



TEREZINHA DE FÁTIMA CARDOSO

**AVALIAÇÃO SOCIOECONÔMICA E AMBIENTAL DE
SISTEMAS DE RECOLHIMENTO E USO DA PALHA DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

**CAMPINAS
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

TEREZINHA DE FÁTIMA CARDOSO

**AVALIAÇÃO SOCIOECONÔMICA E AMBIENTAL DE
SISTEMAS DE RECOLHIMENTO E USO DA PALHA DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Máquinas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA TEREZINHA DE FÁTIMA CARDOSO E ORIENTADA PELO PROF. DR. LUIS AUGUSTO BARBOSA CORTEZ.



Assinatura do Orientador

**CAMPINAS
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C179a Cardoso, Terezinha de Fátima, 1969-
Avaliação socioeconômica e ambiental de sistemas de recolhimento e uso de palha de cana-de-açúcar / Terezinha De Fátima Cardoso. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Luis Augusto Barbosa Cortez.

Coorientador: Marcelo Pereira da Cunha.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Bioetanol. 2. Bioenergia. 3. Análise de insumo-produto. 4. Avaliação do ciclo de vida. I. Cortez, Luis Augusto Barbosa, 1957-. II. Cunha, Marcelo Pereira da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Socioeconomic and environmental evaluation of recovery systems and use of sugarcane straw

Palavras-chave em inglês:

Bioethanol

Bioenergy

Input-output analysis

Life cycle analysis

Área de concentração: Engenharia Agrícola

Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Luis Augusto Barbosa Cortez [Orientador]

Oscar Antonio Braunbeck

Joaquim José Martins Guilhoto

Joaquim Eugênio Abel Seabra

Antonio Maria Francisco Luiz José Bonomi

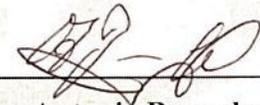
Data de defesa: 11-08-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

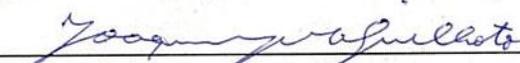
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Terezinha de Fátima Cardoso**, aprovada pela Comissão Julgadora em 11 de agosto de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



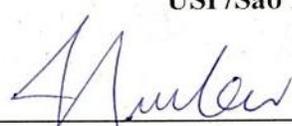
**Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



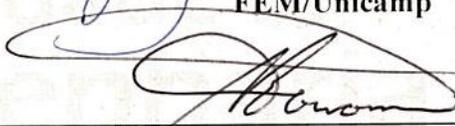
**Dr. Oscar Antonio Braunbeck - Membro Titular
CTBE/Campinas**



**Prof. Dr. Joaquim José Martins Guilhoto– Membro Titular
USP/São Paulo**



**Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra - Membro Titular
FEM/Unicamp**



**Dr. Antônio Maria Francisco Luiz José Bonomi - Membro Titular
CTBE/Campinas**

RESUMO

A colheita de cana crua, sem queima, tem sido imposta principalmente por questões ambientais e com vistas ao aproveitamento integral da cana-de-açúcar. Questões econômicas, ambientais e sociais induzem à mecanização da colheita, o que pode proporcionar melhores condições de trabalho e o aproveitamento da palha, com a eliminação da queima prévia. Parte da palha pode ser utilizada para cobertura do solo, melhorando o reciclo de nutrientes, a retenção de água e redução da erosão. Outra parte da palha poderá ser recolhida, enviada para a indústria e utilizada para geração de eletricidade e/ou para produção de etanol de 2ª geração. Este trabalho, com auxílio da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC/CTBE), empregou as metodologias de insumo-produto e análise de ciclo de vida (ACV) para analisar os impactos socioeconômicos e ambientais do recolhimento e aproveitamento da palha de cana-de-açúcar no setor sucroenergético, considerando (i) a tecnologia de colheita existente (colhedora Convencional) e em desenvolvimento (Estrutura de Tráfego Controlado – ETC, proposta de mecanização com redução e controle do tráfego), (ii) a parcela de palha recolhida, (iii) a forma de recolhimento e transporte e (iv) seu uso. Avaliou-se, também, a viabilidade econômica de cada rota tecnológica considerada. Verificou-se que a colheita integral é economicamente vantajosa na fase agrícola e que a redução da densidade de carga pode ser compensada com menor perda de colmos, devido à redução de potência dos extratores da colhedora. O enfardamento apresenta custos elevados para pequenas frações de recolhimento devido à redução na capacidade operacional das máquinas. A análise do modelo verticalizado de produção (fase agrícola e industrial) mostrou que a baixa eficiência da estação de limpeza a seco interfere diretamente nos rendimentos da indústria, diminuindo a vantagem da colheita integral. A proposta de recolher palha através de colheita integral com palha repicada apresentou bons resultados nas simulações, reduzindo o custo de transporte e melhorando a eficiência de separação da palha na indústria. Considerando o modelo verticalizado de produção, fardos 7,5 t/ha (com colhedora convencional) e Integral sem ponteiro repicada (ETC) apresentam maiores valores para TIR, 12,0% e 14,2%, respectivamente. A fase agrícola responde por 80% a 90% dos impactos ambientais, variando de acordo com o cenário e a categoria de impacto analisada. O uso e produção de fertilizantes e corretivos são os itens que mais ocasionam os impactos ambientais, seguidos de uso de óleo diesel. Em termos socioeconômicos, a colheita integral apresenta maior valor de produção e PIB; já os cenários com fardos apresentam maior remuneração mensal média por emprego e número de empregos gerados

em função do maior número de operações mecanizadas demandando mais mão de obra. O resultado principal do estudo mostra que os cenários com ETC apresentam maior eficiência econômica e a proposta de recolhimento através de colheita integral com palha sem ponteiro e repicada apresentou maior atratividade econômica com menores impactos ambientais. Esta pesquisa demonstra a importância de desenvolvimento de tecnologias que permitam melhor aproveitamento da biomassa.

Palavras chave: Bioeletricidade, Etanol de 2ª geração, Análise de Insumo-Produto, Análise de Ciclo de Vida

ABSTRACT

Harvesting of green sugarcane, without burning, has been imposed mainly by environmental issues and aiming to take full advantage of sugarcane. Economic, environmental and social issues induce mechanical harvesting, which can provide better working conditions and the use of straw, with the elimination of the previous burning. Part of the straw can be used for soil coverage, enhancing the recycling of nutrients, water retention and reducing erosion. Another part of the straw can be collected, sent to the industry and used for bioelectricity generation or production of 2nd generation ethanol. This paper, with the support of Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB), applied input-output and life cycle analysis methodologies to analyze the socioeconomic and environmental impacts of collection and utilization of straw sugarcane, considering (i) harvesting of sugarcane existing (conventional harvester) and developing (ETC - Controlled Traffic Structure – proposed mechanization of reduction and traffic control) technologies, (ii) fraction of gathered straw, (iii) form of collection and transportation and (iv) use of straw. It was also evaluated economic viability of each technological route considered. It was found that the integral harvest system is economically advantageous in the agricultural phase, and that the load density reduction is almost matched with lower loss of stalks due to the reduced power of the harvesters' exhausters. The baling system shows higher costs of small fractions straw recovery due to reduction of the machines operational capacity. The vertically integrated production model analysis (agricultural and industry phases) showed that the low efficiency of dry cleaning station directly interferes with the industry output, reducing the advantage of the integral harvest system. The proposal to collect straw through integral harvest with chopping presented good results in simulations, reducing the cost of transport of straw and improving industrial productivity with better separation of straw. Considering the vertically integrated production model, 7,5 ton/ha baling (with conventional harvester) and integral harvest system chopped without tops (ETC) present higher values of IRR, 12,0% and 14,2%, respectively. Regarding environmental impacts, it was found that agricultural phase represents 80% – 90% of the environmental impacts, varying according to the analyzed scene and the impact category. The use and production of fertilizers and soil correctors are the items that cause the most environmental impacts followed by the use of diesel. In socioeconomic terms the integral harvest system presents higher production value and GDP (Gross Domestic Product); the baling scenes present higher average monthly income per job and number of generated jobs due to higher number of mechanized operations requiring

more manpower. The main result of this study shows that ETC scenes present higher economic efficiency and the recovery proposal of integral harvest system chopped without tops presented higher economic prospects with lower environmental impacts. This paper shows the importance of technology development which permits better use of biomass.

Key Words: Bioelectricity, 2nd Generation Ethanol, Input-Output Analysis, Life Cycle Analysis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Hipótese	3
1.2. Objetivo Geral.....	4
1.3. Objetivos específicos	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Setor sucroenergético	5
2.1.1. Mecanização e colheita de cana crua.....	9
2.1.2. Manejo e conservação do solo.....	14
2.1.3. Controle e redução do tráfego	16
2.1.4. Recolhimento de Palha	18
2.1.5. Aproveitamento da Palha.....	23
3. METODOLOGIA	27
3.1. Cenários Tecnológicos	27
3.1.1. Fase Agrícola.....	27
3.1.2. Fase Industrial	30
3.2. Parâmetros técnicos adotados.....	31
3.2.1. Fase Agrícola - CanaSoft.....	32
3.2.2. Fase Industrial - Aspen Plus®	43
3.3. Parâmetros para a Análise de Viabilidade Econômica	48
3.3.1. Fase Agrícola.....	49
3.3.2. Fase Industrial	51
3.3.3. Análise do modelo verticalizado de produção.....	53
3.4. Análise de Ciclo de Vida (ACV)	54
3.5. Análise de Insumo-Produto.....	58
3.5.1. O modelo de Insumo-Produto	58
3.5.2. Modelo Didático.....	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1. Análise de viabilidade econômica.....	77
4.1.1. Fase Agrícola.....	77
4.1.2. Fase Industrial	95

4.1.3. Análise do modelo verticalizado de produção.....	103
4.2. Impactos ambientais	107
4.3. Análise dos impactos socioeconômicos.....	114
4.3.1. Indicadores socioeconômicos.....	114
4.3.2. Cenários Socioeconômicos.....	129
5. CONCLUSÕES	131
5.1. Análise da viabilidade econômica.....	131
5.2. Análise Ambiental	132
5.3. Análise Socioeconômica.....	133
5.4. Considerações sobre os sistemas de recolhimento de palha.....	134
5.4. Sugestões para trabalhos futuros e considerações finais	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICES	150
Apêndice 1: Participação na categoria Depleção Abiótica - Fase Agrícola.....	150
Apêndice 2: Participação na categoria Acidificação - Fase Agrícola	150
Apêndice 3: Participação na categoria Eutrofização - Fase Agrícola	151
Apêndice 4: Participação na categoria Aquecimento Global - Fase Agrícola	151
Apêndice 5: Participação na categoria Toxicidade Humana - Fase Agrícola	152
Apêndice 6: Participação na categoria Depleção Abiótica – Modelo Verticalizado.....	153
Apêndice 7: Participação na categoria Acidificação – Modelo Verticalizado	154
Apêndice 8: Participação na categoria Eutrofização – Modelo Verticalizado	155
Apêndice 9: Participação na categoria Aquecimento Global – Modelo Verticalizado	156
Apêndice 10: Participação na categoria Toxicidade Humana – Modelo Verticalizado	157

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Luis Cortez, meu orientador, pela sugestão do tema e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Prof. Marcelo Cunha, meu co-orientador, pelo direcionamento dos estudos, pelo comprometimento, dedicação e entusiasmo com o trabalho e, também, pela amizade.

Ao Prof. Antonio Bonomi pela generosidade, iniciativa, confiança, incentivo e colaboração, fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Oscar Braunbeck pela contribuição ao longo de todo o trabalho, sempre com atenção e bom humor.

