição de Mercado

4.3.4 *Discussão de Aspectos do Comportamento da Resiliência*

O estudo da resiliência, levando em consideração os ciclos econômicos, com os mercados em expansão ou contração, levou este trabalho a um olhar aprofundado da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Procurou-se avaliar todo um arcabouço de relações que envolvem e permeiam a cadeia, o que podem auxiliar em planejamentos que sirvam de sobrevivência de longo prazo. Tais análises são passíveis de se gerar consequentes reestruturações para uma gestão de cadeia mais eficaz.

Uma questão levantada na literatura é se a resiliência é uma qualidade prontamente observável, através de pesquisas empíricas ou se a resiliência só se torna visível, ou ativada, em função de um conjunto de circunstâncias, que podem não ser facilmente identificado, apenas numericamente. Acreditamos que esta técnica torna mais fácil a visualização, por meio de valores numéricos.

O resultado numérico para a resiliência pode ser comparado para períodos diferentes, no entanto, deve-se evitá-lo, principalmente, em espaços temporais muito longos. Isto se deve as transformações contínuas que uma cadeia de suprimentos enfrenta em sua evolução. Existem mudanças que ocorrem na estrutura interna das empresas, disposições macroeconômicas compartilhadas, condições sociais e de mercado, bem como, posições concorrenciais que se apresentavam à época, as quais estão sempre se alterando. Isto, significa que, o número é melhor avaliado em contextos análogos, onde a coevolução e a questão concorrencial devem andar juntas, nesta análise.

O resultado corrobora que a relação custo-margem pode ser reconhecida como uma consideração importante dentro da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Aponta-se que para esta cadeia, a maior resiliência não é aquela necessariamente com os custos mais baixos, mas sim, com margens mais altas.

O resultado quantitativo apresentado pareceu apontar, em uma primeira análise, que a cadeia de cana-de-açúcar não está se tornando mais resiliente, uma vez que os valores apresentados não aumentaram linearmente, no decorrer dos quatro períodos observados. A falta de resiliência, também, pode tornar-se visível só depois de ter ultrapassado um certo limiar, próximo de zero, para além do qual a organização passa a ter dificuldades para lidar com a adversidade, até não poder mais, vindo a sucumbir.

Estes valores podem estar escondendo um efeito qualitativo. A cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar pode estar se adaptando aos E.P.I.L.E.'s de desempenho e respondendo somente ao ponto de manter suas margens econômicas consideradas adequadas e não cada vez maiores. Além disto, ao longo do tempo, a cadeia de suprimentos pode estar aprendendo e desenvolvendo capacidades, dando somente respostas compatíveis com suas vulnerabilidades; um efeito o qual o setor busca se tornar resiliente, apenas no limite do necessário. Assim, um período de avaliação da resiliência maior no futuro pode ajudar a esclarecer este ponto.

Quanto à resposta ao objetivo central desta tese: **como evidenciar que uma cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é resiliente às perturbações que a acometem?** A adaptação do arcabouço teórico da resiliência e a construção desta estrutura prática, evidenciados nesta tese, é a resposta necessária para evidenciar se a cadeia de suprimentos é resiliente às perturbações que a acometem.

O estudo da resiliência pode ser parcialmente validado externamente. Isto porque, o modelo respondeu, de maneira geral, de acordo com o observado no delineamento teórico da literatura de resiliência, no entanto, não existe outro trabalho que a trata quantitativamente, na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, no que se tem notícia, para se comparar. Ainda assim, como sugeriram Tukamuhabwa *et al.*, (2015), conseguimos analisar os Períodos dos quatro ‘triângulos’ identificados (A, B, C, D) e compará-los entre si. Neste contexto, feita a validação, especialmente ao se confrontar com o conceito proposto por Bruneau *et al.* (2003) e ampliado por Zobel (2010) e Tukamuhabwa *et al.* (2015).

Este estudo empírico apontou que na prática, não existiu a fase de preparação na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, como definiram Tukamuhabwa *et al.* (2015) e Sheffi; Rice (2005) em seus quatros aspectos principais. No entanto, outros estudos são necessários para confirmar se em outras cadeias de suprimentos ocorre o mesmo.

As curvas de performance, desenvolvidas para resiliência, podem ser objetos de análise para avaliação de estratégias, uma ferramenta importante para vários atores, tendo como exemplo, o analista financeiro, o industrial, os pesquisadores e reguladores. Nesse sentido, pode-se servir de suporte para as áreas privada e pública, a monitorar e desenvolver programas de incentivo e avaliar as estratégias adotadas e executadas. Podem ser uma ferramenta de monitoramento, de análise e de avaliação contínuas, e que se aliado a outros métodos, permitem que o analista possa utilizá-las no auxílio de aumentar seu domínio sobre a temática, através do conhecimento das inter-relações que ocorrem dentro da cadeia de cana-de-açúcar a fim de desenvolver estratégias efetivas.

4.3.5 Eventos Deflagradores, Estratégias e seus Resultados

Se criou uma matriz de amarração onde se dividiu entre os eventos deflagradores, as ocorrências e estratégias notáveis que desencadearam o efetivo resultado. Nelas foram apresentadas as taxas de aprendizagem relacionadas as três tendências observadas e destinadas a quantificar o fenômeno da experiência e da resiliência relacionadas com a alteração de custos e margens. Amarramos em uma tabela sintetizando os principais pontos discutidos, dentre os quais são divididos na PR observada, no intervalo histórico

e além disto, foram identificados os eventos deflagradores, bem como, as estratégias adotadas e seus respectivos resultados.

O propósito foi determinar quais são os eventos deflagradores relevantes para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e quais estratégias estão sendo adotadas para gerenciar estas perturbações, além de avaliar seu efeito sobre a aprendizagem da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. O processo geral para identificar ameaças, estratégias relacionadas e contramedidas é parte importante das atividades de gerenciamento de risco da cadeia. Como consequência, a pesquisa aponta que é necessário escolher e planejar com antecedência estratégias econômicas para lidar com os eventos deflagradores de maneira otimizada. Tais estratégias demonstraram melhorar as capacidades de resiliência das empresas, facilitar respostas rápidas e assim melhorar a vantagem competitiva.

Veja a Tabela 09:

PR		Intervalo	Eventos deflagradores	Estratégias adotadas	Resultados da estratégia
PR = 0,782	PR = 1,009 Agrícola PR = 1,290 Industrial PR = 1,076	1975/1978	<ul style="list-style-type: none"> • Queda dos preços mundiais de açúcar • Primeiro choque do petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Lançamento do PROÁLCOOL • Aumento de proporção da mistura do etanol na gasolina • Cotas para regulação da produção e exportação 	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento do volume de produção do etanol anidro • Crescimento do volume de produção de cana-de-açúcar
		1979/1985	<ul style="list-style-type: none"> • Segundo choque do petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Reforço do PROÁLCOOL • Aumento de proporção da mistura do etanol na gasolina • Introdução de variedades de cana-de-açúcar • Uso de vinhaça na irrigação – fertirrigação • Melhorias no sistema de moagem e fermentação • Adoção de caldeiras de 21 bar • Desenvolvimento do veículo à álcool • Cotas para regulação da produção e exportação 	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento da produção de etanol hidratado e anidro • Melhorias no escoamento da produção • Aumento da produtividade • Aumento no número de usinas
	PR = 0,725 Agrícola PR = 0,595 Industrial PR = 0,754	1986/1996	<ul style="list-style-type: none"> • Preços baixos do petróleo. • Crise nas finanças públicas • Falta de etanol • Verba para P&D diminuída • Interrupção de subsídios • Extinção do IAA 	<ul style="list-style-type: none"> • Investimentos na produção nacional de petróleo • Importação de outros combustíveis • Aumento de proporção da mistura do etanol na gasolina • Adoção de caldeiras de 45 bar e venda de bioenergia 	<ul style="list-style-type: none"> • Quebra da confiança no etanol combustível • Fusões e aquisições • Aumento da verticalização dentro da cadeia • Falências de produtores sem resiliência

PR = 0,782	PR = 0,976	Industrial PR = 0,857	1997/2002	<ul style="list-style-type: none"> • Preços baixos do petróleo • Superprodução de etanol • Desregulamentação da cadeia • Fim de regime de cotas para exportação do açúcar • Liberação dos preços do etanol anidro e hidratado • Reestruturação produtiva • Preocupação com fontes alternativas de energia 	<ul style="list-style-type: none"> • Imobilização de maiores recursos financeiros • Maior autogestão setorial: CONSECANA e grupos de comercialização • Pesquisa do genoma da cana-de-açúcar • Adoção de caldeiras de 65 bar e aumento da venda de bioenergia 	<ul style="list-style-type: none"> • Preços e mercados instáveis. • Redução no uso de mão de obra manual. • Intensificação da mecanização da agricultura. • Fusões e aquisições com entrada de empresas estrangeiras. • Novas estratégias como maior uso de cogeração • Estagnação da produção de etanol • Baixas eficiências agrícolas
			2003/2008	<ul style="list-style-type: none"> • Criação dos automóveis bicompostíveis <i>flex-fuel</i> (FFV) • Reestruturação produtiva • Aumento do preço da gasolina • Preocupação com fontes alternativas de energia • Expectativa de aumento de exportações de etanol 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de estudos setoriais • Expansão para novas áreas de plantio • Avanços em automação e gerenciamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do uso de etanol como combustível doméstico • Aumento na instalação de usinas no país • Aumento no preço do etanol • Aumento do volume do etanol e açúcar
			2008/2009 a 2014	<ul style="list-style-type: none"> • Crise mundial • Crises na produção canavieira • Condições climáticas adversas • Queda das exportações • Dificuldade de financiamento • Queda e contenção do preço da gasolina • Maiores exigências legislativas de armazenagem de produção 	<ul style="list-style-type: none"> • Estímulos a fusão e aquisições entre empresas • Aumento de proporção da mistura do etanol na gasolina • Regulamentação da produção do etanol através da ANP • Busca pela cogeração • Busca por maiores eficiências industriais • Adoção de caldeiras de 100 bar e aumento da venda de bioenergia 	<ul style="list-style-type: none"> • Falência de usinas • Fusões e aquisições • Estagnação do volume de produção do etanol • Enfraquecimento do setor
			2015 em diante	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de preço da gasolina 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de proporção da mistura do etanol na gasolina 	<ul style="list-style-type: none"> • Reativação de usinas pós crise. • Aumento da área de produção da cana-de-açúcar • Aumento da produção de etanol.

Tabela 09 – PR, Intervalo, Eventos Deflagradores, Estratégias e Resultados

Fonte: o autor expandido e adaptado de Campos (2015)

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões do Modelo de Simulação

Foi construído um modelo de simulação da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Para tal, dividiu-se nos elos agrícola e industrial. O modelo é robusto e inovador, que estabeleceu uma relação de variáveis em sua construção, com a utilização de dados empíricos, que nos permitiu resultados confiáveis e com qualidade para a criação da fazenda e usina padrão.

Uma vez compreendido o papel das tecnologias atuais, foi possível criar uma fazenda padrão, passando por suas etapas produtivas, onde se determinou o custo e margem de produção. As usinas padrão foram configuradas em quatro tipos, de acordo com seus padrões tecnológicos, em torno de, 21 bar, 45 bar, 65 bar e 100 bar de pressão, incluindo outros equipamentos importantes do processo produtivo, que definiram as eficiências médias utilizadas no modelo de simulação. Foram calculados os custos de geração da bioeletricidade, assim como a venda do excedente de energia elétrica e os tributos aplicados. Para a tal, foi feito um balanço energético simplificado, assim como o resultado financeiro deste uso. O modelo avaliou um intervalo de 16 anos, 1998 a 2014, onde resultaram em informações de custo de produção agrícola e industrial, além de suas margens financeiras e quantidade de litros produzidos.

O modelo desenvolvido apresentou algumas contribuições, pois podemos, além da avaliação por custos e margens, conseguimos estimá-lo em um certo nível tecnológico estabelecido. Fomos capazes de avaliar a questão de investimentos em cogeração e energia, podemos explicitar dados mais precisos de operação e outros gastos, pois também, avaliamos os tributos aplicados.

Para o desenvolvimento da curva de performance da resiliência e da curva de experiência foi necessário que se gerassem dados sobre margens e custos, praticados dentro das usinas produtoras de açúcar e etanol. O modelo empírico desenvolvido foi capaz de considerar as diversas etapas que ocorreram no processo produtivo, possibilitando um esclarecimento discriminado de como cada etapa interferiu nos custos e margens, dessa forma, esta construção foi de suma importância, uma vez que estes dados não estão amplamente disponíveis. A modelagem foi considerada uma ferramenta importante no

entendimento de fenômenos, pois permitiu a avaliação comparativa e agregada dos sistemas e subsistemas de produção. Na ocorrência dessa situação não ficou dúvida da relevância da contribuição do modelo.