À Profa. Julieta Teresa Aier de Oliveira pela orientação durante o mestrado e que, reconheço, contribuiu para este trabalho.

Ao Prof. Regis Leal pelas inúmeras contribuições e sugestões.

Ao Prof. Guilhoto pelo curso de Insumo-Produto, pelo fornecimento dos dados - possibilitando a análise inter-regional - e pelas importantes sugestões.

Ao Prof. Joaquim Seabra pelas importantes contribuições a este trabalho.

À Faculdade de Engenharia Agrícola, à coordenação e secretaria de pós-graduação pelo apoio institucional e pela oportunidade concedida.

Ao Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE/CNPEM) por todo o apoio concedido, tornando possível a realização deste trabalho.

À equipe do Programa de Avaliação Tecnológica (PAT), pela boa convivência, amizade e colaboração. Em especial agradeço a Isabelle, Tássia, Edvaldo, Charles e Mantelatto pelas simulações e informações da parte industrial, Otávio e Mateus pelas discussões sobre os cenários e informações sobre ACV e Marcos Watanabe pela ajuda com Insumo-Produto.

Agradecimento especial ao amigo Mateus Ferreira Chagas, que muitas vezes deixou em segundo plano seus afazeres para me auxiliar, discutindo e revisando as inúmeras planilhas de cálculos e resultados deste trabalho.

Agradeço a Carolina Marcondes, Thomaz Penteado e Mariana Pinheiro pelo apoio recebido.

Aos colegas do Programa de Sustentabilidade (PSE) e do Programa Agrícola (PAG) do CTBE, em especial a Michelle, Thayse, Fábio Scarpore, Henrique Franco, João Luis, Adriano, Paulo e Ed Carlos, pelas contribuições a este trabalho.

À AGRICEF, em especial ao engenheiro Efraim Albrecht Neto, pelas informações concedidas.

Às usinas e produtores de cana-de-açúcar que autorizaram as visitas técnicas, contribuindo de forma fundamental para a realização desse estudo.

Às amigas, do CNPEM, Sarita, Isis, Rosangela, Margarida, Rosana, Bruna e Raquel pelo apoio e amizade.

Às amigas: Alessandra, Andréia, Ivana e Mirlaine, pela torcida, carinho e confiança.

À minha família, pelo suporte necessário, meus pais: João e Sebastiana; meus irmãos: Américo, Atílio, Airton, Paulo Afonso, Maria e Isabel; cunhadas Agda, Magda e Raquel; cunhados Tarcísio e Sandro; e meus sobrinhos Tobias, Tomás, Carolina, Natália, João, Sandro, Henrique, Gustavo, Daniel, Ana Beatriz, Elisa, Eduardo e Maria.

Ao Edu, pelo incentivo e afinidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de energia primária - Brasil – 2002 a 2012.....	6
Figura 2: Produção e produtividade de cana-de-açúcar, São Paulo e Brasil, safras 2004/2005 a 2013/2014, por área colhida	7
Figura 3: Colheita mecanizada na região Centro-Sul e estados, safra 2013/2014	10
Figura 4: Colheita mecanizada, por regiões produtoras paulistas, safra 2013/2014	10
Figura 5: Colheita de cana crua nas regiões produtoras paulistas, safras 2006/2007; 2011/2012; 2012/2013 e 2013/2014	11
Figura 6: Máquina base – ETC.....	17
Figura 7: ETC – módulo colheita de 2 linhas.....	18
Figura 8: Operação de enleiramento da palha de cana-de-açúcar	19
Figura 9: Operação de enfardamento da palha de cana-de-açúcar	19
Figura 10: Operação de carregamento dos fardos	20
Figura 11: Pisoteio das soqueiras, provocado pelo tráfego das máquinas.....	20
Figura 12: Cenários de recolhimento de palha	29
Figura 13: Perda na colheita em função do recolhimento de palha através da colheita integral...	37
Figura 14: Etapas da ACV.....	55
Figura 15: Principais etapas do ciclo de vida da produção e processamento de cana-de-açúcar com recolhimento de palha.....	56
Figura 16: Relações de Insumo-Produto Inter-regional	70
Figura 17: Estrutura do modelo inter-regional	72
Figura 18: Custo com óleo diesel por tonelada de material recolhido (colmo ou colmo+palha)..	83
Figura 19: Custo total de produção (R\$ de 2011)	85
Figura 20: Custo total, palha e colmos, por hectare	86
Figura 21: Custo da palha (Base seca) e do colmo.....	87
Figura 22: Custos por hectare, por tonelada de colmo e por tonelada de palha (Base seca).....	90
Figura 23: Análise de sensibilidade de custos de recolhimento de palha com colheita integral e fardos, em função da distância de transporte, da quantidade de palha recolhida e da produtividade de cana – colhedora convencional	92
Figura 24: Análise de sensibilidade de custos de recolhimento de palha com colheita integral e fardos, em função da distância de transporte, da quantidade de palha recolhida e da produtividade de cana – ETC.....	93
Figura 25: Taxa interna de retorno da fase agrícola	94
Figura 26: Produção de etanol anidro e hidratado por safra.....	96

Figura 27: Produção de açúcar por safra	97
Figura 28: Produção de eletricidade excedente por safra – Cenários com colhedora convencional	97
Figura 29: Produção de eletricidade excedente por safra – Cenários com ETC	98
Figura 30: Produção de etanol por hectare	98
Figura 31: Produção de açúcar por hectare	99
Figura 32: Produção de eletricidade excedente por hectare – cenários com colhedora convencional.....	99
Figura 33: Produção de eletricidade excedente, em MWh, por hectare – cenários com ETC	100
Figura 34: Taxa Interna de Retorno da fase industrial	102
Figura 35: Taxa Interna de Retorno da fase agrícola, fase industrial e modelo verticalizado de produção	104
Figura 36: TIR do modelo verticalizado em função da variação do preço MWh de energia elétrica excedente	106
Figura 37: Impactos ambientais da fase agrícola por safra (produção de 2 milhões de toneladas de colmos)	110
Figura 38: Impactos ambientais do modelo verticalizado por safra (processamento de 2 milhões de toneladas de colmos).....	112
Figura 39: Impactos ambientais do modelo verticalizado	113
Figura 40: Valores do choque na produção de cana (colmo + palha) para cada cenário analisado	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Safra 2009/2010 e projeções da indústria sucroalcooleira brasileira	13
Tabela 2: Configuração da palha por tonelada de colmo no momento da colheita.....	29
Tabela 3: Configuração básica da usina	31
Tabela 4: Parâmetros utilizados no plantio.....	33
Tabela 5: Nutrientes na Palha em base seca (bs).....	34
Tabela 6: Composição da palha recolhida.....	35
Tabela 7: Nutrientes retirados com a palha e reposição com aplicação de fertilizantes	36
Tabela 8: Produtividade real e produtividade observada.....	38
Tabela 9: Parâmetros da colhedora.....	39
Tabela 10: Velocidade e capacidade efetiva de colheita	39
Tabela 11: Número de máquinas requeridas nos cenários	40
Tabela 12: Densidade da carga para transporte de colmos e colmos + palha	41
Tabela 13: Palha recolhida, de acordo com cenários.....	42
Tabela 14: Principais parâmetros das simulações com cenários 1G	44
Tabela 15: Principais parâmetros das simulações com cenários 1G2G	45
Tabela 16: Consumo de vapor de processo (kg vapor/t cana processada)	46
Tabela 17: Composição da palha.....	46
Tabela 18: Características da palha, por tonelada de colmo processado, na usina.....	47
Tabela 19: Parâmetros da Estação de Limpeza a Seco.....	48
Tabela 20: Investimentos em maquinário no plantio e colheita	49
Tabela 21: Investimentos em máquinas e equipamentos, ao ano	50
Tabela 22: Investimentos totais e custos operacionais agrícolas.....	51
Tabela 23: Principais investimentos com equipamentos industriais, cenários colhedora convencional.....	52
Tabela 24: Principais investimentos com equipamentos industriais, cenários ETC	52
Tabela 25: Investimentos totais e custos operacionais industriais	53
Tabela 26: Tabela de Insumo-Produto – economia com 2 setores	59
Tabela 27: Modelo Didático – Matriz de Uso (U).....	63
Tabela 28: Modelo didático - Matriz de produção V	66
Tabela 29: Tecnologias agrícolas e industriais inseridas no modelo de Insumo-Produto.....	73
Tabela 30: Nível de agregação de produtos e setores adotado no modelo de Insumo-Produto	74

Tabela 31: Cana produzida*, área total**, área de plantio e raio médio dos cenários tecnológicos da fase agrícola	78
Tabela 32: Custo do plantio, em R\$ por hectare ao ano.....	79
Tabela 33: Parcela da área de plantio que recebe aplicação de Torta de Filtro e Cinzas	80
Tabela 34: Custos com Corte, Carregamento e Transporte (CCT)	80
Tabela 35: Custo com óleo diesel.....	81
Tabela 36: Custos com óleo diesel no CCT (R\$/ha)	82
Tabela 37: Empregos na fase agrícola de acordo com os cenários analisados.....	84
Tabela 38: Receita com palha e receita total (palha e colmos) da fase agrícola	89
Tabela 39: Custos, receita e lucro econômico, por hectare, dos cenários analisados.....	91
Tabela 40: Receita Anual – fase industrial.....	101
Tabela 41: TIR e VPL Agrícola e do modelo verticalizado	105
Tabela 42: Impactos ambientais, por categoria analisada, na fase agrícola	108
Tabela 43: Cenários de análise socioeconômica	115
Tabela 44: Impactos totais sobre produção, PIB e remuneração do fator trabalho, em São Paulo e restante do Brasil (RBR)	116
Tabela 45: Participação dos setores Sucro e Cana no impacto total no valor da produção e do PIB	118
Tabela 46: Participação dos setores no impacto total da remuneração	119
Tabela 47: Efeitos indiretos sobre produção, PIB e remuneração média do fator trabalho, em São Paulo e restante do Brasil (RBR).....	120
Tabela 48: Participação dos setores no efeito indireto no valor da produção	121
Tabela 49: Participação dos setores no efeito indireto no PIB	122
Tabela 50: Participação dos setores no efeito indireto da Remuneração	123
Tabela 51: Impactos Totais e Efeitos Indiretos sobre número de empregos	124
Tabela 52: Efeito Transbordamento no número de empregos gerados	125
Tabela 53: Participação dos setores nos efeitos indiretos de emprego.....	126
Tabela 54: Efeito Total e Indireto sobre a remuneração média mensal do fator trabalho, por emprego	127
Tabela 55: Excedente econômico dos produtos do setor sucroenergético	128
Tabela 56: Impactos socioeconômicos de cenários de produção de cana de São Paulo	129

LISTA DE SIGLAS/ABREVIATURAS

- 1G – Primeira Geração
- 1G2G – Segunda Geração integrada à Primeira Geração
- ACV – Análise de Ciclo de Vida
- AEAC – Álcool Etílico Anidro Combustível
- AEHC – Álcool Etílico Hidratado Combustível
- ART – Açúcares Redutores Totais
- ATR – Açúcares Totais Recuperáveis
- BEN – Balanço Energético Nacional
- BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
- bs – base seca
- BVC – Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar
- CCT – Corte Carregamento e Transporte
- CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
- CNPEM – Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
- CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
- CTBE – Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol
- CTC – Centro de Tecnologia Canavieira
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- ETC – Estrutura de Tráfego Controlado
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
- LNBio – Laboratório Nacional de Biociências
- LNLS – Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
- LNNano – Laboratório Nacional de Nanotecnologia
- MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
- PAG – Programa Agrícola do CTBE
- PAT – Programa de Avaliação Tecnológica do CTBE

PECEGE – Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas

PIN – Programa Industrial

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PPB – Programa de Pesquisa Básica

PSE – Programa de Sustentabilidade

SIAMIG – Sindicato da Indústria de Fabricação do Alcool no Estado de Minas Gerais

SMA – Secretaria do Meio Ambiente

TIR – Taxa Interna de Retorno

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar

VHP – Very High Polarization

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético do Brasil tem despertado atenções locais e do exterior. O etanol de cana-de-açúcar tornou-se referência quando se trata de energia renovável proveniente de produtos agrícolas que obteve sucesso comercial. Impulsionado pelo aumento da frota de veículos *flex fuel* e pela expectativa de exportação, considerando a meta de adição de etanol na gasolina utilizada no exterior, o setor sucroalcooleiro viveu, no período de 2003 a 2008, uma fase de grandes investimentos, visando aumentar a produção para suprir a demanda nacional e internacional. Contudo, a crise financeira mundial de 2008 causou uma redução dos investimentos no setor, interrompendo o seu crescimento. A falta de renovação dos canaviais, em conjunto com adversidades climáticas, causou redução acentuada da produtividade. A mecanização atual, que compacta o solo e danifica a soqueira, também tem sido apontada como responsável pela queda de produtividade da cana-de-açúcar.

Visando minimizar os efeitos da compactação do solo com o aumento da mecanização nas lavouras de cana-de-açúcar, o Programa Agrícola do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), que integra o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), vem desenvolvendo a Estrutura de Tráfego Controlado (ETC).

O Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) é uma Organização Social qualificada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e, é composto por quatro laboratórios nacionais: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Laboratório Nacional de Biociências (LNBio), Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) e Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE).

O CTBE é uma instituição de pesquisa, desenvolvimento e inovação de todo o ciclo produtivo do etanol de cana-de-açúcar, abrangendo área agrícola, industrial, pesquisa básica, sustentabilidade e avaliação tecnológica, através de seus Programas de Pesquisa: Programa Agrícola (PAG), Programa Industrial (PIN), Programa de Sustentabilidade (PSE), Programa de Pesquisa Básica (PPB) e Programa de Avaliação Tecnológica (PAT).

O Brasil tem a cultura de cana-de-açúcar como principal fonte de biomassa para produção de energia. Além do etanol, a cana-de-açúcar possibilita a cogeração de energia elétrica através da queima do bagaço e, mais recentemente, da palha nas caldeiras, produzindo energia

(térmica e elétrica) suficiente para suprir toda a sua demanda na usina durante a safra e gerando excedentes de energia elétrica para comercialização.

A cana-de-açúcar gera uma grande quantidade adicional de biomassa vegetal (palha), em torno de 140 kg (base seca) por tonelada de colmo. Praticamente toda a palha era eliminada com a queimada antes da colheita, prática bastante utilizada no Brasil até a última década. Nesse novo cenário com colheita de cana sem queima prévia, surge a possibilidade do aproveitamento desse material.

Parte da palha pode permanecer no campo, servindo de cobertura do solo que reduz sua erosão, conserva sua umidade e também sua estrutura. A presença de palha no solo implica em novas operações de manejo e ajustes nas máquinas e implementos agrícolas utilizados atualmente, ou até mesmo no desenvolvimento de máquinas apropriadas para o cultivo da cana com a presença da palha no solo. A palha também oferece risco de incêndio; seu acúmulo pode dificultar a brotação da soqueira e favorecer a proliferação de pragas. Dessa forma, parte da palha deverá ser recolhida e utilizada na indústria para geração de eletricidade ou para produção de etanol de 2ª geração, através da hidrólise. A palha também poderá ser utilizada através da rota termoquímica ou ainda para a extensão da safra na primeira geração.

Neste trabalho, são destacadas duas possibilidades de aproveitamento da palha na indústria:

- 1) Eletricidade: a palha poderá ser utilizada nas caldeiras, já que possui características semelhantes ao bagaço, aumentando a capacidade de cogeração de energia.
- 2) Etanol: a palha poderá ser utilizada para produção de etanol de 2ª geração, através da hidrólise.

Para o aproveitamento da palha na indústria são necessárias algumas operações adicionais na fase agrícola, tais como enleiramento, recolhimento, adensamento, transporte, separação e preparação da palha, de acordo com o sistema de recolhimento adotado.

Já foram realizados estudos sobre o recolhimento da palha analisando seus custos. Contudo, verificou-se a necessidade de avaliar a melhor forma de recolhimento da palha de cana-de-açúcar considerando, além dos aspectos econômicos, que são importantes para assegurar a competitividade do setor, os aspectos sociais e ambientais, buscando identificar quais são os

impactos provenientes do aproveitamento da palha de acordo com o emprego dado a esse material na indústria.

Dessa forma, este trabalho estuda os impactos socioeconômicos e ambientais produzidos pela implantação do recolhimento e aproveitamento da palha, buscando responder às seguintes questões:

- Quais são as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais resultantes de cada forma de recolhimento?
- Qual forma de recolhimento apresenta melhor viabilidade econômica da fase agrícola integrada com a usina?
- Qual o impacto no número de empregos que cada forma de recolhimento pode gerar?

As questões colocadas, portanto, dizem respeito a quais são os impactos socioeconômicos e ambientais de cada forma de recolhimento de palha considerando seu aproveitamento parcial na indústria.

1.1. Hipótese

A viabilidade do aproveitamento da palha de cana-de-açúcar está relacionada ao seu custo de recolhimento e ao rendimento dos processos industriais. Por requerer menor número de máquinas e operações, a colheita integral proporciona custos mais atrativos e diminui a compactação do solo. Entretanto, a colheita integral apresenta dois desafios principais:

- 1- baixa densidade da carga que inviabiliza o transporte a grandes distâncias;
- 2- baixa eficiência de separação da estação de limpeza a seco que reduz o rendimento da fase industrial.

Assim, a hipótese deste trabalho é que a repicagem da palha no sistema de colheita integral torna o aproveitamento da palha mais sustentável, pois melhora as condições do transporte, aumentando a densidade de carga, e reduzindo as perdas na extração com aumento da eficiência da estação de limpeza a seco.

1.2. Objetivo Geral

Analisar os impactos socioeconômicos e ambientais causados pelo aproveitamento da palha de cana-de-açúcar considerando diferentes formas e quantidades de recolhimento e aproveitamento, através de análise do modelo verticalizado de produção – campo e indústria integrados.

1.3. Objetivos específicos

Levando-se em consideração as formas de recolhimento e o uso da palha na indústria, os objetivos específicos são:

- I.** Identificar a forma de recolhimento de palha que é mais apropriada economicamente.
- II.** Identificar a melhor forma de recolhimento do ponto de vista ambiental, analisando a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o balanço energético em cada um dos sistemas.
- III.** Identificar a melhor forma de recolhimento do ponto de vista social, estimando o número de empregos diretos e indiretos, bem como a remuneração associada.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta-se em cinco capítulos, incluindo esta introdução. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, com breve discussão sobre a importância do setor sucroenergético, em especial no estado de São Paulo, destacando a produção de etanol e a colheita de cana crua, que permite o aproveitamento da palha. Também são analisados alguns trabalhos que abordaram aspectos agrônômicos da palha, assim como aspectos técnicos e custos do recolhimento de palha e seu aproveitamento na indústria. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada para organização dos dados, as variáveis consideradas, a descrição dos cenários propostos e a apresentação dos dados utilizados. O quarto capítulo traz a discussão dos resultados obtidos. No quinto capítulo têm-se as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Setor sucroenergético

O aumento da demanda mundial de energia, em conjunto com as mudanças ambientais, tem levado o mundo a buscar alternativas para os combustíveis através de fontes renováveis. Neste panorama, o Brasil assume papel de relevância no desenvolvimento tecnológico e econômico dos biocombustíveis (SILVA, 2008). De acordo com Leite e Leal (2007), o interesse pelos biocombustíveis tem como principais razões diminuir a dependência por petróleo externo, minimizar os efeitos de emissões veiculares e controlar a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. As políticas de adoção de biocombustíveis têm como principais *drivers* a segurança energética, a redução das emissões de GEE e o desenvolvimento rural (DUER; CHRISTENSEN, 2009; DERMIBAS, 2009; ACKRILL; KAY, 2012).

O etanol de cana-de-açúcar desponta como substituto parcial dos combustíveis fósseis no Brasil, afigurando-se como uma boa solução para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, visto que “[...] a relação entre a energia renovável produzida (com o etanol) e a energia fóssil usada é de 8,9.” (MACEDO, 2007, p. 30). Soares et al. (2009) concluíram que para 1,0 MJ de energia fóssil consumida, a energia renovável obtida na produção do etanol brasileiro corresponde a 8,35 MJ, com 60% da colheita da cana realizada manualmente e com queima prévia.

Além de sua importância na mitigação dos gases de efeito estufa (GEE), substituindo os combustíveis fósseis (Zullo Jr. et al., 2010), a cultura de cana-de-açúcar possibilita aumentar a área de produção com condições climaticamente favoráveis; mesmo com mudanças das condições climáticas atuais, isto se dá em função da maior capacidade de adaptação da cultura de cana-de-açúcar às mudanças climáticas previstas nos relatórios do IPCC¹, quando comparada a culturas de soja, milho, mandioca, girassol, feijão, café, arroz e algodão (ASSAD et al., 2008).

A cultura de cana-de-açúcar representa importante parcela na matriz energética brasileira, de acordo com dados do Balanço Energético Nacional (BEN), como segue na Figura 1.

¹ IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

² Caçamba hidráulica, geralmente rebocada por um trator, que segue paralela à colhedora e, quando carregada,

Em 2012 a produção de energia a partir de produtos de cana-de-açúcar representaram 17,5% da matriz energética nacional.