5.2 Conclusões da Resiliência

Para evidenciar que uma cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar foi resiliente às perturbações que a acometeram, neste trabalho, foi construído um modelo de simulação, o qual gera resultados em margens financeiras. Uma vez alimentando o modelo com informações empíricas foi possível obter resultados ano a ano. Com estas duas informações (margem x ano), adicionadas a informação do percentual de tipo de usinas disponíveis a cada ano, foi criado um gráfico onde pode se evidenciar as resiliências. Por meio de cálculos integrais se identificaram os períodos de maior e menor resiliência (RESI), Resistência (RES), Recuperação (REC) e Crescimento (CRES), que forneceram suporte para os resultados quantitativos.

Para avaliar empiricamente o conceito de resiliência na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, foi preciso resgatar a teoria de Bruneau *et al.* (2003), Zobel (2011b), Tukamuhabwa *et al.* (2015); e fazer algumas adaptações. A partir da definição do que é a uma cadeia de suprimentos resiliente (SCRES), com os seus quatro aspectos principais definidos, a saber: preparação, resposta, recuperação e crescimento. Neste enfoque foi necessário fazer diferenciação para a cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar, onde foi proposto o chamado E.P.I.L.E. de desempenho e a pós-intervenção, que diferenciou um evento disruptivo de um conjunto de eventos que causam perturbações de efeito prolongado. O estudo empírico identificou que não há fase de preparação ao se observar o setor como um todo.

Com base nas simulações e consequentemente nas margens obtidas, foi criado um gráfico da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, onde se observou, a proporção percentual estimada de usinas por nível tecnológico e suas margens médias ponderadas, como *proxy* da resiliência. A divisão por blocos e períodos juntamente com o cálculo das respectivas áreas, resultaram em valores que puderam avaliar quantitativamente o conceito de resiliência na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Sob a ótica qualitativa identificou-se elementos políticos, tecnológicos e econômicos, além de fatores de

capacidade e fatores de vulnerabilidade que levaram a constatar que houve um aumento de resiliência ao longo do tempo. Assim, sob uma perspectiva qualitativa e quantitativa se demonstrou o aumento de resiliência ao longo dos períodos analisados.

Quanto à resiliência não foi encontrado trabalho totalmente similar, apenas, alguns segmentos e conceitos que deram sustentação para esta construção. Como o trabalho foi aplicado a uma cadeia específica, a generalização do resultado não o torna expansível para outros setores, de modo que ele só pode ser assegurado para a situação estudada aqui. No entanto, o seu método poderia ser aplicado em outros setores para verificar sua validade. Além disto, ele pode ser utilizado como auxílio às decisões estratégicas. Se esse resultado puder ser demonstrado por aplicação em outros casos, essa abordagem proporcionaria uma ferramenta poderosa para melhorar as decisões tomadas nas indústrias, atualmente, principalmente dentro do contexto da resiliência.

Embora a avaliação de resiliência baseada neste modelo seja poderosa, ela requereu informações detalhadas sobre características de processamentos agrícolas e industriais, já ocorridos. Mudanças de informações que têm potencial para ocorrer no futuro, podem ser difíceis de adquirir, principalmente, para novas tecnologias e dados competitivos, fazendo a decisão de seleção de fatores, ocorrida nos resultados, uma tarefa laboriosa. Em resposta a esta necessidade, se propôs uma estrutura para orientar a seleção de comportamentos já ocorridos de aprendizagem ou que reforçaram a resiliência, com análises retrospectivas em termos de custos e margens que afetaram as tecnologias, além das políticas e possíveis reações de mercado em avaliação. Assim, foi desenvolvido um quadro os quais tiveram estes fatores identificados:

- cana-de-açúcar, máquinas agrícolas, transporte, resíduos, fatores climáticos, moagem, fermentação, caldeiras e sistema de cogeração, destilação, reuso da água, automação, instituições e programas criados pelo governo para formular políticas e fixar diretrizes, mecanismos de intervenção política, pesquisa científica tecnológica e desenvolvimento, opinião pública, motores automotivos e o mercado de automóveis, fusões e aquisições, novos investidores e parcerias comerciais, venda e preço de bioenergia à rede, aumento do mercado de etanol e açúcar, produtividade agrícola e industrial, diversificação de produtos e marcas, preços da cana-de-açúcar, etanol e gasolina, ociosidade ou capacidade ociosa, preço da terra, custo de mão de obra, localização, economia de escala.

5.3 Conclusões da Curva de Experiência

Foi criada uma curva de experiência dividindo as reduções de custos dentro dos elos agrícola e industrial, para maior aprofundamento, procurando identificar mudanças políticas, tecnológicas e econômicas, caracterizando a sua respectiva aprendizagem responsável. Os custos são importantes fontes de variações de margens, assim, uma análise sob a curva de experiência, pode ser considerada como um aprofundamento das questões relativas a resiliência do setor estudado.

Neste trabalho, as curvas de experiência foram empregadas como ferramentas auxiliares de análise de transformações tecnológicas, além de se observar as adoções de medidas públicas e reações do mercado, que induziram a diminuição de custos, entre 1975 e 2014. A tendência do custo total, para este intervalo, apontou que o custo vem diminuindo em 22% a cada dobra. Observou-se mudanças estruturais na cadeia, optando assim, por dividir em três tendências para o custo total. As duas primeiras se encontram de 1975 a 1997 e a terceira de 1997 a 2014, para os elos agrícola e industrial. Para o custo total, a primeira tendência apontou para um leve aumento de custos de 9%, a segunda para uma redução de custos de 27,5% por dobra e a terceira para uma diminuição de apenas 2% por dobra. É interessante notar que os custos do elo agrícola subiram na terceira tendência em 26%. Analisando as taxas de aprendizagem estimadas estatisticamente, bem como fazendo o uso da cronologia, concluímos os motivos das causas identificadas.

A curva de experiência não teve grande inovação no seu método e uma primeira pequena contribuição e já esperada para um trabalho como este foi ter atualizado para um período histórico mais recente, o qual vimos uma estrutura de mercado diferente, onde foi avaliado as consequências desta mudança estrutural, em um prazo mais longo. Muito importante para este tipo de análise, verificando as mudanças que ocorreram por conta da desregulamentação, liberação de preços e evolução dos veículos *flex-fuel* (FFV), além da crise sofrida no setor. Depois, uma segunda contribuição dentro das curvas de experiência, onde se diferenciou de outros trabalhos realizados, foi a utilização de custos no lugar dos preços.

5.4 Relações de Causa-efeito e Causalidade

Para ajudar na interpretação das relações de causa-efeito e causalidade os resultados foram aglutinados a um constructo que adiciona o intervalo de tempo ocorrido, os principais eventos deflagradores, as estratégias adotadas e os respectivos resultados destas estratégias. Relacionou-a com dados históricos que teve por intuito levantar os fatores que podem influenciar nos custos e margens, mas, que não impedem que novos elementos no futuro venham se somar aos fatores levantados, neste estudo.

É possível argumentar que os resultados apontam que alguns eventos deflagradores podem ter sido significativos para fomentar ou reduzir os volumes de produção do etanol e açúcar, afetando consequentemente o seu custo, margem, taxa de aprendizado e resiliência do setor naquele momento. Pôde-se interpretar como as forças ou fatores que direcionaram as reduções mais amplas e firmes para diminuições ou alterações dos custos. Desta maneira, para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar as tecnologias do elo agrícola e industrial, instrumentos e mecanismos políticos ou reações do mercado foram representadas. No entanto, o levantamento não identifica a possibilidade de inovações futuras ou radicais no setor.

5.5 Conclusões Metodológicas

Nas investigações da resiliência e das curvas de experiência foram necessários ter bons dados, que regularmente são árduos de se coletar. É possível argumentar que a incerteza dos dados é uma grande barreira que os autores sempre relatam pela constante falta de informações sistematizadas e com boa sustentação metodológica, muito observado neste estudo. A organização e edificação de dados confiáveis exigem um elevado nível de disciplina, e as suas decorrências devem ser compreendidas dentro do contexto, onde são geradas.

Foi observado que a densidade e qualidade de muitos estudos da área flutuam de acordo com o setor, isto é, em momentos de pujança tendem a ficar em maior número e mais completos e por outro lado, em fases de adversidades ficam escassos. O que acarretou em menor disponibilidade de dados, justamente, nos períodos mais críticos de análise.

A medição, em condições estáveis de mercado, é relativamente mais fácil de se avaliar e representa condições que não foram encontradas no contexto da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar; um mercado com grande influência de ciclos produtivos atrelados a *commodities*. Assim, para minimizar os erros, como todo método de avaliação, foi utilizado com ponderação: desta maneira, para as curvas de experiência, se justificou o uso inicial do ano de 1975. Complementarmente, constatamos que a análise pela medição de resiliência proposta, nesta tese, apresenta ser um bom método para o curto e médio prazos por ser mais congruente e adequado ao captar as oscilações de menor período.

Para uma análise de longo prazo da curva de experiência, quanto mais se fracionar e esquadrihar cada evolução de processos e equipamentos, maior será o entendimento sobre o potencial de redução de custos e respectiva fonte de competitividade. Somente após muitas duplicações do volume pôde-se distinguir o padrão ou tendência subjacente.

Chegamos a uma conclusão indireta que o uso de curvas de experiência para prognóstico e previsões pode ser questionado em certas circunstâncias. As curvas de experiência são um método para análise de tendências e, juntamente com outras ferramentas de análise deste tipo, são adequadas em condições de baixa incerteza, para séries de inovações incrementais e alto nível de agregação. Esta ferramenta, quando usada para previsão, não deve ser usada em circunstâncias caracterizadas por alta incerteza, como mudanças radicais na tecnologia ou para previsões de longos intervalos de tempo. No caso da cadeia de suprimentos de cana-de-açúcar esta questão foi bem pertinente.

A maior parte do trabalho realizado para curva de experiência analisou a evolução do custo a um nível macro, usando curvas lineares de log e custo relacionado ao volume acumulado. Pode-se afirmar que a força deste método analítico está em sua facilidade relativa, se comparado a outros métodos matemáticos mais complexos, que utilizam funções não-lineares de dois estágios, além disto, o método foi apropriado para o trabalho proposto e realizado.

5.6 Trabalhos Futuros

Foi possível ampliar o conhecimento de como as margens financeiras afetam a perpetuidade da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Entretanto, apesar do

ineditismo e da qualidade dos estudos desenvolvidos, trabalhos e estudos adicionais podem ser necessários para entender as novas ocorrências que a série inicialmente estudada não previu, como por exemplo, o etanol de segunda geração.

Uma análise que se utilize de dados locais em diferentes áreas de plantio, pode contribuir para um entendimento apurado do comportamento de custos de regiões específicas. Existe uma limitação do escopo escolhido a ser abordado, tanto em razão da amplitude quanto pelo ineditismo adotado, assim, o consequente processo metodológico evitou locais específicos, sem privilegiar uma das três principais regiões produtoras do Brasil: tradicional, expansão e nordeste.

O estudo corrobora para possíveis discussões a respeito de uma temática mais completa e abrangente, no entanto, estas peculiaridades regionais, muitas vezes, escondem importantes diferenças na produtividade agrícola e industrial e exercem influências diretas e decisivas nas respectivas estruturas de custos e margens. Um trabalho cujo objetivo tenha este direcionamento, ou seja, o uso de regiões específicas, poderia adicionar maiores esclarecimentos para a gestão da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

A pesquisa ainda não explorou completamente as peculiaridades dos empreendimentos e as capacidades que tornam as cadeias de suprimentos da cana-de-açúcar resilientes, principalmente a nível de uma determinada usina.

Ainda existem poucos estudos de campo múltiplos e longitudinais rastreando à medida que a resiliência se desenvolve ao decorrer do tempo, afetando vários atores ao longo da cadeia de suprimentos, assim, um estudo que envolva outras cadeias de suprimentos pode acrescentar a literatura da área.

Outra sugestão seria que o modelo poderia ser aperfeiçoado com novos dados disponíveis, a depender de outros parâmetros de análise, como a tributação do açúcar ou maior detalhamento dos diferentes produtos que podem ser fornecidos. Outras alterações poderiam ir além das mudanças incrementais: como impactos ambientais, análise de externalidades ou outros que se fizerem necessário, além é claro, de atualizar o modelo para dados mais atuais.

Um ponto interessante seria a avaliação para cenários específicos, o qual simularia diferentes conjunturas econômicas, níveis de preço, valores de venda de bioenergia, tributações, dentre outros.

Seria uma outra proposta, uma previsão de até médio prazo utilizando o modelo. Para isso, seria necessário aperfeiçoá-lo, aplicando tendências possíveis de ocorrerem juntamente com cenários esperados.

Poderia, ainda, ampliar o modelo, avaliando a influência dos demais elos de distribuição e revenda na competitividade da cadeia, para estudos dos impactos de suas dinâmicas, nos elos agrícolas e industriais.