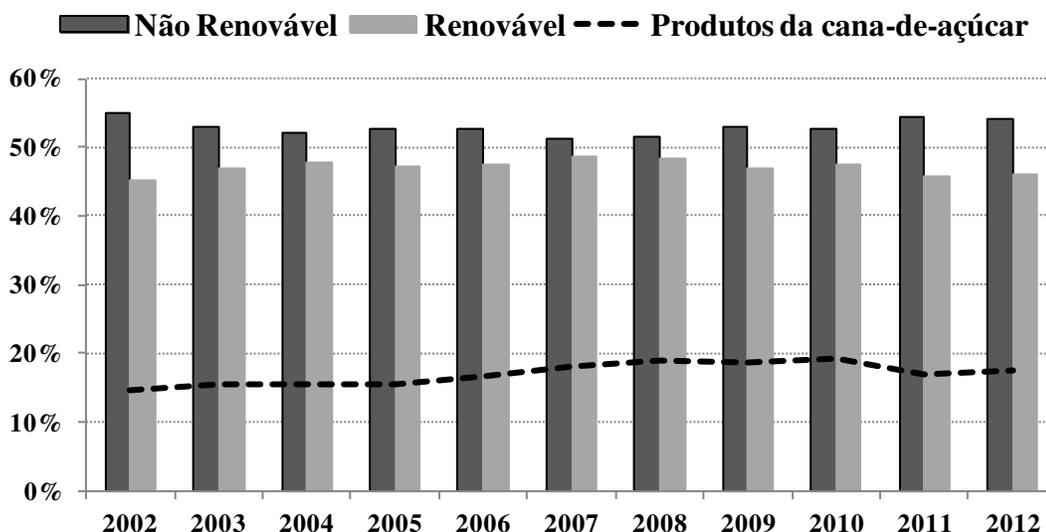
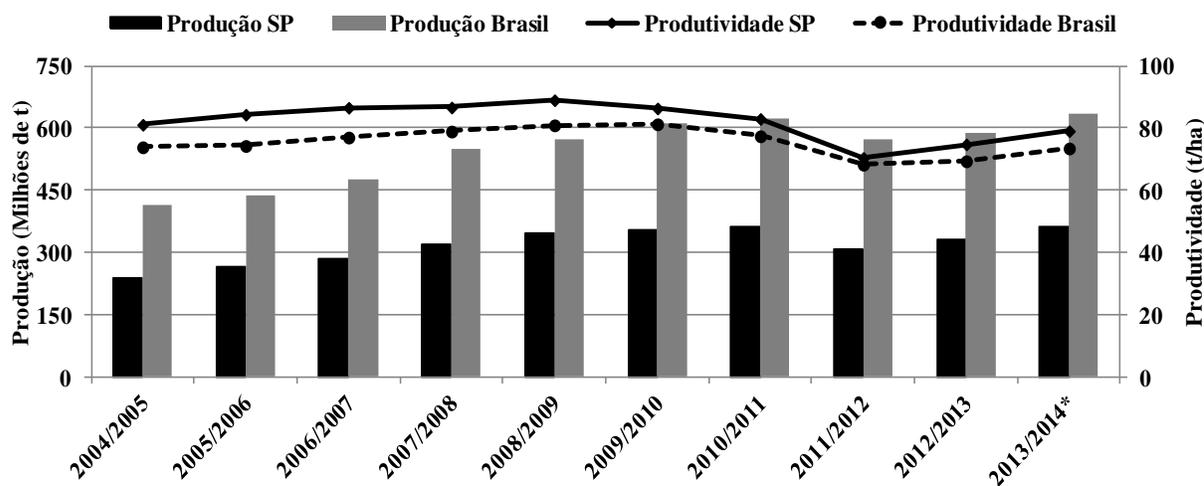


Figura 1: Produção de energia primária - Brasil – 2002 a 2012

Fonte: BEN, ano base 2012 (EPE, 2013)

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com aproximadamente 37% da produção, em 2012 (FAOSTAT, 2014). O estado de São Paulo foi responsável por, aproximadamente, 56% da produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2013/2014 (CONAB, 2014).

A crise mundial de 2008 interrompeu o crescimento do setor sucroenergético, reduzindo investimentos. A Figura 2 mostra queda na produtividade nas safras de 2010/2011 e 2011/2012, provocada principalmente pela falta de renovação dos canaviais e adversidades climáticas e, conseqüentemente, queda na produção (safra 2011/2012). Já a partir da safra 2012/2013, o setor vem retomando o crescimento, investindo em renovação dos canaviais e aumentando a área de plantio (CONAB, 2013b; 2014).



*estimativa

Figura 2: Produção e produtividade de cana-de-açúcar, São Paulo e Brasil, safras 2004/2005 a 2013/2014, por área colhida

Fonte: CONAB (2013b; 2014)

No Brasil, a região Centro-Sul é responsável pela maior parte da expansão da lavoura canieira, possuindo relevo e condições climáticas favoráveis à cultura, além de um bom desenvolvimento tecnológico. Com a expansão do setor, aumentam as preocupações com a sustentabilidade da atividade sucroenergética, envolvendo impactos socioeconômicos e ambientais.

A queima da palha da cana-de-açúcar antes da colheita manual foi prática comum no Brasil (PAES, 2007). A despalha a fogo reduz o risco de ataques de animais peçonhentos e aumenta consideravelmente o rendimento do trabalho dos cortadores de cana. A colheita manual com a cana crua não é viável para o trabalhador, pois tem seu rendimento na colheita reduzido praticamente à metade em relação ao corte manual de cana queimada. Furlani Neto (1995) aponta que o rendimento da cana crua era de 2,5 a 3,5 t/dia, enquanto que o rendimento de cana queimada era de 5 a 7 t/dia. Já para Gonçalves e Alves (2003), o rendimento do corte manual com a cana queimada é de 10 t/dia, em média. Desta forma, também não é viável para o empregador colher manualmente a cana crua, pois tem seus custos com a colheita aumentados, já que necessita contratar mais pessoas para colher a mesma quantidade de cana diariamente, em relação à cana queimada. Por outro lado, verifica-se dificuldade de encontrar mão de obra para a colheita manual nos últimos anos, parte em função da expansão do setor e parte em função das

condições desgastantes de trabalho no corte manual de cana-de-açúcar. Esses fatores induzem à mecanização da colheita (CARDOSO et al., 2010).

Algumas medidas de proteção ambiental também direcionam para a colheita de cana crua e, conseqüentemente, mecanização da lavoura de cana-de-açúcar, tais como:

a) O Protocolo de Quioto, que estabelece metas para a redução de gases poluentes, com principal preocupação com o dióxido de carbono liberado em larga escala por meio da queima de combustíveis fósseis e pelas queimadas em florestas e culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar, que, acredita-se, esteja ligado ao aquecimento global (PNUD, 2005);

b) O Decreto do Governo Federal nº 2.661, de julho de 1998, que determina a extinção das queimadas para áreas mecanizáveis, até 2018;

c) A Lei Estadual de Queima, nº 11.241/02, criada em setembro de 2002, que determina a eliminação gradual das queimadas no estado de São Paulo, para áreas mecanizáveis, até 2021, e áreas não mecanizáveis (com declividade acima de 12%), até 2031;

d) O Protocolo Agroambiental Paulista, que objetiva antecipar a extinção das queimadas nas culturas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, em relação ao previsto na Lei Estadual de Queima, nº 11.241/02. As antecipações, previstas neste protocolo, para o fim da queima da palha de cana-de-açúcar em áreas mecanizáveis, com declividade até 12%, é de 2021 para 2014, e para áreas atualmente não mecanizáveis, com declividades maiores que 12%, a antecipação é de 2031 para 2017. Desta forma, 2017 é o prazo para a eliminação total das queimadas no estado de São Paulo. O Protocolo também prevê que áreas de expansão dos canaviais não devem utilizar a queima prévia à colheita (SMA, 2009);

e) O protocolo Agroambiental de Minas Gerais, que se assemelha ao paulista, também prevê a antecipação do fim das queimadas para 2014 para áreas com declividade até 12% (SIAMIG, 2011).

Um dos principais objetivos de colher a cana sem queima prévia é evitar a emissão de particulados que causam diversos problemas respiratórios, prejudicando a saúde dos trabalhadores e moradores das regiões produtoras. A queima da cana-de-açúcar também produz a emissão de CH₄, N₂O e gases halogenados que impactam a emissão de gases de efeito estufa mais fortemente que o CO₂, por unidade emitida, além de gerar compostos orgânicos, como os

hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) altamente cancerígenos (GONÇALVES, 2005; MACEDO et al., 2008).

De acordo com Souza et al. (2009, p. 45), “[...] além da redução na poluição atmosférica, a eliminação da queima diminui em quase 80% as emissões totais de GEE apenas na colheita.”, referindo-se ao impacto da mudança de colheita manual com queima prévia para colheita mecanizada de cana crua. As queimadas também resultam em perda da sacarose pela exsudação, danos à fauna local, com a morte de animais silvestres e danos ao solo, com a queima da palha, que deixa o solo descoberto permitindo assim a ação de agentes erosivos, principalmente das águas da chuva (ROSSETO, 2009).

Costa et al. (2013), estimaram os impactos nos empregos da economia brasileira resultantes da substituição de gasolina C por etanol hidratado, utilizando a Matriz Insumo-Produto (MIP) inter-regional considerando as regiões Norte-Nordeste, Centro-Sul e o Estado de São Paulo, simulando aumentos de consumo de etanol nas proporções 5%, 10% e 15%, em detrimento à gasolina C, verificaram potencial de criação de novos empregos no país.

2.1.1. Mecanização e colheita de cana crua

A mecanização da colheita de cana-de-açúcar, de acordo com Paes (2007), foi implantada em poucas usinas na década de 1980; o aumento da mecanização na colheita se deu em virtude da escassez da mão de obra aliada à necessidade das usinas cumprirem seus cronogramas de safra. O crescimento da mecanização também se deve à redução de custos e pressões ambientais, ainda segundo Paes (2007), a área colhida mecanicamente no estado de São Paulo passou de aproximadamente 18%, em 1997, para 43%, em 2006, da área colhida.

De acordo com UNICA (2013), segundo dados do Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, é possível verificar que a colheita mecanizada tem sido bastante empregada em todos os estados da região Centro-Sul (Figura 3). Na safra 2013/2014, os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul apresentaram respectivamente, 93,3%, 99,5% e 97,2% da área colhida mecanicamente, índice superior à colheita mecanizada em São Paulo, que na mesma safra atingiu 88,8%.

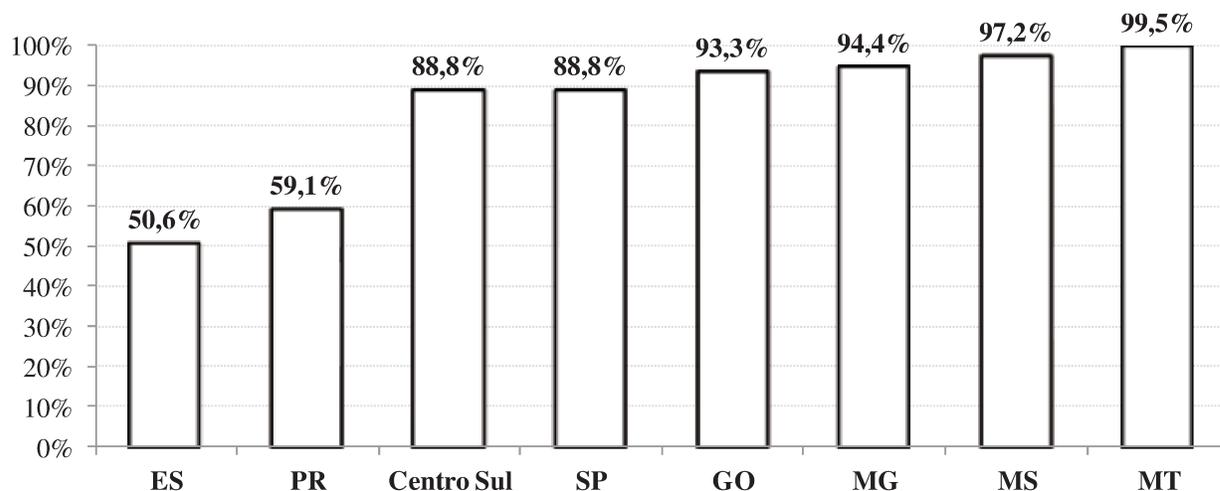


Figura 3: Colheita mecanizada na região Centro-Sul e estados, safra 2013/2014

Fonte: CTC – UNICA, 2013

A Figura 4 apresenta a mecanização nas regiões produtoras do estado de São Paulo, na safra 2013/2014. É possível verificar que a mecanização na região produtora de Araçatuba está próxima de atingir a totalidade, assim como nas regiões de Assis e Ribeirão Preto, com índices de mecanização superiores a 90%.