Pesquisas exploratórias adicionais poderiam ser conduzidas para responder como os tomadores de decisão poderiam determinar um nível aceitável ou otimizado para construção de cadeias de suprimentos resilientes. Por exemplo, novas ferramentas de gerenciamento de risco ou medição da resiliência da cadeia de suprimentos poderiam ser desenvolvidos para permitir que os gerentes da cadeia de suprimentos monitorem e avaliem continuamente as tecnologias, políticas e reações do mercado para alinhar suas estratégias de acordo com as necessidades.

Da mesma forma, simulações e outras programações técnicas e matemáticas poderiam ser usadas em modelos econométricos para comparar estratégias de mitigação e parcerias público-privadas em termos de custos, margens e benefícios para empresas e sociedade.

O modelo poderia até caminhar para um sistema integrado de análise, se desenvolvermos através de programação, uma Interface de Programação de Aplicativos - APIs e termos acesso a indicadores extraídos de ERPs de usinas reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPMP. **Guia para o Gerenciamento de Negócio Corpo Comum de Conhecimento - BMP CBOK**. [S.l: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.abpmp-br.org/>>.

ABREU, Marcelo de Paiva *et al.* **A Ordem do Progresso**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1995. 445 p. .8570016034.

AGROLINK. *Cosan inaugura em Jataí (GO) a mais moderna usina de etanol do mundo*. Disponível em: <agrolink.com.br/noticias/cosan-inaugura-em-jatai--go--a-mais-moderna-usina-de-etanol-do-%0Amundo_110960.htm>.

AHMADI JAVID, Amir; AZAD, Nader. Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review** v. 46, n. 5, p. 582–597 , 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.005>>.13665545.

ALCHIAN, Armen. Reliability of Progress Curves in Airframe Production. **The Econometrica Society** v. 31, n. 4, p. 679–693 , 1963. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1909166>>.

ALCOCK, Ruth E; BUSBY, Jerry. Risk Migration and Scientific Advance: The Case of Flame-Retardant Compounds. **Risk Analysis** v. 26, n. 2, p. 369–381 , abr. 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1539-6924.2006.00739.x>>.

ALMEIDA, E. L. F.; OLIVEIRA, P. V.; LOSEKANN, Luciano. Impactos da contenção dos preços de combustíveis no Brasil e opções de mecanismos de precificação. **Revista de Economia Política** v. 35, n. 3, p. 531–556 , 2015. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-31572015000300531>.

ANDRADE, Maria Margarida De. **Como Preparar Trabalhos para Cursos de Pós-Graduação: Noções Práticas**. 7ª ed. São Paulo: [s.n.], 2008. 168 p. .9788522451036.

ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis : 2016. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis** Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico>>.

ANSOFF, H. Igor. **Strategic Management**. [S.l.]: Palgrave Macmillan, 2007. 251 p. .978-0230525481.

ANZANELLO, Michel José; FOGLIATO, Flávio Sanson. Curvas de aprendizado : estado da arte e perspectivas de pesquisa. **Gestão & Produção** v. 14, n. 1, p. 109–123 , 2007.

ARGOTE, Linda; EPPLE, Dennis. Learning Curves in Manufacturing. **Science** v. 247, n. 4945, p. 920–924 , 23 fev. 1990. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.247.4945.920>>.

ARROW, Kenneth J. The Economic Implications of Learning by Doing. **The Review of Economic Studies** v. 29, n. 3, p. 155–173 , 1962.

AZEVEDO, Hamilton Jorge. Uma Análise da Cadeia Produtiva de Cana-de-Açúcar na Região Norte Fluminense. **Boletim do Observatório Socioeconômico da Região Norte Fluminense** n. 6, p. 50 , 2002. Disponível em: <<http://goo.gl/ZO2fy>>.

AZEVEDO, S G *et al.* Supply chain vulnerability: environment changes and dependencies. **International journal of logistics and transport** v. 2, n. 1, p. 41–55 , 2008.

BACCARIN, José Giacomo. **A desregulamentação e o desempenho do complexo sucroalcooleiro no Brasil**. Universidade Federal de São Carlos, 2005. 291 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/3466>>.

BACCHI, Mirian Rumenos Piedade *et al.* **ETANOL/CEPEA: Maior ganho animal setor, mas baixa competitividade do hidratado preocupa**. Piracicaba: [s.n.], 2017.

BAKE, J.D. van den Wall. **Cane as key in Brazilian ethanol industry: Understanding cost reductions through an experience curve approach**. Unicamp, 2006. 83 p.

BAKE, J.D. van den Wall *et al.* Explaining the experience curve : Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. **Biomass and Bioenergy** v. 33, n. 4, p. 644–658 , 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.10.006>>.

BALCI, Osman. Verification, Validation and Accreditation of simulation models. **Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference** p. 135–141 , 1997.0-7803-6579-8.

BALCI, Osman. Verification, Validation and Testing. **Handbook of simulation**. [S.l: s.n.], 1998. 10 v. p. 335–393. 9780470172445.

BALCOMBE, Kelvin; RAPSOMANIKIS, George. Bayesian Estimation and Selection of Nonlinear Vector Error Correction Models: The Case of the Sugar-Ethanol-Oil Nexus in Brazil. **American Journal of Agricultural Economics** v. 90, n. 3, p. 658–668 , ago. 2008. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ajae/article-lookup/doi/10.1111/j.1467-8276.2008.01136.x>>.

BARBALHO, Nelson. **Dicionário do Açúcar**. Recife: [s.n.], 1984. 404 p. .9788570190215.

BARBOSA DA SILVA, Ana Thereza. **Modelagem e Simulação de Processos (corte, carregamento e transporte) na produção agrícola de açúcar e álcool**. Universidade Federal de Uberlândia, 2012. 120 p.

BARROS, Geraldo Sant'ana de Camargo; MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias De. A Desregulamentação do Setor Sucroalcooleiro. **Revista de Economia Política** v. 22, n. 2 (86), p. 156–173 , 2002.

BEZERRA, Marcelo. Consumo menor, vendas maiores. **Revista Brasil Energia** v. 7, p. 1–2 , 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/namidia/26125968920319033149/consumo-menor-por-cento2C-vendas-maiores-/>>.

BNDES; CGEE. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. 316 p. .9788587545244.

BONOMA, Thomas V. Case Research in Marketing: Opportunities, Problems, and a Process. **Journal of Marketing Research** v. 22, n. 2, p. 199 , maio 1985. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/3151365>>.

BORGES, Ana Cláudia Giannini; COSTA, Vera Mariza Henriques de Miranda. Fusões e Aquisições no Setor Sucroalcooleiro pós desregulamentação. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção - A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão (ENESEP)** p. 14 , 2009. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enesep2009_TN_STO_097_657_13658.pdf>.

BOSTON CONSULTING GROUP. **Perspectives on Experience**. Boston: BCG Press, 1970. 109 p. .

BOTTANI, Eleonora; MONTANARI, Roberto. Supply chain design and cost analysis through simulation. **International Journal of Production Research** v. 48, n. 10, p. 2859–2886 , 2010.00207543.

BRASIL. *Decreto nº 15209 de 28 de dezembro de 1921* . Brasil: Crêa a Estação Experimental de Combustíveis e Minerios, anexa ao Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, e aprova o respectivo regulamento. , 1921

BRASIL. *Decreto nº 22.789 de 1º de junho de 1933* . Brasil: [s.n.]. Disponível em: <<https://dre.pt/application/file/67508032>>. , 1933

BRESSAN, Flávio. O Método do Estudo de Caso. **Administração On Line** v. 1, n. 1, p. 1–15 , 2000. Disponível em: <http://www.fecap.br/adm_online/art11/flavio.htm>.

BRUNEAU, Michel *et al.* A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. **Earthquake Spectra** v. 19, n. 4, p. 733–752 , 2003.8755-2930.

BRUNEAU, Michel; REINHORN, Andrei. Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. **Earthquake Spectra** v. 23, n. 1, p. 41–62 , fev. 2007. Disponível em: <<http://earthquakespectra.org/doi/10.1193/1.2431396>>.

BRUNELLI, Sidnei. Recepção, alimentação, preparo e moagem de cana. **Revista Opiniões** p. 4–5 , 2013. Disponível em: <<http://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/9-recepcao-alimentacao- preparo-e-moagem-de-cana/>>.

BUARQUE. Sérgio. **Cadeia produtiva da indústria sucroalcooleira**. Recife: [s.n.], 2008. Disponível em: <<http://189.39.124.147:8030/downloads/sucroalcooleira.pdf>>.

CAMPOS, Natália Lorena. Políticas de Estado no Setor Sucroenergético. **Geo UERJ** v. 0, n. 26, p. 301–328 , 2015. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/12696>>.

CARTER, E. Eugene. What are the Risks in Risk Analysis? **Harvard Business Review** v. 50, n. 4, p. 72–82 , 1972.

CASTRO, Rogério Alexandre Oliveira. Nova regulação do mercado de etanol e da indústria de biocombustíveis. **I Congresso Internacional de Direito, Democracia e**

Inclusão p. 525–545 , 2012. Disponível em: <<http://www.pucpr.br/>>.

CAVALCANTI, Guilherme de Albuquerque. A dinâmica Econômica do PROÁLCOOL: Acumulação e Crise, 1975-1989. **Revista Brasileira de Energia** v. 2, n. 1, p. 10 , 1992. Disponível em: <www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=33>.

CAVALCANTI, Marcelo Castello Branco. **Análise Dos Tributos Incidentes Sobre Os Combustíveis Automotivos No Brasil**. UFRJ, 2006. 200 p.

CEBALLOS-SCHIAVONE, Carla Homem De Mello S M. **Tratamento térmico do caldo de cana-de-açúcar visando a redução de contaminantes bacterianos – Lactobacillus - na produção de etanol e eficiência de tratamento do fermento por etanol**. Universidade de São Paulo, 2009. 1-177 p.

CELTA. *Zeólita , o mineral com passado , presente e futuro* 2012. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/zeolita-o-mineral-com-passado-presente-e-futuro/>>.

CGEE. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Org.)**Centro de Gestão e Estudos Estratégicos** Brasília: [s.n.], 2009. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/5Bioetanol+de+Cana+de+Açucar+2009_6407.pdf>.9788560755158.

CGWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. São Paulo: [s.n.], 2015. 298 p. .9788535279320.

CHEN, Xiaoguang; KHANNA, Madhu; YEH, Sonia. Stimulating learning-by-doing in advanced biofuels: effectiveness of alternative policies. **Environ. Res. Lett. Environ. Res. Lett** learning by doing experience curve, v. 7, n. 7, p. 45907–45907 , 2012. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/4/045907>>.

CHRISTOFOLETTI, Rodrigo; MÜLLER DE MELLO, André. Monumento Nacional Ruínas Engenho São Jorge dos Erasmos – entre a teoria e a prática preservacionista. **Histórica - Revista Eletrônica do Arquivo Público do Estado de São Paulo** n. 47, p. 9 , 2011. Disponível em: <<http://www.historica.arquivoestado.sp.gov.br/materias/anteriores/edicao47/materia03/>>.

CHRISTOPHER, Martin; HOLWEG, Matthias. “Supply Chain 2.0”: managing supply chains in the era of turbulence. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management** v. 41, n. 1, p. 63–82 , fev. 2011. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/09600031111101439>>.

CHRISTOPHER, Martin; PECK, Helen. Building the Resilient Supply Chain. **The International Journal of Logistics Management** v. 15, n. 2, p. 1–14 , jul. 2004. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/09574090410700275>>.

CHURCHMAN, Charles West. **The Systems Approach**. [S.l.]: Delacorte Press, 1968. 243 p. .978-0440384076.

CIMELLARO, Gian Paolo; REINHORN, Andrei M; BRUNEAU, Michel. Seismic resilience of a hospital system. **Structure and Infrastructure Engineering** v. 6, n. 1–2, p. 127–144 , 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/>>

15732470802663847>.1573-2479.

CLAUDINO, E. S.; REIS, J. G. M. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): Perspectivas da Produção de Bioeletricidade pelo Setor Sucroenergético Brasileiro. **5th Academic International Workshop Advances in Cleaner Production - Cleaner production towards a sustainable transition** , 2015.

CME GROUP. **Guia Auto-Didático Para Hedge Com Futuros e Opções de Grãos e Sementes Oleaginosas**. Chicago: [s.n.], 2009.

COELHO, Suani Teixeira. **Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa. Um Modelo para o Estado de São Paulo**. USP, 1999. 278 p.

COLATAT, Pech C. **Photovoltaic Systems, The Experience Curve, And Learning By Doing: Who Is Learning and What are They Doing?** Massachusetts Institute of Technology, 2009. 154 p.

COLICCHIA, Claudia; DALLARI, Fabrizio; MELACINI, Marco. A simulation-based framework to evaluate strategies for managing global inbound supply risk. **International Journal of Logistics Research and Applications** v. 14, n. 6, p. 371–384 , 2011.1367-5567.

CONAB. **Conjuntura Especial Cana-de-Açúcar - Período 2010 a 2016**. [S.l: s.n.], 2017.

COPERSUCAR. *Comercialização e Logística*. Disponível em: <<http://www.copersucar.com.br/comercializacao-e-logistica/>>.

CORREIA, Eduardo Luiz. **A Retomada do Uso De Álcool Combustível no Brasil**. UFJF, 2007. 8 p.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. São Paulo: Blucher, 2016. 224 p. .9788521210627.

COUTU, Diane. How resilience works. **Harvard business review** v. 80, p. 46–55 , 2002.

CRAIGHEAD, Christopher W. *et al*. The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities. **Decision Sciences** v. 38, n. 1, p. 131–156 , 2007.00117315.

CREPALDI, Silvio Aparecido. **Contabilidade Rural**. [S.l: s.n.], 2012. 432 p. .9788522471140.

CRUZ, Michele Gomes Da; GUERREIRO, Eziquiel; RAIHER, Augusta Pelinski. A Evolução da Produção de Etanol no Brasil , no Período de 1975 a 2009. **Revista Econômica do Nordeste** v. 43, n. 4, p. 141–160 , 2016.

CTC. **Manual de Conservação e Reúso de Água na Agroindústria sucroenergética**. Brasília: [s.n.], 2009.

CUMMING, G. S. *et al*. An exploratory framework for the empirical measurement of

resilience. **Ecosystems** v. 8, n. 8, p. 975–987 , 2005.14329840.

DAL BEM, Armando José; KOIKE, Gilberto H. A.; PASSARINI, Luís Carlos. Modelagem e Simulação para o Processo Industrial de Fabricação de Açúcar e Alcool. **Revista Minerva - Pesquisa & Tecnologia** v. 3, n. 1, p. 33–46 , 2006. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva_03\(01\)_04.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva_03(01)_04.pdf)>.

DANTAS FILHO, Paulo Lucas. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo**. USP - Universidade de São Paulo, 2009. 171 p. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10062011-114743/publico/Paulo_Dantas.pdf>.

DAY, George S.; MONTGOMERY, David B. Diagnosing the Experience Curve. **Journal of Marketing** v. 47, n. 2, p. 44 , 1983. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1251492%5Cnhttp://www.jstor.org/stable/1251492?origin=crossref>>.00222429.

DIAS, Marina O.S. *et al.* Simulation of ethanol production from sugarcane in Brazil: economic study of an autonomous distillery. 2010, [S.l.]: Elsevier B.V., 2010. p.733–738. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1570794610281233>>. 9780444535696. .

DOS SANTOS, José Darcy *et al.* Development of a vinasse nutritive solution for hydroponics. **Journal of Environmental Management** v. 114, p. 8–12 , 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.045>>.1095-8630 (Electronic)r0301-4797 (Linking).

DUARTE. Thiago; RIZZARDO. Jose Luis. **Brazilian Sugar & Ethanol**. [S.l: s.n.], 2015.

DUFT. Daniel. **Cana de ano, ano e meio ou inverno?** Campinas: [s.n.], 2014.

DUTTON, John M.; THOMAS, Annie. Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity. **Academy of Management Review** v. 9, n. 2, p. 235–247 , 1984. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/258437?seq=1&cid=pdf-reference#references_tab_contents>.

DUTTON, John M.; THOMAS, Annie; BUTLER, John E. The History of Progress Functions as a Managerial Technology. **Business History Review** v. 58, n. 2, p. 204–233 , 1984. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/3115048>>.

EISENHARDT, Kathleen M. Building Theories from Case Study Research. **The Academy of Management Review** v. 14, n. 4, p. 532 , out. 1989. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/258557?origin=crossref>>.

ENSINAS, Adriano V. *et al.* Thermo-economic optimization of integrated first and second generation sugarcane ethanol plant. **Chemical Engineering Transactions** v. 35, p. 523–528 , 2013.9788895608266.

EPE. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2015**. Brasília: [s.n.], 2015.

EROL, Ozgur; SAUSER, Brian J.; MANSOURI, Mo. A framework for investigation into

extended enterprise resilience. **Enterprise Information Systems** v. 4, n. 2, p. 111–136, maio 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17517570903474304>>.

ESTEVAM, Felipe; CAIXETA, Igor. *Hedge - O que é e como proteger seus investimentos*. Disponível em: <www.tororadar.com.br/blog/hedge-o-que-e>. Acesso em: 1 jan. 2017.

FARIA, Vivian. *Exportações de açúcar e etanol seguem superando 2012*. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/mercado/exportacao/exportacoes-acucar-etanol-superando-2012-050313/>>.

FELTRAN-BARBIERI, Rafael. **Biocombustíveis, controvérsia agrícola na economia do petróleo: o caso do etanol no Cerrado**. USP, 2009. 232 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-22112011-143437/pt-br.php>>.

FERREIRA, Enéas Rente; ALVES, Flamarion Dutra. Organização Espacial da Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo: Uma análise evolutiva. **V Encontro de Grupos de Pesquisa: agricultura, desenvolvimento regional e transformações socioespaciais** p. 18, 2009.

FERREIRA, Marjorie Angélica Sabioni; TEIXEIRA, Erly Cardoso; SOUZA, Manoella Cabral De. Determinantes da receita de exportação brasileira de açúcar e álcool. **Revista de Economia Agrícola** v. 56, n. 2, p. 47–59, 2009. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/publicacoes/rea/n2/rea4-2-09.pdf>>.

FIKSEL, Joseph. Designing Resilient, Sustainable Systems. **Environmental Science and Technology** v. 37, n. 23, p. 5330–5339, 2003.0013-936x.

FONSECA, Natalie Alexandra Amézquita. **Simulação do processo de adsorção psa para separação da mistura etanol - água**. Unicamp, 2011. 141 p. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000807033&fd=y>>.

FRANCO, Íria Oliveira. Expansão da Cana-de-Açúcar na Microrregião Sudoeste de Goiás: Análise Espacial das Mudanças do Uso e Cobertura do Solo nos Anos de 2001, 2006 e 2011. **Boletim Goiano de Geografia** v. 34, n. 3, p. 481–499, 2011. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/bgg/issue/view/1555>>.

FREITAS FILHO, Paulo José De. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena**. [S.l.: s.n.], 2008. 372 p. .978-85-7502-228-3.

FURTADO, Celso. **Formação Econômica do Brasil**. 32. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142001000300025&lng=pt&tlng=pt>. .9788535909524.

FUX, Luiz. *Pesquisa de Jurisprudência - STF*. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.stf.jus.br/portal/jurisprudencia/visualizarEmenta.asp?s1=000176527&base=baseMonocraticas>>. , 2012

GAO, Yuanyang; NIU, Zemin; WANG, Xiaoya. Analysis on the effects of stock sharing on supply chain. **Computers & Industrial Engineering** v. 60, n. 3, p. 433–437, 2011.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V27-51962RR-1/2/8c01573c4a0709a7edea3db5b62e14a9>>.9781627486828.

GARCIA, Claudio. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. São Paulo: [s.n.], 1997. 458 p. .85-314-0402-9.

GARRISON, Ray H.; NOREEN, Eric. W.; BREWER, Peter C. **Contabilidade Gerencial**. 14. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 751 p. .9788580551624.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa de Pesquisa Social**. 5ª ed. São Paulo: Publicação Atlas, 1999. 206 p. .8522422702.

GITTELL, Jody H. *et al.* Relationships, Layoffs, and Organizational Resilience: Airline Industry Responses to September 11. **The Journal of Applied Behavioral Science** v. 42, n. 3, p. 300–329, 2006. Disponível em: <<http://jab.sagepub.com/content/42/3/300.short>>.00218863.

GOLDEMBERG, José *et al.* Ethanol learning curve—the Brazilian experience. **Biomass and Bioenergy** v. 26, n. 3, p. 301–304, mar. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953403001259>>. Acesso em: 23 jun. 2014.

GOLDEMBERG, José. *Programa do álcool mostra contribuição das pesquisas científica e tecnológica para o País*. Disponível em: <<http://www.fecomercio.com.br/noticia/goldemberg-programa-do-alcool-mostra-contribuicao-das-pesquisas-cientifica-e-tecnologica-para-o-pais>>.

GOLDEMBERG, José. The evolution of ethanol costs in Brazil. **Energy Policy** v. 24, n. 12, p. 1127–1128, 1996.

GOMES, Sebastião Teixeira. *Quais são os componentes do custo operacional efetivo?* Disponível em: <<http://www.gestaonocampo.com.br/biblioteca/quais-sao-os-componentes-do-custo-operacional-efetivo/>>.

GOMEZ, José M.A.; LEGGEY, Luiz F.L. An analysis of the impact of Flex-Fuel vehicles on fuel consumption in Brazil, applying Cointegration and the Kalman Filter. **Energy** v. 81, p. 696–705, mar. 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544215000225>>.

GOODE, William J.; HATT, Paul K. **Métodos em pesquisa social**. 4ª ed. São Paulo: [s.n.], 1972. 488 p. .

GORDINHO, Margarida Cintra. **Do álcool ao etanol: trajetória única**. São Paulo: [s.n.], 2010. 145 p. .978-85-7816-070-8.

GRABOWSKI, Martha; ROBERTS, Karlene. Risk Mitigation in Large-Scale Systems: Lessons from High Reliability Organizations. **California Management Review** v. 39, n. 4, p. 152–161, jul. 1997. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.2307/41165914>>.

GRANVILLE, W. A.; SMITH, P. F.; LONGLEY, W. R. **Elementos de Cálculo Diferencial e Integral**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1961. 703 p. .

GRÜBLER, Arnulf; NAKIĆENović, Nebojša; VICTOR, David G. Dynamics of energy technologies and global change. **Energy Policy** v. 27, n. 5, p. 247–280, maio 1999. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421598000676>>.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria Básica**. 5th. ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2011. 924 p. .9780073375779.

HAMEL, Gary; VÄLIKANGAS, Liisa. The Quest for Resilience. **Harvard Business Review** v. 81, n. 9, 2003.00178012.

HAMMAMI, Ramzi; FREIN, Yannick; HADJ-ALOUANE, Atidel B. A strategic-tactical model for the supply chain design in the delocalization context: Mathematical formulation and a case study. **International Journal of Production Economics** v. 122, n. 1, p. 351–365, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.030>>.0925-5273.

HARREL, C. R. *et al.* **Simulação: Otimizando os Sistemas**. São Paulo: Belge IMAM, 2002. .

HARREL, Charles; GHOSH, Biman Ghosh; BOWDEN, Royce O. **Simulation Using Promodel**. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 2000. 704 p. .978-0073401300.

HENDERSON, Bruce. The Application and Misapplication of the Experience Curve. **Journal of Business Strategy** v. 4, n. 3, p. 3–9, 1984.

HENDRICKS, Kevin B.; SINGHAL, Vinod R.; ZHANG, Rongrong. The effect of operational slack, diversification, and vertical relatedness on the stock market reaction to supply chain disruptions. **Journal of Operations Management** v. 27, n. 3, p. 233–246, 2009.0272-6963.

HERTZ, David B.; HOWARD, Thomas. **Risk analysis and its applications**. [S.l.]: Jhon Wiley & Sons Ltd, 1983. 340 p. .

HETTINGA, W.G. *et al.* Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach. **Energy Policy** v. 37, n. 1, p. 190–203, jan. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421508003996>>. Acesso em: 8 set. 2014.

HIGGINS, Andrew *et al.* A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems** v. 82, n. 2, p. 99–115, 2004.

HILDEBRAND. Clive. **Independent Assessment of the Sugar Industry 2002**. **Forestry** Canberra: [s.n.], 2002. Disponível em: <Independent assessment of the sugar industry>.

HIMMELBLAU, David M. **Process Analysis by Statistical Methods**. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 1970. 463 p. .978-0471399858.

HIRSHLEIFER. Investment Decision Under Uncertainty: Choice-Theoretic Approaches. **The Quarterly Journal of Economics** v. 79, n. 4, p. 509–536, 1965. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1880650>>.9780199546220.

HUANG, Li Ting; HSIEH, I. Chien; FARN, Cheng Kiang. On ordering adjustment policy under rolling forecast in supply chain planning. **Computers and Industrial Engineering** v. 60, n. 3, p. 397–410, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2010.07.018>>.8869307824.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Creating Markets for Energy Technologies**. Paris: [s.n.], 2003.

Jl, Guojun; ZHU, Caihong. Study on supply chain disruption risk management strategies and model. jun. 2008, [S.l.]: IEEE, jun. 2008. p.1–6. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-52249112250&partnerID=tZOtx3y1>>. 978-1-4244-1671-4. .