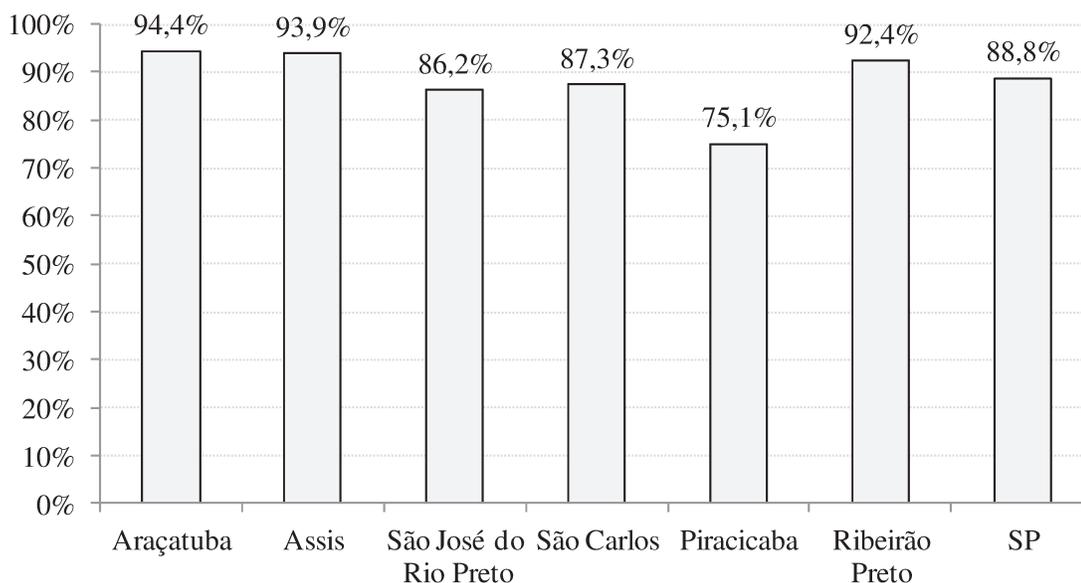


Figura 4: Colheita mecanizada, por regiões produtoras paulistas, safra 2013/2014

Fonte: CTC – UNICA, 2013

Quando se analisa a colheita de cana crua nas regiões produtoras de cana no estado de São Paulo, é possível verificar aumento em todas as regiões, provavelmente em função do Protocolo Agroambiental Paulista, que apesar de não ter força de lei, foi assinado por aproximadamente 90% das unidades produtoras paulistas, de acordo com dados da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SMA, 2013). As regiões que apresentam maior redução nas queimadas na colheita da cana são: regiões Central e de Araçatuba, respectivamente com 90% e 87% da colheita de cana crua, Presidente Prudente, com 87%, e região de Barretos com 83% de colheita sem queima prévia na safra 2013/2014 (Figura 5).

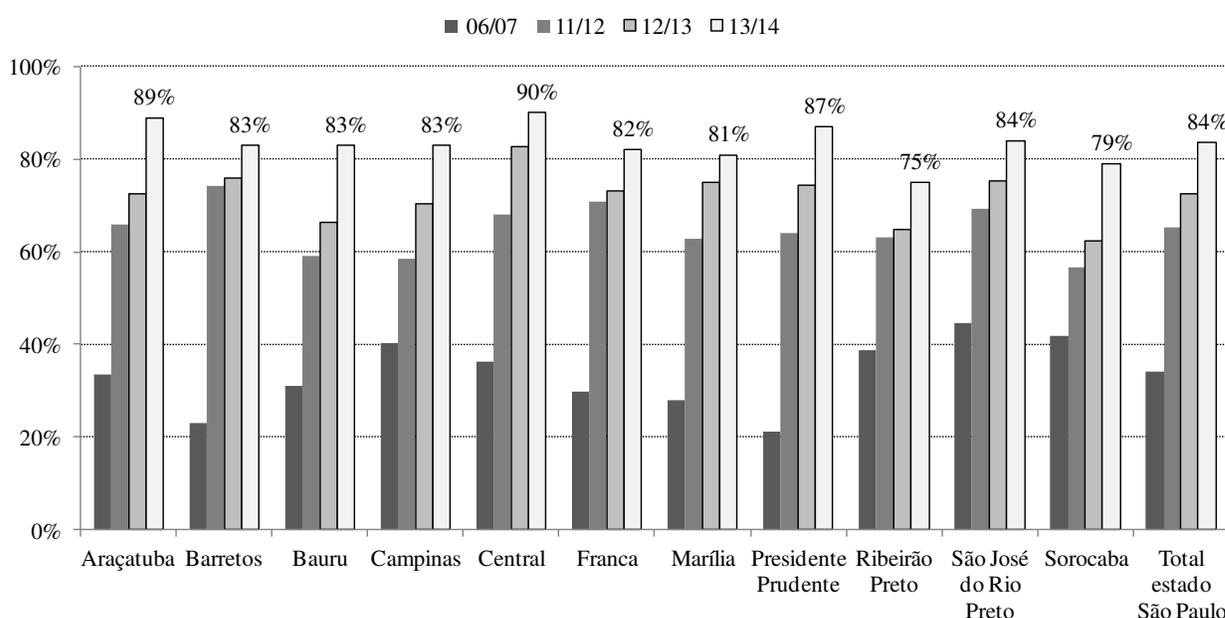


Figura 5: Colheita de cana crua nas regiões produtoras paulistas, safras 2006/2007; 2011/2012; 2012/2013 e 2013/2014

Fonte: SMA (2013; 2014)

Contudo, de acordo com dados apresentados nas Figuras 4 e 5, verifica-se que parte da cana colhida mecanicamente tem queima prévia, impedindo o aproveitamento de parte significativa da palha.

Cada tonelada de colmo produz, em média, 140 kg de palha base seca (HASSUANI et al., 2005; RIPOLI; RIPOLI, 2009). A palha de cana-de-açúcar pode ser utilizada como cobertura no solo, diminuindo sua erosão, aumentando a conservação da sua umidade e, de acordo com Souza et al. (2005), a incorporação da palhada no solo pode interferir na produtividade dos

colmos. Campos et al. (2010), apontam que a produtividade dos colmos está relacionada não só ao manejo, mas também à variedade de cana cultivada com cobertura de palha no solo. Outra possibilidade de aproveitamento da palha é o recolhimento para a indústria, onde pode ser utilizada nas caldeiras, gerando vapor para a produção de energia elétrica, ou utilizada diretamente para produção de etanol de segunda geração, através do processo de hidrólise (MACEDO, 2004; SANTOS et al., 2012).

No Brasil a energia elétrica produzida é predominantemente proveniente de hidroelétricas. A produção de eletricidade através da biomassa da cana-de-açúcar pode ser complementar à matriz elétrica brasileira, já que a safra de cana da região Centro-Sul coincide com o período em que os reservatórios de água estão com sua capacidade reduzida, em virtude do período de escassez de chuva, tornando a produção de hidroeletricidade vulnerável (JARDIM, 2007; DANTAS, 2009).

A produção de energia elétrica através do bagaço de cana triplicou no período de 2003 a 2012 (EPE, 2013). Entretanto, das usinas instaladas no estado de São Paulo, em 2010, menos de 38% comercializam parte da eletricidade que produzem (UNICA, 2010a). A eletricidade canavieira é benéfica tanto para o setor sucroenergético quanto para o sistema elétrico brasileiro, no entanto ainda é pouco explorada, com produção bem abaixo de seu potencial (BNDES, 2011). Em 2013, 1.720 MW foram ofertados ao sistema interligado e, a capacidade instalada, de 378 usinas, é de 9.339 MW (NEVES; TROMBIN, 2014).

A União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) mostra os dados referentes à safra de 2009/2010 e faz projeções para a safra de 2015/2016 e 2020/2021. Os valores de produção de energia elétrica, de acordo com as previsões de aproveitamento de palha estão na Tabela 1, onde se verifica que com o aproveitamento parcial da palha de cana-de-açúcar, possível a partir da colheita de cana sem queima e admitindo a expansão da cultura, há a possibilidade do setor sucroenergético gerar aproximadamente 15% da matriz elétrica brasileira.

Tabela 1: Safra 2009/2010 e projeções da indústria sucroalcooleira brasileira

	2010/2011*	2015/2016 ^e	2020/2021 ^e
Produção cana-de-açúcar (milhões t)	605	829	1.038
Bioeletricidade (MW médio)	1,8	8,16	13,16
Participação na matriz elétrica brasileira (%)	3	11	14

Nota: e: estimativa potencial de bioeletricidade: considerou-se a utilização de 75% do bagaço + 50% da palha disponíveis; *: referente à posição da produção da região Norte-Nordeste de 30/06/2010, divulgada pelo MAPA.

Fonte: UNICA (2010b)

Segundo Braunbeck et al. (2008), o aproveitamento da palha envolve uma série de operações como recolhimento, adensamento, transporte e preparação para a queima nas caldeiras, o que acaba gerando restrições de competitividade em função da complexidade do processo e também da falta de equipamentos com tecnologias apropriadas para o aproveitamento energético.

O recolhimento da palha poderá gerar empregos diretos, com o aumento das operações no campo e na indústria, e empregos indiretos, com a fabricação e manutenção de máquinas e implementos agrícolas apropriados, além de maior oferta de eletricidade e/ou etanol.

Contudo, a colheita mecanizada tem sido bastante questionada em relação aos impactos sociais que ela pode ocasionar. Segundo dados da UNICA, citados por Moraes (2007), a estimativa é que na safra de 2020/2021 haja uma redução de 114 mil postos de trabalho em função da mecanização da colheita de cana-de-açúcar.

A implantação de novas tecnologias demanda mão de obra com maior qualificação, melhor remuneração e em menor número. Os trabalhadores do setor, principalmente da área agrícola, possuem baixa escolaridade, dificultando que assumam outras funções no setor sucroenergético ou em outros setores da economia. Guilhoto et al. (2002) apontam que a mecanização reduz o número de pessoas ocupadas, principalmente para os níveis com menor qualificação. Rossini (2008) aponta que há aceleração significativa da substituição de pessoas ligadas às atividades agrícolas sucroalcooleiras e que o preparo destas pessoas para assumirem o comando das máquinas, ou mesmo para assumirem outras atividades, ocorre em ritmo mais lento.

Entretanto, cabe lembrar que a eficiência econômica (produzir mais com o mesmo uso de recursos, como energia e mão de obra) pode ser benéfica para a sociedade. Nos últimos 5

anos, segundo dados do IBGE (2014), a taxa de desemprego no Brasil tem sido reduzida, apontando que há escassez de mão de obra em vários setores, como construção civil e serviços, onde os trabalhadores agrícolas dispensados poderiam ser aproveitados após requalificação.

Martínez et al. (2013), avaliaram os impactos socioeconômicos da produção de etanol de cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil, utilizando modelo inter-regional de Insumo-Produto para analisar três cenários com projeção para 2020. O estudo apontou que a grande redução do emprego, devido à substituição da colheita manual pela colheita mecânica poderá ser compensado pelo aumento da produção e pelos efeitos indiretos da produção de cana no NE, que são significativos no resto do Brasil, devido à importação de insumos dessas regiões.

A geração de energia elétrica excedente, possível com o aproveitamento da palha, ou a possibilidade de produção de etanol, através da hidrólise, também é capaz de gerar novos postos de trabalho, direta e indiretamente, pois pode gerar a energia necessária para novos empreendimentos em diversos setores (GERMEK et al., 2005; IPEA, 2010).

Cabe lembrar que a palha permite outras formas de aproveitamento, tais como: floricultura, horticultura, silvicultura, avicultura, artesanato, decoração e também na construção civil, contribuindo para a geração de emprego e/ou fixação do homem no campo (COSENTINO; SOUZA, 2007; RODRIGUES et al., 2013).

São necessários estudos direcionados para avaliar qual a melhor utilização da palha, em termos econômicos, sociais e ambientais. Ainda é preciso definir a porcentagem de palha que deve ficar no campo (Franco et al., 2013), de acordo com a variedade de cana e principalmente de acordo com as especificações de clima e de solo de cada região de plantio.

2.1.2. Manejo e conservação do solo

Os ponteiros de cana-de-açúcar (parte entre o topo e o último nó do colmo) apresentam maiores teores de Nitrogênio (N), Potássio (K), Fósforo (P), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Enxofre (S) e maior quantidade de água (Franco, 2008; Franco et al., 2013; Trivelin et al., 2013), enquanto que as folhas secas apresentam maiores teores de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Boro (B), Ferro (Fe) e Manganês (Mn). O teor de umidade presente nos ponteiros é cerca de seis vezes o teor de umidade que se verifica nas folhas secas (HASSUANI et al., 2005; RIPOLI; RIPOLI, 2008).

Considerando as características de composição da palha, Franco et al. (2011) concluem que:

- a variedade de cana plantada e as características da região devem ser consideradas na determinação da quantidade de palha a ser retirada;

- as diferentes composições dos ponteiros e folhas da cana influenciam diretamente na escolha do material a ser retirado do campo;

- os ponteiros (palmitos e folhas verdes), que possuem quantidade significativa de nutrientes, tornam possível à lavoura a reciclagem de cerca de 60% desses nutrientes, sendo vantajoso agronomicamente deixá-los no campo, mesmo considerando a retirada aproximada de 66% da massa seca da palha;

- a palha seca possui menor quantidade de cinzas e maior poder calorífico o que torna seu uso mais apropriado nas caldeiras.

Galdos (2007) alerta sobre a escassez de informações sobre o manejo da palha de cana-de-açúcar, principalmente em relação às características do solo e aos outros impactos ambientais, devido ao histórico de colheita com queima prévia e à prática de colheita de cana crua ser, comparativamente, recente no Brasil. Cerri et al. (2010), apontam que o sistema de colheita sem queima é mais vantajoso do ponto de vista do balanço de Gases de Efeito Estufa (GEE).

A colheita de cana crua também viabiliza o sistema de Plantio Direto, uma técnica de manejo de solo bastante utilizada nas culturas de cereais, que consiste, basicamente, em: (i) não revolvimento da terra, ou seja, não há o preparo do solo, com a utilização de arados e grades, antes do plantio; (ii) conservação da palha e restos vegetais para cobertura do solo e (iii) rotação de culturas (GOULART, 2009).

A palha sobre a superfície protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, reduzindo a desagregação e o selamento da superfície, garantindo maior infiltração de água e menor arraste da terra. De acordo com De Maria (2005), o Plantio Direto apresenta vantagens agronômicas, pois reduz a erosão e a oscilação térmica, aumenta o armazenamento de água no solo, a atividade biológica e os teores de matéria orgânica no solo. Oliveira et al. (2002), citado por Lopes et al. (2004), indicam que o Plantio Direto pode reduzir em, aproximadamente, 75% e 20% as perdas de solo e água, respectivamente.

Na cultura de cana-de-açúcar ainda é pequena a utilização do Sistema de Plantio Direto. Contudo, resultados preliminares mostram-se bastante favoráveis à inserção desta prática nas lavouras canavieiras. Os estudos com Plantio Direto, obtidos por uma propriedade no município de Pitangueiras, em cana-de-açúcar com sucessão de cultura com soja, foram iniciados no ano de 2000, constatando uma redução de, em média, 24% no custo de produção da soja por hectare; já na cultura de cana-de-açúcar a redução nos custos é de 10% a 12%, com um aumento na produtividade na cultura de ano e meio, em torno de 15% no primeiro corte (FELÍCIO, 2007).

Outro benefício desta técnica de manejo é o menor uso de máquinas, já que não há a preparação do solo, reduzindo a compactação e diminuindo a queima de combustíveis fósseis utilizados pelo maquinário agrícola. É importante lembrar que esta prática engloba, geralmente, a inserção de rotação de cultura, o manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas.

Na área de reforma do canavial, podem ser inseridas outras culturas de ciclos curtos (como soja, amendoim, crotalária, milho). Esta diversificação de culturas favorece a melhoria das condições do solo (Braunack et al., 2003; Garside e Bell, 2001; Roque et al., 2010; Stirling et al., 2001), favorecendo, também, o controle de pragas e doenças, resultando em aumento da produtividade do canavial (FERNANDES et al., 2012). Estudos indicam aumento na produtividade de 20% a 30% quando, na reforma do canavial, é adotado o cultivo de leguminosas (AMBROSANO et al., 2011; DUARTE JUNIOR; COELHO, 2008; GARSIDE et al., 2002). O manejo adequado do solo, de acordo com Carvalho et al. (2010), deve minimizar o revolvimento do solo, bem como incluir rotação de culturas com plantas com alta produção de resíduos vegetais e capacidade de acumular nutrientes no solo, como as leguminosas.

2.1.3. Controle e redução do tráfego

O tráfego controlado, com adoção de piloto automático, pode reduzir o pisoteio das soqueiras, bem como a compactação na região de desenvolvimento das raízes (Bell et al., 2001; Braunack; Hurney, 2000), proporcionando melhores condições para o desenvolvimento das culturas (Kingwell; Fuchsichler, 2011) e favorecendo a adoção do Plantio Direto de cana-de-açúcar. A viabilidade do Plantio Direto, para a cultura de cana-de-açúcar, está fortemente subordinada à redução da área trafegada, atualmente em torno de 60%, e ao uso de máquinas com

sistemas direcionais georreferenciados, práticas que reduzem a compactação do solo e o pisoteio das soqueiras (CARVALHO et al., 2012).

Visando minimizar os efeitos da compactação do solo com o aumento da mecanização nas lavouras de cana-de-açúcar, o Programa Agrícola do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), que integra o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), vem desenvolvendo uma nova proposta de mecanização com redução e controle do tráfego, denominada Estrutura de Tráfego Controlado (ETC).

Para desenvolvimento da ETC (Figura 6), o CTBE conta com a parceria da empresa Máquinas Agrícolas Jacto S.A. e com financiamento do FUNTEC/BNDES. A máquina está sendo desenvolvida para ser capaz de realizar os processos de plantio e colheita da cana-de-açúcar reduzindo o contato com o terreno cultivado, diminuindo a compactação do solo e possibilitando a prática do Plantio Direto.



Figura 6: Máquina base – ETC

Fonte: CTBE (2013)

O diferencial é que a ETC percorrerá trilhas permanentes, georreferenciadas, predefinidas e com espaçamento entre rodas do mesmo eixo (bitola) de 9 metros, permitindo reduzir o tráfego do maquinário de 60% para 13% da área da cultura, diminuindo a compactação. A utilização de trilhas permanentes de tráfego também reduz o consumo de combustível, com a maior eficiência de tração pela redução da resistência do rolamento, já que a melhora a tração das rodas e possibilita uma menor utilização da potência da máquina.

A ETC é composta por uma máquina base, na qual se pode acoplar o módulo de plantio e o módulo de colheita, dependendo da operação desejada. O módulo de plantio da ETC, que tem largura operacional de 9 m, será capaz de plantar 6 linhas simultaneamente, considerando o

espaçamento das linhas de cana de 1,5 m. As plantadoras convencionais, comercializadas atualmente, possuem capacidade de plantar 2 linhas simultaneamente. Já o módulo de colheita da ETC é projetado para colher 2 linhas simultaneamente, com largura operacional de 3 m, e viabiliza a colheita na largura total de 9m, com redução significativa nos custos de colheita (Figura 7).



Figura 7: ETC – módulo colheita de 2 linhas

Fonte: CTBE (2013)

É importante ressaltar que o sistema de Plantio Direto na cultura de cana não inviabiliza o recolhimento de parte da palha produzida pela cultura, dado que a cana-de-açúcar produz, em muitos casos, quantidade de palha excedente à necessária para cobertura do solo neste sistema. Desta forma, a utilização de máquinas que possibilitem manejos mais adequados e colheitas mais eficientes é fator que merece especial atenção do setor, garantindo aproveitamento integral da cana-de-açúcar e a sustentabilidade da cultura canavieira.

2.1.4. Recolhimento de Palha

Destacamos dois sistemas de recolhimento de palha, que serão analisados neste estudo: o recolhimento através de fardos e através da colheita integral.

No recolhimento da palha através de fardos, a palha é lançada ao solo no momento da colheita, permanecendo sobre ele por um período de 8 a 15 dias, dependendo das condições climáticas, até que atinja umidade de 12% a 15 %. Quando a umidade da palha atinge o percentual adequado para o recolhimento, a palha é enleirada para facilitar a operação de enfardamento (Figura 8). A quantidade de palha a ser recolhida depende do ajuste da altura dos ancinhos do enleirador.



Figura 8: Operação de enleiramento da palha de cana-de-açúcar

Caso ocorram chuvas no período em que a palha está no solo, o enfardamento é adiado, até que se consiga a umidade adequada para o enfardamento. Além do maior tempo de permanência do material no campo, a chuva também provoca a compactação da palha, aproximando-a do solo, aumentando as impurezas minerais aderidas a ela. Para que não atinja o solo, aumentando a quantidade de terra nos fardos, os ancinhos do enleirador são elevados, diminuindo a quantidade de palha recolhida.

Após o enleiramento, a palha é enfardada. Os fardos podem ser cilíndricos ou prismáticos. Neste trabalho, analisamos fardos prismáticos com enfardadoras tracionadas por tratores, como pode ser observado à esquerda, na Figura 9.



Figura 9: Operação de enfardamento da palha de cana-de-açúcar

Os fardos são colocados, com o auxílio de uma carregadora, nos caminhões e transportados até a usina onde serão preparados para uso nas caldeiras e/ou, futuramente, para produção de etanol de segunda geração (Figura 10).



Figura 10: Operação de carregamento dos fardos

Com o enfardamento, o tráfego de máquinas no campo aumenta, elevando a compactação do solo e o risco de pisoteio das soqueiras (Figura 11), podendo reduzir a produtividade da safra seguinte e, ainda, antecipar a renovação do canavial.



Figura 11: Pisoteio das soqueiras, provocado pelo tráfego das máquinas

Os fardos possibilitam o recolhimento da palha com menor umidade e de forma adensada, o que facilita o transporte. Entretanto, o pisoteio da soqueira e a compactação do solo é uma desvantagem importante.

O recolhimento de palha através da colheita integral é realizado com a redução da velocidade de rotação dos ventiladores e, conseqüentemente, da potência dos extratores da colhedora. A palha é lançada junto com os colmos no transbordo². A quantidade de palha a ser recolhida será determinada pela taxa de redução da potência dos extratores.

Pontos positivos da colheita integral: a redução da potência dos ventiladores, além de recolher a palha, também reduz perda de colmos, bem como diminui o pisoteio da área plantada pelo menor número de máquinas envolvidas. Contudo, a umidade da palha recolhida é um ponto desfavorável para a colheita integral.

A redução da densidade da carga com a colheita integral é bastante criticada, pois aumenta os custos no transporte. Contudo, a Resolução Nº 211, do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), limita o peso bruto total combinado (PBTC) a 74 toneladas e a fiscalização depende da verificação em balanças alocadas nas estradas e/ou rodovias. Com este limite, a redução de carga com a colheita integral passa a ser uma alternativa para o transporte sem alterar as composições atualmente utilizadas.