JOHNSON, Noel; ELLIOTT, Dominic; DRAKE, Paul. Exploring the role of social capital in facilitating supply chain resilience. **Supply Chain Management: An International Journal** v. 18, n. 3, p. 324–336, 24 abr. 2013. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/SCM-06-2012-0203>>.1359-8546.

JOIA, Roberto Midoguti; FREGONESI, Mariana Simões Ferraz do Amaral; REZENDE, Amaury José. Análise Da Carga Tributária No Setor Sucroalcooleiro. **Qualit@s Revista Eletrônica** v. 1, n. 1, p. 0–20, 2011. Disponível em: <<http://revista.uepb.edu.br/index.php/qualitas/article/viewFile/1001/565>>.

JORDAN, William C.; GRAVES, Stephen C. Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility. **Management Science** v. 41, n. 4, p. 577–594, abr. 1995. Disponível em: <<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.41.4.577>>.

JUNGINGER, Hans Martin. **Learning in Renewable Energy Technology Development**. Universiteit Utrecht, 2005. 206 p. 9039304866.

JUNGINGER, Hans Martin *et al.* Technological learning in bioenergy systems. **Energy Policy** v. 34, n. 18, p. 4024–4041, dez. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421505002533>>. Acesso em: 16 set. 2014.

JÜTTNER, Uta; MAKLAN, Stan. Supply chain resilience in the global financial crisis: An empirical study. **Supply Chain Management** v. 16, n. 4, p. 246–259, 2011. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79959594222&partnerID=40&md5=37934f3147d55f9f753daa102b362d88>>.1359-8546.

KELTON, W. David; SADOWSKI, Randall P.; SADOWSKI, Deborah. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill, Inc., 2002. .0071122397.

KLEINDORFER, Paul R.; SAAD, Germaine H. Managing Disruption Risks in Supply Chains. **Production and Operations Management** v. 14, n. 1, p. 53–68, 5 jan. 2009. Disponível em: <<http://0-search.proquest.com.library.uark.edu/docview/228758833?pq-origsite=summon>>.

KLIBI, W; MARTEL, A; GUITOUNI, A. The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. **European Journal of Operational Research** v. 203, n. 2, p. 283–293, 2009. Disponível em:

<<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70449527794&partnerID=40&md5=299c4d9def950b7ccfc2cc6ec0bc1ad0>>.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados** v. 24, n. 68, p. 223–253, 2010.0101-546X.

KUNREUTHER, Howard. Risk and Reaction. **Harvard International Review** v. 28, n. 3, p. 37–42, 2006.

LAU, R. S M; XIE, Jinxing; ZHAO, Xiande. Effects of inventory policy on supply chain performance: A simulation study of critical decision parameters. **Computers and Industrial Engineering** v. 55, n. 3, p. 620–633, 2008.0360-8352.

LINNENLUECKE, Martina K. Resilience in Business and Management Research: A Review of Influential Publications and a Research Agenda. **International Journal of Management Reviews** v. 19, n. 1, p. 4–30, jan. 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/ijmr.12076>>.

LONGO, Francesco A.; MIRABELLI, Giovanni. An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. **Computers & Industrial Engineering** v. 54, n. 3, p. 570–588, abr. 2008. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-38849130019&partnerID=40&md5=1cbf2e366cca43f424da42d3fa79b5d9>>.0360-8352.

LONGO, Francesco A.; ÖREN, T. B. Supply chain vulnerability and resilience: A state of the art overview. **20th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2008** n. i, p. 527–533, 2008.8890073268.

MACEDO. Isaias Carvalho; NOGUEIRA. Luiz Augusto Horta. **Avaliação da Expansão da Produção de Etanol no Brasil**. Brasília: [s.n.], 2004.

MACHADO, Fúlvio de Barros Pineiro. Brasil, a doce terra - História do Setor. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica** p. 8, 2003. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf>.

MAFRA, Alan *et al.* *O mais importante mercado de Etanol para o Brasil é o Brasil*. Disponível em: <portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/etanol%0AÁlcool>.

MAGOSSI, Eduardo. *Produção de cana na safra 2011/2012 deve ficar em 533 mi de toneladas*. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/negocios,producao-de-cana-na-safra-20112012-deve-ficar-em-533-mi-de-toneladas,75819e>>.

MAHNAM, Mehdi *et al.* Supply chain modeling in uncertain environment with bi-objective approach. **Computers and Industrial Engineering** v. 56, n. 4, p. 1535–1544, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.038>>.0360-8352.

MANUJ, Ila; MENTZER, John T. Global supply chain risk management strategies. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management** v. 38, n. 3, p. 192–223, 11 abr. 2008. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/09600030810866986>>.

MAPA. **Anuário estatístico da agroenergia 2014**. Brasília: [s.n.], 2015.

MAPA. **Anuário estatístico de agroenergia 2012**. Brasília: [s.n.], 2012.

MAPA. **Mistura Carburante Automotiva (Etanol Anidro/Gasolina) Cronologia**. Brasília: [s.n.], 2011.

MAPA. *Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia*. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao.action?sgJAASAplicacaoPrincipal=%0Asapcana>. Acesso em: 1 jan. 2008.

MAPA. *Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia*. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao.action?sgJAASAplicacaoPrincipal=%0Asapcana>. Acesso em: 1 jan. 2016.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: [s.n.], 2003. 311 p. .8522433976.

MARIANO, Jorge. *Cana-energia, a revolução sucroenergética está começando*. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/variedades/especial-cana-energia-revolucao-sucroenergetica-201015/>.

MARIN, Fábio Ricardo. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira : estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. 262 p.

MARINO, Ericson. **14º Sba – A Usina da Superação - Visão Atualizada sobre a produção de vapor em Usinas e Destilarias**. [S.l: s.n.], 2013. 1-77 p. Disponível em: http://www.stab.org.br/seminario_14sba/07_ericson_30.pdf. .

MARJOTTA-MAISTRO, Marta Cristina; BURNQUIST, Heloisa Lee. *Avaliação do Fornecimento de Açúcar para as Indústrias Alimentícias do Estado de São Paulo: Uma Pesquisa de Mercado*. [S.l: s.n.], 1998

MARQUES, Fabrício. O mapa da cana. **Pesquisa FAPESP** p. 55–57 , 2012. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/08/22/o-mapa-da-cana/>.

MARQUES. Pedro Valentim. **Custos de Produção Agrícola e Industrial de Açúcar e Alcool no Brasil na safra 2007/2008**. Piracicaba: [s.n.], 2009.

MARQUESE, Rafael De Bivar. A dinâmica da escravidão no Brasil: resistência, tráfico negreiro e alforrias, séculos XVII a XIX. **Novos Estudos - CEBRAP** n. 74, p. 107–123 , 2006.0101-3300.

MARTINS, Eliseu. **Contabilidade de Custos**. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 376 p. .9788522459407.

MARTINS, Talita Mauad; MARTINELLI, Dante Pinheiro. Ciclos de previsão cíclica dos preços da commodities: um modelo de indicador antecedente para a commodity açúcar. **Revista de Administração, Contabilidade e Economia da FUNDACE** p. 1–12 , 2010.

MATSUNAGA, Minoru; *et al.* Metodologia de Custo de Produção Utilizada pelo IEA. **Agricultura em São Paulo - Boletim Técnico do Instituto de Economia Agrícola** p. 123–139 , 1976. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftpiea/rea/tomo1_76/artigo3.pdf>.

MCDONALD, Alan; SCHRATTENHOLZER, Leo. Learning rates for energy technologies. **Energy Policy** v. 29, n. 4, p. 255–261 , mar. 2001. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421500001221>>.

MEDINA, Ingrid Monteiro; NATEL, Andressa. *Bagaço de cana-de-açúcar: fonte alternativa de alimento*. Disponível em: <<https://www.milkpoint.com.br/radar-tecnico/ovinos-e-caprinos/bagaco-de-canadeacucar-fonte-alternativa-de-alimento-70151n.aspx>>. Acesso em: 1 jan. 2017.

MÉJEAN, Aurélie; HOPE, Chris. Modelling the costs of energy crops: A case study of US corn and Brazilian sugar cane. **Energy Policy** v. 38, n. 1, p. 547–561 , jan. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421509007332>>. Acesso em: 2 out. 2014.

MELO, André de Souza; SAMPAIO, Yony de Sá Barreto. Uma Nota Sobre o Impacto do Preço do Açúcar, do Etanol e da Gasolina na Produção do Setor Sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia** v. 70, n. 1, p. 61–69 , 2016. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0034-7140.20160004>>.

MENDES, Álvaro José Boareto; VALDMAN, Belkis; SOUZA JÚNIOR, Maurício Bezerra De. Uma revisão de modelagem matemática em bioprocessos. **Ciência e Tecnologia** p. 40–59 , 2011.

MENEGUELLO, Luiz Augusto; CASTRO, Marcus Cesar Avezum Alves De. O Protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local** v. 8, n. 1, p. 33–43 , mar. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/inter/v8n1/a04v8n1.pdf>>.

MENNER, William A. Introduction To Modeling And Simulation. **Johns Hopkins APL Technical Digest** v. 16, n. 1, p. 6–17 , 1995.

MEYER, Alan D. Adapting to Environmental Jolts. **Administrative Science Quarterly** v. 27, n. 4, p. 515–537 , 1982. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2392528>>.00018392.

MILANEZ, A. *et al.* O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política. **BNDES Setorial** p. 277–302 , 2012. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3508.pdf>.

MILLER, Luiz Carlos. *Tecnologia Agrícola para Exploração e Manejo Cultural da Cana-de-Açúcar*. Disponível em: <http://www.sigacana.com.br/c_TRATOS_CULTURAIS/3_Tratos_Culturais_da_Cana_de_Acucar.htm>.

MOHAMMADI BIDHANDI, Hadi *et al.* Development of a new approach for deterministic supply chain network design. **European Journal of Operational Research** v. 198, n. 1, p. 121–128, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.034>>.0377-2217.

MORAES, Marcelo Lopes De; BACCHI, Mirian Rumenos Piedade. Etanol Do início às fases. **Revista de Política Agrícola** v. XXIII, n. 4, p. 5–22, 2014.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias De. Indicadores do mercado de trabalho do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar do Brasil no período 1992-2005. **Estudos Econômicos** v. 37, n. 4, p. 875–902, dez. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-41612007000400007&lng=pt&tlng=pt>.

MOREIRA, Jose R; GOLDEMBERG, José. The alcohol program. **Energy Policy** v. 27, n. 4, p. 229–245, abr. 1999. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421599000051>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

NADEAU, Marie-Claude *et al.* A dynamic process-based cost modeling approach to understand learning effects in manufacturing. **International Journal of Production Economics** v. 128, n. 1, p. 223–234, nov. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527310002574>>. Acesso em: 2 out. 2014.

NADLER, G.; SMITH, W. D. Manufacturing Progress Functions for Types of Processes. **The International Journal of Production Research** v. 2, n. 2, p. 115–135, jan. 1963. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207546308947818>>.

NASTARI, Plínio Mário. **Análise de Custos e Competitividade Agrícola Fornecedores e Usinas**. São Paulo: [s.n.], 2014.8522403597.

NASTARI, Plínio Mário. **O Setor Brasileiro de Cana-de-açúcar Perspectivas de Crescimento Posição atual do Brasil em Açúcar e Alcool**. São Paulo: [s.n.], 2006.

NEIJ, Lena. Cost development of future technologies for power generation—A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. **Energy Policy** v. 36, n. 6, p. 2200–2211, jun. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421508001237>>. Acesso em: 16 jul. 2012.

NEIJ, Lena *et al.* **Experience Curves : A Tool for Energy Policy Assessment**. Lund, Sweden: Environmental and Energy Systems Studies - Lund University, 2003. 1-146 p. .9188360563.

NEVES, Marcos Fava *et al.* **A Dimensão do setor sucroenergético - Mapeamento e quantificação da safra 2013/14**. Ribeirão Preto: [s.n.], 2014.

NGUYEN, M. H.; PRINCE, R. G H. A simple rule for bioenergy conversion plant size optimisation: Bioethanol from sugar cane and sweet sorghum. **Biomass and Bioenergy** v. 10, n. 5–6, p. 361–365, 1996.0961-9534.

NORRMAN, Andreas; JANSSON, Ulf. Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management** v. 34, p. 434–456, 2004. ISSN: 0960-0035.

NOVACANA. *Álcoolduto ou etanolduto* 2015. Disponível em: <<https://www.novacana.com/tag/92-alcoolduto-ou-etanolduto/>>.

NOVACANA. *Custos de produção de cana e etanol e as novas tecnologias das usinas* 2007. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/evolucao-setor-melhorias-proporcionadas-pela-pd/>>.

NYKO, Diego *et al.* A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **BNDES Setorial** n. 37, p. 399–442, 2013. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3710.pdf>.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 788 p. .978-8576058106.