Estudos foram realizados a respeito do recolhimento da palha de cana-de-açúcar em relação à análise econômica dos sistemas de seu recolhimento, com foco na fase agrícola. Alguns trabalhos serão destacados a seguir:

- Franco (2003) analisou o recolhimento a granel da palha, que foi enleirada e depois recolhida com uma recolhedora de forragens autopropelida, obtendo como principais resultados o índice de 7,47% de terra na palha recolhida e custo total (posto na usina) de R\$ 21,03 por tonelada de palha (valor em R\$ de 2003);

- Torrezan (2003) avaliou parâmetros de desempenho operacional das operações de enleiramento e enfardamento prismático da palha, utilizando enleiramento com tratamento simples (com uma passada de ancinho), duplo (com duas passadas) e triplo (com cinco passadas)³, obtendo melhores resultados com o enleiramento simples que apresentou menor consumo de óleo diesel (0,18 L/t), capacidade efetiva média de 83,06 t/h;

² Caçamba hidráulica, geralmente rebocada por um trator, que segue paralela à colhedora e, quando carregada, transporta a cana para os caminhões.

³ Mais detalhes podem ser obtidos em Torrezan (2003)

- Bizuti (2003) analisou o desempenho operacional de uma enfardadora cilíndrica, utilizando enleiradora de uma e duas passadas; constatou capacidade efetiva da enfardadora de 8,5 t/h e 12,9 t/h;

- Ripoli (2004) analisou os custos e índice de terra em dois sistemas de recolhimento de palha através de colheita integral e de enfardamento, obtendo os seguintes resultados: custo efetivo por equivalente energético da palha, posta na usina, de R\$ 5,62 e R\$ 10,90 respectivamente (valores em R\$ de 2004) e, índice de terra de 1,39% e 0,63%;

- Michelazzo (2005) estudou seis sistemas de recolhimento (colheita integral, picado a granel, fardo cilíndrico, fardo algodoeiro, peletização e briquetagem), realizando análise técnica de algumas características envolvidas no recolhimento da palha e uma análise econômica, através de um modelo de cálculo de custo, utilizando simulação de eficiências e capacidades operacionais de cada sistema de recolhimento estudado. Neste estudo, a colheita integral obteve o menor custo para distâncias de 10, 50 e 100 km;

- Hassuani et al. (2005) avaliaram 3 rotas de recolhimento de palha - alternativa 1: transporte de palha enfardada, alternativa 2: transporte de toda palha com colheita integral e separação na usina através de uma estação de limpeza a seco, alternativa 3: transporte de parte da palha com colheita integral e separação na usina através de uma estação de limpeza a seco. Nesse estudo, a alternativa 2 apresenta custo de recuperação da palha superior às demais. A alternativa 1 representa cerca de 41% do custo da alternativa 2 e a alternativa 3 representa cerca de 12%. Essa diferença pode ser explicada pela baixa densidade da carga, na alternativa 2, o que aumenta o custo com transporte;

- Mello (2009) estudou os desempenhos técnico, econômico e energético de uma enfardadora prismática com três tratamentos: 1 – sem enleiramento, 2 – enleiramento simples, 3 – enleiramento duplo. Os custos, para valores em R\$ de 2009, por tonelada de palha recolhida, R\$ 9,33, R\$ 7,45, e R\$ 10,49, nos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente. Vale ressaltar que para os custos somente foi considerado o enfardamento da palha, ou seja, não foram consideradas as operações de enleiramento, carregamento, transporte e descarregamento.

- Perea (2009) comparou recolhimento de palha em três usinas no estado de São Paulo. As formas de recolhimento analisadas foram: Usina A - recolhimento com forrageira com palha

enleirada e recolhimento com forrageira sem enleiramento; Usina B: recolhimento da palha em fardos cilíndricos; Usina C: colheita parcialmente integral com limpeza a seco na usina. Obtendo para recolhimento com forrageira com palha enleirada e sem enleiramento, respectivamente, 7,54% e 3,41% de impurezas, 10,7% e 13,92% de umidade e custo da palha na usina R\$ 58,14/t e R\$ 63,02/t (valores em R\$ de 2009); para recolhimento com enfardadora cilíndrica obteve 8% de impurezas, 16% de umidade e custo de R\$ 69,44/t posto na usina (valor em R\$ de 2009); para colheita integral os valores obtidos foram 3,2% de impurezas após a primeira sopragem e 0,75% após a segunda sopragem no sistema de limpeza a seco, a umidade nesse sistema variou entre 36,78% a 41,20%, em relação ao custo, cerca de R\$ 11,00/t correspondem ao custo da limpeza e R\$ 19,75 ao corte carregamento e transporte, totalizando R\$ 30,75/t como custo da palha posta na usina (valores em R\$ de 2009).

- Ripoli et al. (2003), apud Ripoli e Ripoli (2009), afirmam que, com a adoção do recolhimento de palha através da colheita integral, a tendência é que as colhedoras, por exigência do mercado, fiquem mais simples e, conseqüentemente, em torno de 20% a 30% mais baratas. A redução do preço da colhedora seria possível em função do recolhimento de palha concomitantemente com os colmos, o que diminuirá a exigência dos ventiladores, exaustores, mangueiras e outros componentes, permitindo manutenção mais rápida e mais barata.

- Cardoso et al. (2013) analisaram cenários de recolhimento de palha com fardos e colheita integral, considerando 30%, 50% e 70% de palha recolhida por hectare. O estudo faz parte deste trabalho, contudo não considerou a redução de perda na colheita com a diminuição da potência dos ventiladores da colhedora para colheita integral. Quando analisada a parte agrícola, com raio médio de 30 km e produtividade de 83 t de colmos por hectare, o sistema de colheita integral apresentou custos menores que o sistema de fardos. Quando analisado o modelo verticalizado de produção, fases agrícola e industrial, os fardos apresentaram melhor retorno econômico para cenários com mais de 30% de recolhimento de palha.

2.1.5. Aproveitamento da Palha

A palha de cana-de-açúcar pode ser utilizada de diversas formas, como mencionado nos itens 2.1.1 e 2.1.2. Com foco na fase industrial, foram analisados trabalhos que avaliam a

utilização da palha na indústria, para cogeração e/ou para possível produção de etanol de segunda geração. Destacamos os seguintes trabalhos:

- Scott (1977) e Scott et al. (1978) analisaram o efeito da palha de cana-de-açúcar nas taxas de extração das moendas, clarificação e qualidade do caldo em usinas da África do Sul, que apresentavam índices de 2% a 5% de ponteiros e de 3% a 10% de palha. Seus resultados apontam que a palha pode reduzir a qualidade da extração interferindo na recuperação e qualidade do açúcar.

- Bovi e Serra (2001), avaliaram o efeito da presença de folhas verdes, folhas secas e fibra do colmo na clarificação do caldo por decantação, avaliando a cor do caldo clarificado e o volume de lodo decantado, utilizando acréscimos de 0,25%, 0,50% e 0,75% sobre o teor de fibra da cana. Para cada 1% de folhas verdes, foi verificado aumento da cor do caldo, em cerca de 0,73%, e do volume de lodo, em torno de 3,67%. Por outro lado, para cada 1% de folha seca presente na cana, foi verificado aumento na cor do caldo clarificado em torno de 1,89% e aumento de 8,78% do volume de lodo. A fibra do colmo não alterou a clarificação do caldo.

- Kent (2008), em estudo realizado na Austrália, analisou o efeito da palha na usina. Verificou redução na taxa de extração, tanto nas moendas como também nos difusores, e redução na pureza do caldo, o que diminui a produção de açúcar e aumenta a produção de melaço.

- Muir e Eggleston (2009) e Muir et al. (2009), em estudos realizados na África do Sul, lembram que a cana queimada é mais suscetível à deterioração que a cana crua. Nos estudos citados, apontam que a presença de palha reduz o rendimento da moenda e que as folhas verdes têm maior potencial para alterar a cor do caldo e que cada 1% de acréscimo de palha resulta em perda de 0,2% de açúcar.

- Slade et al. (2009) apontam que a produção de etanol combustível na Europa, a partir de biomassa lignocelulósica, apresenta potencial para aumentar a capacidade de produção deste biocombustível, minimizando os impactos ambientais negativos.

- Felipe (2010) destaca que a colheita de cana queimada proporciona perda de massa de 0,3% a 2,6% contudo, melhora o rendimento da colhedora em 20%. Já a colheita mecanizada de cana crua apresenta altos índices de impurezas (mineral e vegetal), comprometendo o rendimento final na indústria. A autora destaca também a importância de se pensar na integração de um

módulo de produção de etanol de segunda geração, através da hidrólise do bagaço e/ou palha de cana, integrada com a produção de etanol de primeira geração.

- Galbe e Zacchi (2010) indicam que a expectativa é que as plantas 1G2G, plantas de etanol 2G integradas às plantas de etanol 1G, proporcionem aumento na produção de etanol, redução na demanda de energia e redução nos custos de produção, quando comparadas às plantas de etanol 2G independentes.

- Seabra (2008) avaliou aproveitamento da biomassa de cana-de-açúcar (bagaço e palha) considerando quatro tecnologias: geração de energia elétrica através da cogeração com ciclos a vapor, produção de etanol através da hidrólise, geração de energia elétrica a partir da gaseificação da biomassa integrada a ciclos combinados e a produção de combustíveis de síntese a partir da gaseificação da biomassa. Em relação à cogeração com ciclos a vapor concluiu que a palha, em conjunto com o bagaço, permitiria a geração de excedentes de energia elétrica superiores a 140 kWh/tc com o uso caldeiras de alta pressão combinadas à redução de consumo de vapor no processo industrial.

- Dias et al. (2012a) compararam a produção de etanol de segunda geração com a produção de eletricidade e concluem que o etanol de segunda geração é viável fazendo-se uso da palha e com melhorias nas tecnologias de hidrólise, já que a tecnologia atual apresenta baixo rendimento.

- Santos et al. (2012) analisaram o potencial de produção de etanol com palha de cana-de-açúcar e concluem que a palha pode contribuir significativamente para o aumento de produção de etanol para suprir o futuro aumento de sua demanda através do aproveitamento integral da cana-de-açúcar (inclusive palha e bagaço) e por meio das biorrefinarias. Entretanto, alertam que ainda são escassas as informações sobre o potencial aproveitamento da palha de cana-de-açúcar para a produção de etanol.

- Dias et al. (2012b) consideraram diferentes níveis de integração entre as plantas de produção de etanol de primeira e segunda geração a partir de cana-de-açúcar; concluíram que a planta de primeira e segunda geração integradas usando tecnologias avançadas de hidrólise com fermentação de pentoses, apresenta várias vantagens sobre a planta de segunda geração independente de produção de etanol, com maior produção de etanol e os melhores resultados

econômicos. Além do mais, se o solvente utilizado na deslignificação alcalina for recuperado, esta configuração também apresenta os melhores impactos ambientais.

- Leal et al. (2013) consideram que a palha de cana-de-açúcar ainda tem uso incipiente para produzir energia, porém, apresenta grande potencial para complementar o bagaço na produção de eletricidade excedente ou de etanol de segunda geração; concluem que a viabilidade da integração 1G2G, capaz de aumentar a produção de etanol por área cultivada, requer a utilização de parte da palha disponível com a colheita mecanizada de cana crua.