OLIVEIRA, Luís Manuel Botelho. **Curvas de experiência, alterações tecnológicas e vantagens competitivas**. ISCAL - Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Lisboa, 2012. 44 p.

OLIVEIRA, Marcos. Genética Doce. **Revista Pesquisa Fapesp** p. 1–2, 2007. Disponível em: <revistapesquisa.fapesp.br/2007/03/01/genetica-doce/>.

OLIVEIRA, Marli Dias Mascarenhas; NACHILUK, Katia. Custos da cana-de-açúcar em distintos sistemas de produção no estado de são paulo. **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil, desafios, crises e perspectivas**. Brasília: [s.n.], 2016. p. 315. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/160315_livro_quarenta_anos_etanol.pdf>. 978-85-7811-269-1.

OLIVEIRA, Ana Maria Soares De. **Reordenamento Territorial e Produtivo do Agronegócio Canavieiro no Brasil e os Desdobramentos para o Trabalho**. UNESP, 2009. 1-597 p.

OLIVÉRIO, José Luiz. *Fabricação Nacional de Equipamentos para a Produção de Alcool e Co-geração*. 2003, Rio de Janeiro: Dedini - Indústrias de Base, 2003. p.60.

PALOMINO, Josiane Mayara Gil; *et al.* A Expansão da Cana-de-Açúcar e o Impacto sobre a Arrecadação Fiscal dos Municípios Paulistas. **XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural** p. 5–7, 2008.

PAN, Feng; NAGI, Rakesh. Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. **Computers and Operations Research** v. 37, n. 4, p. 668–683, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.017>>.0305-0548.

PARK, Sukun; LEE, Tae-Eog; SUNG, Chang Sup. A three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review** v. 46, n. 5, p. 563–581, 2010. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.004>>.13665545.

PAULI, Daniel Gustavo De. **Planejamento da qualidade do plantio mecanizado de cana-de-açúcar**. USP, 2009. 79 p.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: Fechamento da safra 2013/2014**. Piracicaba: [s.n.], 2014.

PECK, Helen. Drivers of supply chain vulnerability: an integrated framework. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management** v. 35, n. 4, p. 210–232 , abr. 2005. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/09600030510599904>>.

PERDONÁ, Rogério C. **Aproveitamento Energético de Resíduos e Biomassa** Odebrecht Agroindustrial. [S.l: s.n.], 2013. 1-30 p. .

PEREZ, Luís Henrique; TORQUATO, Sérgio Alves. Evolução das exportações brasileiras de açúcar, 1996 a 2004. **Informações Econômicas** v. 36, n. 1, p. 43–60 , 2006.

PES. **Resumo das Fórmulas de Rendimento e Eficiência Utilizadas na Indústria Açucareira do Brasil** PIRACICABA ENGENHARIA SUCROALCOOLEIRA. Piracicaba: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://piracicabaengenharia.com.br/2017/resumo-das-formulas-de-rendimentos-e-eficiencia-utilizadas-na-industria-acucareira-do-brasil/>>.

PESTANA RAMOS, Fábio. **No Tempo das Especiarias**. 4. ed. São Paulo: [s.n.], 2004. 287 p. .9788572444927.

PETTIT, Timothy J.; CROXTON, Keely L.; FIKSEL, Joseph. Ensuring Supply Chain Resilience: Development and Implementation of an Assessment Tool. **Journal of Business Logistics** NULL, v. 34, n. 1, p. 46–76 , mar. 2013.

PETTIT, Timothy J.; FIKSEL, Joseph; CROXTON, Keely L. Ensuring Supply Chain Resilience: Development of a Conceptual Framework. **Journal of Business Logistics** v. 31, n. 1, p. 1–21 , mar. 2010. Disponível em: <<http://0-search.proquest.com.athenea.upo.es/abicomplete/docview/193870596/C6533BE8BE80403FPQ/4?accountid=14695>>.

PIACENTE, Erik Augusto. **Perspectivas do Brasil no Mercado Internacional de Etanol**. Unicamp, 2006. 189 p. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000380548&fd=y>>.

PICHINELLI, Beatriz Cestaro. **Visão Geral do “ Manual de Conservação e Reúso de Água na Agroindústria Sucroenergética ”**. Universidade Estadual Paulista, 2013. 31 p.

PONIS, Stavros T; KORONIS, Epaminondas. Supply Chain Resilience : Definition of Concept and its Formative Elements. **The Journal of Applied Business Research** v. 28, n. 5, p. 921–930 , 2012.

PONOMAROV, Serhiy Y.; HOLCOMB, Mary C. Understanding the concept of supply chain resilience. **The International Journal of Logistics Management** v. 20, n. 1, p. 124–143 , 2009.0957409091095.

PORTER, Michael E. **Competitive strategy: Techniques for analyzing industries and companies**. New York: Free Press, 1980. 397 p. Disponível em: <<http://www.vnseameo.org/ndbmai/CS.pdf>>. 0-684-84148-7.

POSTAL, Andréia Camargo Marques. **Acesso à Cana-de-Açúcar na Expansão Sucroenergética Brasileira do pós 2000: O Caso de Goiás**. Unicamp, 2014. 157 p.

POWLEY, Edward H. Reclaiming resilience and safety: Resilience activation in the critical period of crisis. **Human Relations** v. 62, n. 9, p. 1289–1326, 2009.0018-7267.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar De. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª ed. Novo Hamburgo: [s.n.], 2013. 276 p. .

PROMON. *Usina Termelétrica Barra Bioenergia – Fase I*. Disponível em: <[promonengenharia.com.br /pt-br/projetos/Paginas/usina-termeletrica-barra-bioenergia-fase-1.aspx](http://promonengenharia.com.br/pt-br/projetos/Paginas/usina-termeletrica-barra-bioenergia-fase-1.aspx)>.

QUEIROZ, Saulo de Tarso Prado. **Usinas de álcool – fatores influentes no processo de escolha da localização de novas unidades**. Universidade de Brasília, 2008. 150 p.

RAMOS, Pedro. Financiamentos Subsidiados e Dívidas de Usineiros no Brasil: uma História Secular e... atual? **História Econômica & História de Empresas** v. 14, n. 2, p. 7–32, 2011.

RAMOS, Pedro. Situação atual, problemas e perspectivas da agroindústria canavieira de São Paulo. **Informações Econômicas** v. 29, n. 10, p. 9–24, 1999.

RAMOS, Rômulo Pimentel. **Modelo Matemático para custo e energia na produção de açúcar e álcool**. UNESP, Botucatu, 2010. 72 p.

RAMOS DA SILVA, João Eduardo Azevedo; ALVES, Maria Rita Pontes Assumpção; COSTA, Miguel Antonio Bueno Da. Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. **Gestão & Produção** v. 18, n. 1, p. 73–90, 2011.

RAUPP, Fabiano Maury; BEUREN, Ilse Maria. Metodologia da pesquisa aplicável às ciências sociais. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática**. [S.l: s.n.], 2003. p. 76–97.

REGAZZINI, Leonardo Coviello. **A tributação no setor sucroenergético do estado de São Paulo**. 2008. 1-117 p.

RESILIENCE. *In Merriam-Webster's collegiate dictionary*. Disponível em: <<https://www.merriam-webster.com/dictionary/resilience>>. Acesso em: 2 mar. 2017.

REZENDE. Amaury José; NAKAO. Silvio Hiroshi; ABRÃO. Gustavo. **Estudo sobre a carga tributária dos combustíveis: CIDE, PIS, COFINS, ICMS e ICMS Sub. Tributária**. Ribeirão Preto: NÚCLEO DE ESTUDOS EM CONTROLADORIA E CONTABILIDADE TRIBUTÁRIA, 2011.

RICE, James B; CANIATO, Federico. Building a secure and resilient supply network.

Supply Chain Management Review v. 7, n. 5, p. 22–30 , 2003.15219747.

RICO, Julieta Andrea Puerto. **Programa de biocombustíveis no brasil e na colômbia: uma análise da implantação, resultados e perspectivas**. USP - Universidade de São Paulo, 2007. 1-194 p.

RIPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; *et al.* **Plantio de Cana-de-Açúcar: Estado da Arte**. 2. ed. rev ed. Piracicaba: [s.n.], 2011. 198 p. .85-904440-2-3.

RODRIGUES, Maria Cecília Prates. Subsídios de equalização de custos ao açúcar e álcool. **Revista Brasileira de Economia** v. 40, n. 3, p. 285–295 , 1986. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbe/article/viewArticle/369>>.

ROMMERS, Gerardus M *et al.* Mobility of people with lower limb amputations: scales and questionnaires: a review. **Clinical Rehabilitation** v. 15, n. 1, p. 92–102 , fev. 2001. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1191/026921501677990187>>.0269-2155.

ROSSETTO, Raffaella; SANTIAGO, Antonio Dias. *Cana-de-Açúcar: Adubação - resíduos alternativos*. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana?de?acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html 1/3>.

ROSSETTO, Raffaella; SANTIAGO, Antonio Dias. *Plantio da cana-de-açúcar*. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe3djg2152.html>>.

SACHS, Raquel Castellucci Caruso. Remuneração da tonelada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Informações Econômicas** v. 37, n. 2, p. 55–66 , 2007. Disponível em: <[http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/ie/2007/pag 55-66.pdf](http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/ie/2007/pag%2055-66.pdf)>.

SALEMA, Maria Isabel Gomes; BARBOSA-POVOA, Ana Paula; NOVAIS, Augusto Q. Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. **European Journal of Operational Research** v. 203, n. 2, p. 336–349 , 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.002>>.0377-2217.

SAMUELS, J. M; WILKES, F. M.; BRAYSHAW, R. E. **Management of company finance**. 6th. ed. London: Chapman and Hall, 1998. 1040 p. .18615222909781861522290.

SANTOS, Adailson da Silva; VALLE, Maria Letícia Murta; GIANNINI, Roberto Gomes. Adição de Compostos Oxigenados na Gasolina e a Experiência do Proálcool. **Economia & Energia** v. Março, n. 19, p. 1–4 , 2000. Disponível em: <<http://www.ecen.com/eee19/composxi.htm>>.

SANTOS, Maurinho Luiz dos; LÍRIO, Viviani Silva;; VIEIRA, Wilson da Cruz. **Microeconomia Aplicada**. 1. ed. [S.l.]: Independente, 2009. 649 p. .9788560249282.

SANTOS, Gesmar Rosa Dos; GARCIA, Eduardo Afonso; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. A crise na produção do etanol e as interfaces com as políticas públicas. **Radar - IPEA Radar da crise**, v. 39, n. 1994, p. 27–38 , 2015.

SANTOS, Joaquim Rocha Dos. **A indústria da cana-de-açúcar: uma análise sob a perspectiva da dinâmica de sistemas**. Universidade de São Paulo, 2012. 323 p.

SANTOS, Joaquim Rocha Dos *et al.* Renewable Energy: a Framework To Model a Brazilian Case of Success (Part I). **Proceedings of the 27th International Conference of the System Dynamics Society** n. Part I, p. 1–17 , 2009. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2009/proceed/papers/P1245.pdf>>.

SANTOS, C. V. **Política Tributária, Nível de Atividade Econômica e Bem-estar. Lições de um Modelo de Equilíbrio Geral Inter-regional**. Universidade de São Paulo, 2006. 140 p.

SÃO PAULO. *Protocolo de Cooperação que celabram entre si, o Governo do Estado de São Paulo, a Secretaria de Estado do Meio Ambiente, a Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo para a adoção de ações desti* . [S.l: s.n.]. , 2007

SARK, W.G.J.H.M. Van. Introducing errors in progress ratios determined from experience curves. **Technological Forecasting and Social Change** v. 75, n. 3, p. 405–415 , mar. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162507000856>>. Acesso em: 2 out. 2014.

SCARPINELLA, Gustavo; MIRANDA, Renato; MAUAD, Frederico. Carreadores da cultura da cana-de-açúcar : vantagens e desvantagens do tratamento do subleito. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** n. 29, p. 87–97 , 2013.

SCAVARDA, Luiz Felipe *et al.* Supply Chain Resilience Analysis : a Brazilian Automotive Case. **RAE - Revista de Administração de Empresas** v. 55, p. 304–313 , 2015.00347590.

SCHWAAB, Marcio; PINTO, José Carlos. **Análise de Dados Experimentais I**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2007. 462 p. .8576501368.

SCHWARTZ, Stuart B. **Segredos Internos Engenhos e escravos na sociedade colonial, 1550-1635**. São Paulo: Companhia das Letras, 1988. 474 p. .85-7164-017-2.

SEABRA, Joaquim Eugênio Abel. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Unicamp, 2008. 298 p. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000446190>>.

SEGATO, Sivelena Vanzolini; PINTO, Alexandre de Sene; JENDIROBA, Eloisa. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: [s.n.], 2006. 416 p. .8560409017.

SEN, Wang; POKHAREL, Shaligram; YULEI, Wang. Supply chain positioning strategy integration, evaluation, simulation, and optimization. **Computers and Industrial Engineering** v. 46, n. 4 SPEC. ISS., p. 781–792 , 2004.0360-8352.

SENNA, Henrique. **Análise Técnico Econômica de Unidades Geradoras de Energia Distribuída**. USP, 2011. 96 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-26012012-150252/publico/2011MotaAnalise.pdf>>.

SHEFFI, Yossi. **The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage**. [S.l: s.n.], 2005. .0-262-69349-6.

SHEFFI, Yossi; RICE, James B. A supply chain view of the resilient enterprise. **MIT Sloan Management Review** p. 41–48 ,2005

SHEPHERD, William G.; SHEPHERD, Joanna M. **The economics of industrial Organization**. 5th. ed. [S.l.]: Waveland Press, 2003. 440 p. .9781577664864.

SHIKIDA, Pery Francisco Assis; PEROSA, Bruno Benzaquen. Álcool Combustível no Brasil e Path Dependence. **Revista de Economia e Sociologia Rural** v. 50, n. 2, p. 242–262 , 2012.

SHUKLA, Sanjay Kumar *et al.* Optimization of the supply chain network: Simulation, Taguchi, and Psychoclonal algorithm embedded approach. **Computers and Industrial Engineering** v. 58, n. 1, p. 29–39 , 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.016>>.0360-8352.

SILVA, Fábio César Da; BERGAMASCO, Alessandra Fabíola; VENDITE, Laércio Luís. Simulation Models To Analysis an Support Decision in Agrisystems. **Revista Biociências** v. 8, n. 2, p. 12 , 2008.

SILVA. João Paulo Nunes Da; SILVA. Maria Regina Nunes Da. **Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar**. Inhumas: [s.n.], 2012.

SILVA, José Severino Da *et al.* O processo de contabilização dos custos de implantação da cana-de-açúcar na Miriri Alimentos e Bioenergia S/A. **XXI Congresso Brasileiro de Custos** p. 14 , 2014. Disponível em: <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3760>>.

SILVA. Luís César Da. **Modelagem e Simulação: Simulação de Processos**. Vitória: [s.n.], 2005. Disponível em: <<http://www.agais.com/simula.htm#T2>>.

SILVA. Luís César Da. **Verificação, Validação e Experimentação com Modelos de Simulação**. [S.l: s.n.], 2006.

SILVA, Marcos Noé Pedro Da. *Área sob uma Curva*. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/matematica/area-sob-uma-curva.htm>>.

SILVAS FILHO, D'. *Abreviatura Mt.p.ano* 2006. Disponível em: <<https://ciberduvidas.iscte-iul.pt/consultorio/perguntas/abreviatura-mtpano/18510>>.

SILVEIRA, André Mascia. **A relação entre os preços de açúcar nos mercados domésticos e internacional**. USP/Piracicaba, 2004. 89 p. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/andre_000fxg6qcvd02wyiv80soht9hz7yn0u6.pdf>.

SILVÉRIO, Renan Pinheiro. **Avaliação do Impacto dos Veículos Flex na Elasticidade-Preço da Demanda por Etanol no Estado do Rio de Janeiro entre 2001 e 2007**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. 54 p.

SÍNÍCIO, Marcos Fernandes; VALDIR BAJAY, Sergio. Otimização do uso de energético

nas usinas sucro - alcooleiras. **Revista Brasileira de Energia** v. 2, n. 2, p. 1–18 , 1992.

SIQUEIRA, Paulo Henrique De Lima; JUNIOR, Luiz Gonzaga De Castro. Fusões e aquisições das unidades produtivas e da agroindústria de cana-de-açúcar no Brasil e nas distribuidoras de álcool hidratado etílico. **Revista de Economia e Sociologia Rural** v. 48, p. 709–735 , 2011.

SOMERS, Scott. Measuring Resilience Potential: An Adaptive Strategy for Organizational Crisis Planning. **Journal of Contingencies and Crisis Management** v. 17, n. 1, p. 12–23 , mar. 2009.

SOUZA, João Gabriel de Moraes; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. Variações no preço do etanol em comparação ao preço da gasolina: uma análise da resposta do consumidor. **Radar - IPEA** n. 39, p. 59–67 , 2015.

SOUZA, Maria das Graças de; *Origem da Cana-de-Açúcar*. Disponível em: <<http://www.sitedacachaca.com.br/origem-da-cana-de-acucar/>>.

SOUZA, Zilmar José De. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação**. Universidade Federal de São Carlos, 2003. 278 p.

SOUZA, Zilmar José De. *País terá 10 mil MW de bioenergia até 2020* . São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<http://jornalgnn.com.br/blog/luisnassif/investimentos-em-inovacao-no-setor-de-energia>>. , 2010

SOUZA, Zilmar José De; AZEVEDO, Paulo Furquim De. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural** v. 44, n. 2, p. 21 , 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032006000200002&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

STARR, Randy; NEWFROCK, Jim; DELUREY, Michael. Enterprise Resilience: Managing Risk in the Networked Economy. **Strategy + Business** n. 30, p. 1–10 , 2003.

STATCAMP. *Coeficiente de Determinação*. Disponível em: <portalaction.com.br/analise-de-regressao/16-coeficiente-de-determinacao>. Acesso em: 1 jan. 2017.

STAW, Barry M; SANDELANDS, Lance E; DUTTON, Jane E. Threat-Rigidity Effects in Organizational Behavior: A Multilevel Analysis Barry M . Staw , Lance E . **Administrative Science Quarterly** v. 26, n. 4, p. 501–524 , 1981.

STEINLE, Luis Antonio. **Fatores que Interferem na Fermentação Alcolica**. Universidade Federal de São Carlos, 2013. 58 p. Disponível em: <<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A009>>.

STESSE, Dérek. Conceito de automação de moenda adotado na Usina Trapiche, com uso da velocidade linear. **Artigos Técnicos - SMAR** , 2011. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index181.html>>.

STEVENSON, Mark; SPRING, Martin. Flexibility from a supply chain perspective: definition and review. **International Journal of Operations & Production**

Management v. 27, n. 7, p. 685–713, 2007. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/01443570710756956>>.0144357071075.

STUTTERHEIM, Peter. **An integrated supply chain model framework: Development and Demonstration**. University of KwaZulu-Natal, 2006. 124 p.

SUTCLIFFE, Kathleen; VOGUS, Timothy. Organizing for Resilience. **Positive Organizational Scholarship**. San Francisco: Berrett-Koehler, 2003. 9 v. p. 26–30. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1541461211001819>>. 1-57675-232-1.

TANG, Christopher S. Perspectives in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics** v. 103, n. 2, p. 451–488, out. 2006a. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527306000405>>.

TANG, Christopher S. Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. **International Journal of Logistics** v. 9, n. 1, p. 33–45, 2006b. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13675560500405584>>.1367556050040.

TANG, Christopher S.; TOMLIN, Brian. The power of flexibility for mitigating supply chain risks. **International Journal of Production Economics** v. 116, n. 1, p. 12–27, nov. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527308002181>>.

TAPS, S B; STEGER-JENSEN, K. Aligning supply chain design with manufacturing strategies in developing regions. **Production Planning & Control** v. 18, n. 6, p. 475–486, set. 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09537280701495021>>.

TATIZANA, Sergio Augusto. **Um modelo conceitual de simulação da produção de gado de corte**. USP, 1995. 95 p.

TAVARES, Rafaela. *Colheita mecanizada está em quase 100 % da produção regional cana-de-açúcar*. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1152115>>. Acesso em: 1 jan. 2017.

THOMSON. **Contabilidade Gerencial**. [S.l: s.n.], 2007.

THUN, Jörn-Henrik; DRÜKE, Martin; HOENIG, Daniel. Managing uncertainty – an empirical analysis of supply chain risk management in small and medium-sized enterprises. **International Journal of Production Research** v. 49, n. 18, p. 5511–5525, 15 set. 2011. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2011.563901>>.

TIEGO, Rodolfo. *Alternativa para possíveis crises energéticas, cogeração com bagaço da cana-de-açúcar chega a 30 anos*. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1152132>>.

TIWARI, M. K. *et al.* A Hybrid Taguchi-Immune approach to optimize an integrated supply chain design problem with multiple shipping. **European Journal of Operational Research** v. 203, n. 1, p. 95–106, 2010. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.004>>.0377-2217.

TOGNETTI. Eduardo Stockler; FIORILLO. David. **Controle de Processos : Definições e terminologias**. Brasília: [s.n.], 2015.

TOWNSEND. Claudio Ramalho; **Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia**. Porto Velho: [s.n.], 2000. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Rt_21_000fkv0qne702wyiv80sq98yqvmh7ouy.PDF>.

TUKAMUHABWA, Benjamin R. *et al.* Supply chain resilience: definition, review and theoretical foundations for further study. **International Journal of Production Research** v. 53, n. 18, p. 5592–523 , 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2015.1037934>>.0020-7543.

UDOP. *A lavoura da cana-de-açúcar* 2012. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=988>>.

UNICADATA. *Cana-de-açúcar de 1980/1981 a 2016/2017* 2017. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>>.

URCIUOLI, Luca *et al.* The resilience of energy supply chains: a multiple case study approach on oil and gas supply chains to Europe. **Supply Chain Management: An International Journal** v. 19, n. 1, p. 46–63 , 7 jan. 2014. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/SCM-09-2012-0307>>.

USJ. *Formas de pagamento*. Disponível em: <usj.com.br/parceiros_pagamento.html>. Acesso em: 1 jan. 2017.

VALUE BASED MANAGEMENT. **Summary of the Experience Curve Effect**. [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <http://www.valuebasedmanagement.net/methods_experience_curve_effects.html>.

VASCONCELOS; BARRETO, Thales Velho; COÊLHO, Antônio Carlos Duarte. Fermentação etanólica e Destilação. **Cana-de-Açúcar - Bioenergia, Açúcar e Etanol - 2ª edição**. Viçosa: Editora UFV, 2009. p. 407–463. 9788560249398.

VEIGA, José Eduardo Rodrigues; YOSHII, Regina Junko. Açúcar: subsídios, até quando? **Informacoes Economicas - Instituto de Economia Agrícola** v. 20, n. 1, p. 17–24 , 1990. Disponível em: <<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=135103>>.

VIDAL, Maria de Fátima; SANTOS, José Ailton Nogueira Dos; SANTOS, Marco Antonio Dos. Setor Sucroalcooleira no nordeste brasileiro: estruturação da cadeia produtiva, produção e mercado. **XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural – SOBER** p. 1–18 , 2006.

VON BERTALANFFY, Ludwig. **Teoria Geral dos Sistemas**. Petrópolis: [s.n.], 1973. 351 p. .

WAACK, Roberto Silva; NEVES, Marcos Fava; MORAES, Silvia. Grupamentos estratégicos nas usinas de açúcar e álcool. **XXXVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural – SOBER** p. 1–14 , 1998. Disponível em: <http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/pdf100_000fxgevorb02wyiv80soht9hjwvqgc.pdf>.

WIT, Marc De *et al.* Competition between biofuels : Modeling technological learning and cost reductions over time. **Biomass and Bioenergy** v. 34, n. 2, p. 203–217 , 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.07.012>>.

WRIGHT, T. P. Factors Affecting the Cost of Airplanes. **Journal of the Aeronautical Sciences (Institute of the Aeronautical Sciences)** v. 3, n. 4, p. 122–128 , 1936.

XAVIER, C. E. O. et al. **Custos de Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil**. Piracicaba: [s.n.], 2009.

XIAO, Renbin; YU, Tongyang; GONG, Xiaoguang. Modeling and Simulation of Ant Colony's Labor Division with constraints for task allocation of Resilient Supply Chains. **International Journal on Artificial Intelligence Tools** v. 21, n. 3, p. 1240014 , jun. 2012. Disponível em: <<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218213012400143>>.0218213012400.

YAO, Yuan; MEURIER, Beatrice. Understanding the supply chain resilience: a Dynamic Capabilities approach. **Proceedings of 9th International meetings of Research in Logistics 2012** p. 1–17 , 2012.

YEH, Sonia; RUBIN, Edward S. A review of uncertainties in technology experience curves. **Energy Economics** v. 34, n. 3, p. 762–771 , maio 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988311002805>>. Acesso em: 24 set. 2014.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. 2^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205 p. .85-7307-852-9.

YU, Abraham Sin Oih; PIZYSIEZNIG, J.; FONSECA, M. A. S. Long Range Forecast of Alcohol Production Cost with Technical Progress. **8th International Symposium on Alcohol Fuels** p. 1117–1123 , 1988. Disponível em: <https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/625377>.

YUE, Dajun; YOU, Fengqi; SNYDER, Seth W. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. **Computers & Chemical Engineering** v. 66, p. 36–56 , jul. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098135413003670>>. Acesso em: 23 maio 2014.

ZOBEL, Christopher W *et al.* Characterizing Disaster Resistance and Recovery using Outlier Detection. **Proceedings of the 9th International ISCRAM Conference - Vancouver, Canada, April 2012** n. April, p. 1–5 , 2012.

ZOBEL, Christopher W. Comparative Visualization of Predicted Disaster Resilience. **7th International Conference on Information Systems for Crisis Response and**

Management - ISCRAM 2010, 2010. Disponível em: <<http://www.iscram.org/ISCRAM2010/Papers/191-Zobel.pdf>>.

ZOBEL, Christopher W. Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience. **Decision Support Systems** v. 50, n. 2, p. 394–403, 2011a.0167-9236.

ZOBEL, Christopher W. Representing the Multi-Dimensional Nature of Disaster Resilience. **Proceedings of the 8th International ISCRAM Conference** p. 1–5, 2011b.

ZSIDISIN, George A.; WAGNER, Stephan M. Do Perceptions Become Reality? The Moderating Role of Supply Chain Resiliency on Disruption Occurrence. **Journal of Business Logistics** v. 31, n. 2, p. 1–20, set. 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00140.x>>.

ZYLBERSZTAJN, Decio; FAVA NEVES, Marcos. **Economia & Gestão dos Negócios Agroalimentares**. [S.l: s.n.], 2000. .

APÊNDICE I

Cálculos de Cogeração

A- Usina Catanduva, com adaptações [12 Mw] - 21 bar

12 Mw total

10 Mw consumo próprio

2 Mw excedente

$2.4320 \rightarrow 8.640 \text{ Mwh/s } (2,32 \times 10^6) = 0,00372$

Energia excedente por hora = R\$ 3,72 kWh/t

Receita média por tonelada $0,00372 \text{ MWh} \times \text{R\$ } 169,9 \rightarrow \text{R\$ } 0,63/\text{t}$

21 bar – 300 C

$\text{R\$ } 25.10^6 \text{ IGPD } 30.12.2013 \rightarrow \text{R\$ } 35,85 \times 10^6 \rightarrow \text{R\$ } 314,05 \times 10^6 > \text{R\$ } 35,85 \times 10^6$

B – Usina Cosan/Raízen – Ibaté, com adaptação - 45 bar

Temperatura: 410 c

Pressão: 42

C ano de início da operação 2002

Energia excedente média por hora 11,17 kWh/t

18 Mw total

10 Mw consumo próprio

8 Mw excedente médio

$8\text{Mw} \times 4320 \text{ h} \rightarrow 34560 \text{ Mwh/s} / (2,32 \times 10^6 \text{ t/s}) = 0,01490 \text{ Mwh}$

$0,01490 \text{ Mwh} \times \text{R\$ } 169,9 = \text{R\$ } 2,53 \text{ t}$

Receita média por tonelada R\$ 2,53

$2,4 \text{ tc/s } 01 \text{ } 2003 \rightarrow \text{R\$ } 160.10^6 (2,16 \text{ tc/s}) \text{ IGPD } \rightarrow 30.12.2013 \text{ R\$ } 314,05 \times 10^6$

C – Usina de Cerradinho, fabricante Dedini - 65 bar

Caldeiras: tipo: sistemas de cogeração a Bagaço de Cana

$150 \text{ tv/h} \times 1 \text{ xtb}/2,27 \text{ tv}$ aproximadamente $66,1 \text{ tb/h} \times 4320 \text{ h/s} = 285.462,6 \text{ tb/s} \times 1 \text{ x tc}/(0,28) \text{ tb} = 1,02 \times 10^6 \text{ tc/s} \rightarrow 5,67 \times 10^3 \text{ tc/d}$

62 bar: 450c ano 2001

1 Processamento de cana: $5,67 \times 10^3 \text{ tc/d} = 1,02 \times 10^6$

2 Processamento de bagaço = 285.600 tb/s

3 $5,67 \times 10^3 \text{ tc/d}$; $450 \cdot 10^3 \text{ l/d}$; 79,4 l

Usina: 3 caldeiras, 63 bar, 450 C, $2,32 \times 10^6 \text{ tc/s}$; $14,3 \times 10^3 \text{ tc/d}$; 662.592 tb/s; $1,06 \times 10^6 \text{ l/d}$; 79,4 l/tc

Produção

E. Elétrica Total 41MW, próprio 16 MW (p.78)

Excedente 25 MW $\rightarrow 20,37 \text{ Mwh/h} \rightarrow$ média 30.06.13 $\rightarrow$

p.4 resultados: $572,5 \times 10^3 \text{ Mwh} = 190,8 \times 10^3 \text{ Mwh/mês}$

$190,8 \times 10^3 \text{ Mwh/mês} / 13 \text{ usinas} \times 30 \text{ dias} \times 24 \text{ h} = 20,37$

Preço por tonelada de cana: $20,37 \text{ Mwh/h} \times 4320 \text{ h} \rightarrow 81.998,4 / 2,32 \cdot 10^6 \text{ tc}$

R\$ 169,9 $\rightarrow$ R\$ 6,44/lc

Investimentos nas Usinas

100 Bar – 540 c R\$ $518,82 \cdot 10^6$

Média ponderada = $518,82 \cdot 10^6 \text{ R\$}$

$2,32 \text{ tc/s} (266,22 \text{ R\$} + 851,92 \text{ R\$} / 5) \times 10^6$

10^6 tc/s

30.11.2012 $\rightarrow$ R\$ $250 \cdot 10^6$

30.12.2013 $\rightarrow$ R\$ $266,22 \cdot 10^6$

IGP-DI

4.10^6 tc/s; 30.11.2012 -> R\$ 800.10^6

30.12.2012

Capacidade 150 toneladas de bagaço úmido (280kg/tonelada)/h

Equivalencia em tonelada de cana = $536 \times 24 \times 30 \times 6$ (150/0,28)(4320 horas) = $2,32.10^6$ ton/s

A3 – Pressão/temperatura = 62 bar/450 c

A4 – Ano de fabricação (entrada de operação) 2001

Energia Elétrica excedente por hora – média em 30/06/12 – 20/06/2013

20,37 Mwh/h

$572,5 \times 10^3$ Mwh/ 3 meses -> $13.3.30.24 = 20,37$

Relatório de resultados 28.080 (RAIZEN)

Raízen 1T'14

Preço obtido pela energia por tonelada de cana = R\$ 6,44

$20,37 \text{ Mwh/h} \times 24 \times 30 \times 6$ ($87.998,4 \text{ Mwh/s} / 2,32 \times 10^6 \text{ ton/s}$) = $0,03793 \text{ Mwh/ton}$

$0,03793 \text{ Mwh/t} \times \text{R\$ } 169,9 = 6,44 \text{ R\$/tc}$

$2,4 \text{ tc/s}$ 01.01.2008 -> R\$ 56.10^6 IGPD -> 30.12.2013 -> R\$ $80,31 \times 10^6$

Valor da usina a considerar = R\$ $394,36 \times 10^6$

R\$ $314,05 \times 10^6 + \text{R\$ } 80,31 \times 10^6$

D – Usina Barra, Univalem, Ipuacu - 100 bar

B1 – Pressão caldeira = 100 bar / 540 c

B2 – Ano de fabricação 2012

B3 – Energia Elétrica excedente por hora –

$400 \times 10^3 \text{ MWh}$ ($3 \times 6 \times 30 \times 24$) = $30,86 \text{ Mw/h}$

APÊNDICE II

Equações para construção do Gráfico 07, resiliência na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

n	X_n	Y_n	Equação
A	1	3	Ex.: $Y = 11 - 8X$
B	2	-5	
1	1998	0,1622	1) $Y = 429,7322 - 0,215X$
2	1999	-0,0528	2) $Y = -147,3791 - 0,0737X$
3	2000	0,0209	3) $Y = 24,2209 - 0,0121X$
4	2001	0,0088	4) $Y = -238,1102 - 0,119X$
5	2002	0,1278	5) $Y = -457,9298 - 0,2288X$
6	2003	0,3566	6) $Y = 702,8087 - 0,3507X$
7	2004	0,0059	7) $Y = -467,9281 - 0,2335X$
8	2005	0,2394	8) $Y = -13,5951 - 0,00689X$
9	2006	0,2463	9) $Y = 244,3765 - 0,1217X$
10	2007	0,1246	10) $Y = 199,219 - 0,0992X$
11	2008	0,0254	11) $Y = 128,1358 - 0,0638X$
12	2009	-0,0384	12) $Y = -401,2357 - 0,1997X$
13	2010	0,1613	13) $Y = 141,8663 - 0,0705X$
14	2011	0,0908	14) $Y = 85,1561 - 0,0423X$
15	2012	0,0485	15) $Y = -14,2367 - 0,0071X$
16	2013	0,0556	16) $Y = -282,9722 - 0,1406X$
	2014	0,1962	

Tabela 10 – Equações para criação do gráfico de Resiliência na Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar

Fonte: o autor

APÊNDICE III

Gráfico 08 – Evolução do Volume de Etanol (m³/ano)

Fonte: MAPA (2012); ANP (2016)

Gráfico 09 – Evolução do Volume de Cana-de-Açúcar (t/ano)

Fonte: MAPA (2012); Unacadata (2017)

Gráfico 10 – Evolução do Volume de Produção de Açúcar (t/ano)

Fonte: MAPA (2012); Unacadata (2017)

Gráfico 11 – Evolução da Área Plantada de Cana-de-Açúcar (ha/ano)

Fonte: MAPA (2012); MAPA (2015)

Gráfico 12 – Distribuição do volume de ATR – Açúcar e Etanol (%)

Fonte: MAPA (2012); MAPA (2015)

Gráfico 13 – Evolução do Volume de ATR por tonelada de Cana-de-Açúcar/ano

Fonte: MAPA (2012); MAPA (2015)

APÊNDICE IV

Usinas utilizadas na construção do modelo³⁰

21 bar

Usina Catanduva – 21 bar – Ariranha/SP – 12 Mw

45 bar

Usina Santa Cândida – 45 bar – Bocaina/SP – 29 Mw

Usina Serra – 45 bar – Ibaté/SP – 18 Mw

65 bar

Usina Cerradinho – 65 bar – Catanduva/SP – 41 Mw

Usina Santa Isabel – 65 bar – Mendonça/SP – 40 Mw

Usina Santa Isabel – 65 bar – Novo Horizonte/SP – 39 Mw

Usina São Martinho – 65 bar – Pradópolis/SP – 113 Mw

Usina Univalem – 65 bar – Val Paraíso/SP – 45 Mw

100 bar

Usina Barra Bioenergia – 100 bar – Barra Bonita/SP – 64 Mw

Usina Jataí - 100 bar – Jataí/GO – 105 Mw

Univalem – 100 bar - Val Paraíso/SP – 70 Mw³¹

³⁰ As pressões utilizadas são aproximações, uma vez que uma usina pode ter mais de um tipo de caldeira.

³¹ A Usina Univalem passou por um processo de *retrofit* e se utilizou dos dados anteriores e posteriores à mudança.

APÊNDICE V

Implantação, Reativação e fechamento de usinas da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil.

Observe os dois gráficos. É elucidativo o fluxo de implantação, reativação e fechamento de unidades produtoras entre 2005/2006 e 2015/2016. O número de novas unidades vinha em crescimento, porém em 2008, se apresentou o início de uma série de fechamentos de usinas de cana-de-açúcar no Brasil, afetando negativamente a capacidade instalada. As informações disponíveis não diferenciam um fechamento do tipo desativação, o qual pode ser reativado, de um fechamento completo.

Gráfico 14 – Entrada, Fechamento e Reativação de Usinas

Fonte: Duarte e Rizzardo (2015); EPE (2015)

APÊNDICE VI

Usina padrão em porcentagem/ano.

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
21 bar	30	29	28	27	26	25	25	25	25	24	23	22	21	19	18	17	16
45 bar	50	50	50	50	50	50	50	50	49	48	48	47	45	45	44	43	42
65 bar	20	21	22	22	23	24	24	24	25	27	28	30	30	30	30	30	30
100 bar	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	6	8	10	12
Total em %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabela 11 – Usina Padrão em porcentagem/ano

Fonte: o autor

O Prof. Dr. Henrique Senna atua na área de administração de empresas e gestão empresarial, com ênfase na área de Gestão de Produção e Operações. Possui experiência em estudos de viabilidade técnica e econômica, análise de investimentos, análise de projetos, tomada de decisão, estratégia, modelagem e simulações, principalmente ligadas a área de energia, etanol e cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Atualmente é doutor em Administração pela Faculdade de Economia e Administração (FEA/USP) e professor na FIA (Fundação Instituto de Administração). Mestre pelo IPEN/USP. Bacharel em Administração pela FEA/UFJF. Técnico Industrial pelo COLTEC/UFMG.

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/0701611581056779>

e-mail: ricosenna@gmail.com