- Dias et al. (2013) analisaram três cenários de utilização da palha em destilarias autônomas: 1 - todo o excedente de material lignocelulósico (bagaço e palha) é usado para a produção de etanol de segunda geração; 2 - todo o excedente de material lignocelulósico é usado para a produção eletricidade; 3- flexibilidade no uso do excedente de material lignocelulósico, com produção de etanol de segunda geração e/ou eletricidade. O estudo concluiu que o cenário que produz mais etanol apresenta maiores impactos ambientais por unidade de etanol produzido, se comparado aos cenários com configurações para produção máxima de eletricidade, devido ao uso de produtos químicos na produção de etanol de segunda geração. Concluíram, também, que a flexibilidade da biorrefinaria, no uso do excedente de bagaço e palha, apresenta melhores resultados econômicos e ambientais.

3. METODOLOGIA

A questão central neste trabalho é identificar e analisar os impactos produzidos pelo recolhimento e aproveitamento da palha de cana-de-açúcar, analisando a forma de colheita de cana adotada, a quantidade de palha retirada, o transporte e o uso da palha, considerando aspectos socioeconômicos e ambientais, identificando inovações tecnológicas com impactos positivos.

A metodologia foi dividida em cinco etapas. A primeira destina-se à definição dos cenários de estudo e das combinações das rotas tecnológicas (agrícola e industrial) que foram analisadas. As etapas dois e três referem-se, respectivamente, à descrição da análise de viabilidade técnica e da análise de viabilidade econômica das rotas de recolhimento. Nestas etapas são definidos os parâmetros técnicos e econômicos adotados, compreendendo a parte agrícola, usando-se, para isto, o CanaSoft - e a parte industrial – realizada com o auxílio do Aspen Plus[®]. A quarta etapa é constituída pela descrição para a análise dos impactos ambientais através da Análise de Ciclo de Vida (ACV), com utilização do método CML, através do software SimaPro[®]. A quinta etapa diz respeito à descrição da análise dos impactos socioeconômicos, realizada através do Modelo de Insumo-Produto, com coeficientes técnicos dos setores sucroenergéticos provenientes do CanaSoft e Aspen Plus[®]; os coeficientes dos demais setores da economia foram estimados a partir de uma Matriz Inter-regional de Insumo-Produto⁴ da economia brasileira, relativa ao ano de 2008.

3.1. Cenários Tecnológicos

3.1.1. Fase Agrícola

Para os cenários agrícolas, a construção foi baseada em tecnologias já existentes (colhedora convencional) e em tecnologia em desenvolvimento (ETC). Neste estudo, o cenário sem recolhimento de palha, com colhedora convencional, será utilizado como referência, a fim de possibilitar a comparação com os demais cenários que contemplam o recolhimento e aproveitamento da palha. Os parâmetros adotados para a ETC foram definidos pelo Programa

⁴ fornecida pelo Prof. Dr. Joaquim José Martins Guilhoto, do Núcleo de Economia Regional e Urbana da USP (NEREUS) vinculado ao Departamento de Economia (EAE) da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/USP-SP).

Agrícola (PAG) do CTBE, responsável pelo desenvolvimento dessa proposta alternativa de mecanização.

Os parâmetros básicos para a fase agrícola utilizados neste trabalho são:

- Produtividade de 82,17 toneladas de colmo por hectare, que corresponde à média de produtividade das safras de 2004/2005 a 2013/2014, no estado de São Paulo (CONAB, 2013b);

- ATR: 140 kg por tonelada de colmo (BONOMI et al., 2012);

- Quantidade de palha aderida ao colmo, representa 4,8% da carga de colmos (HASSUANI et al., 2005);

- O módulo de plantio da ETC utiliza mudas selecionadas, produzidas em viveiros, com custo 50% maior que as mudas utilizadas no plantio mecanizado convencional (PAG/CTBE);

- Transporte de colmos e palha em caminhões do tipo Rodotrem, com capacidade volumétrica de 184 m³. A densidade de carga varia de acordo com as quantidades de recolhimento de palha;

- Raio médio⁵ de transporte de 25 km (CONAB, 2010b);

- Para recolhimento através de colheita integral, o extrator da colhedora tem sua ventilação reduzida, ou até mesmo desligada, dependendo da quantidade de palha que se deseja recolher. Para os cenários com ETC sem ponteiro, há o corte dos ponteiros, que são lançados ao solo, juntamente com o restante da palha que não será recolhida. Quando há o cenário de palha repicada, após o corte dos ponteiros, a palha solta que vem junto com os colmos é separada e direcionada para um picador e repicada para diminuir seu tamanho, permitindo que se acomode nos interstícios dos colmos, aumentando a densidade de carga, de acordo com dados do relatório interno do CTBE (AGRICEF, 2011). Esta repicagem é necessária dado que o picador da colhedora não consegue cortar eficientemente a palha;

- Para recolhimento através de fardos, a palha é lançada ao solo tanto nos cenários com a colhedora convencional quanto para a ETC. Depois, nos cenários de colhedora convencional, a palha é enleirada e enfardada. No entanto, considerou-se que a ETC retira os ponteiros, lançando-os ao solo e o restante da palha, a cada seis linhas de cana, é lançada para uma única linha de cana colhida, dispensando a operação de enleiramento. É importante ressaltar que desta forma, além da eliminação do enleiramento, os ponteiros de 5 linhas, a cada 6 linhas de cana, permanecem no solo, ou seja, mais de 80% de ponteiros (palmitos e folhas verde);

⁵ Distância média entre os canaviais e a usina

- Foi considerado período de safra com 167 dias efetivos (CGEE, 2009);
- Usina com capacidade de moagem anual de 2 milhões de toneladas de colmo, processando 500 toneladas de colmo por hora (CGEE, 2009);
- Considerou-se que a quantidade de palha (folhas verdes, folhas secas e ponteiros) produzida corresponde a, aproximadamente, 140 kg de palha (base seca) por tonelada de colmo produzida (CGEE, 2009; HASSUANI et al., 2005; RIPOLI; RIPOLI, 2009), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Configuração da palha por tonelada de colmo no momento da colheita

	Base seca (Kg/t colmo)	Base úmida (Kg/t colmo)	Umidade (%)
Folhas secas	100	120	14
Folhas verdes	30	100	67
Palmitos	10	40	82
Total	140	250	45

Fonte: Hassuani et al. (2005)

Para análise dos impactos, foram consideradas 3,2 t, 5,4 t e 7,5 t de palha recolhida (base seca) por hectare, duas formas de recolhimento de palha para a colhedora convencional e quatro tipos de recolhimento para a ETC, compondo 14 rotas tecnológicas, como se pode observar na Figura 12.

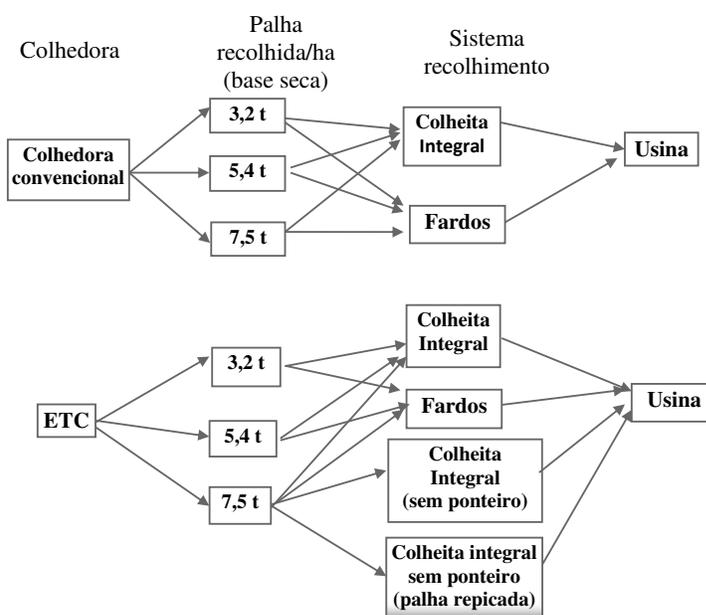


Figura 12: Cenários de recolhimento de palha

As quantidades recolhidas de palha consideradas foram adotadas com o intuito de avaliar o recolhimento de pequena, média e grande quantidade. Assim, por hectare colhido, assumiu-se 3,2 t de palha, que corresponde aproximadamente a 30% da palha disponível⁶ para recolhimento; 5,4 t - que corresponde a, aproximadamente, 50% da palha disponível e 7,5 t, que corresponde aproximadamente a 70% de palha disponível. A quantidade de 7,5 t de palha (base seca) também se refere à quantidade de palha disponível quando são retirados os ponteiros, aproximadamente. Considerando a produtividade de 82,17 t/ha.

3.1.2. Fase Industrial

Para uso na usina foram consideradas duas possibilidades: geração de eletricidade e/ou produção de etanol de 2ª geração. Para a produção de etanol de 2ª geração, a tecnologia utilizada é 2G integrada à planta 1G, ou seja, 1G2G, e foram considerados os cenários com 7,5 t/ha de palha recolhida com a colhedora convencional e ETC, colheita integral e fardos, e colheita integral com ETC sem ponteiro repicada, totalizando 5 cenários com tecnologia 1G2G.

Para os cenários industriais, foram consideradas usinas com destilarias anexas⁷, com tecnologia otimizada⁸, que pode ser considerada como tecnologia na margem, em termos tecnológicos⁹, produzindo açúcar, etanol anidro, etanol hidratado e excedentes de eletricidade. A Tabela 3 apresenta a configuração básica da usina, adotada pela BVC, de acordo com cada cenário analisado.

⁶ Desconsiderando 4,8% da carga de impureza vegetal, composta basicamente por palha aderida aos colmos (HASSUANI et al., 2005).

⁷ Usinas com destilarias anexas: possuem destilarias, adaptadas ao complexo industrial de fabricação de açúcar, que produzem etanol a partir do caldo/mel final da usina de açúcar.

⁸ Utilizam caldeiras de alta pressão, peneira molecular, integração térmica, moendas eletrificadas (BONOMI et al., 2012).

⁹ Exceto pela caldeira, pois já existe no mercado caldeiras com pressão superiores a 65 bar.

Tabela 3: Configuração básica da usina

Dados da simulação	1G	1G2G
Usina com destilaria anexa	Sim	Sim
Parcela de caldo para etanol	50,0%	50,0%
Utiliza palha	Não	Sim
Pressão da Caldeira	65 bar	65 bar
Integração Térmica	Sim	Sim
Etanol produzido	Misto	Misto
Anidro (em volume)	40,0%	40,0%
Hidratado (em volume)	60,0%	60,0%
Processo de Desidratação	Peneira Molecular	Peneira Molecular
Exporta energia elétrica	Sim	Sim
Comercializa excedente lignocelulósico (bagaço)	Não	Não
Planta 1G anexa à planta 2G	Não	Sim
Tecnologia de hidrólise	Não se aplica	Futura
Pentoses	Não se aplica	Fermentação
Recolhimento de palha	Não	Fardos

Fonte: Bonomi et al. (2012)

A planta industrial considera uma possível integração térmica entre as correntes quentes e frias do processo, o que possibilita redução de 20% no consumo de vapor (DIAS et al., 2011). De acordo com as simulações realizadas, as unidades que produzem etanol de primeira geração (1G) consomem, em média, 345 kg de vapor por tonelada de cana processada (TC) e, as unidades que produzem etanol de segunda geração (1G2G) apresentam consumo médio de 581 kg de vapor/TC. Os valores de consumo de vapor em cada cenário industrial analisado estão na Tabela 15, item 3.2.2..

3.2. Parâmetros técnicos adotados

Com o objetivo de avaliar o sucesso de desenvolvimentos tecnológicos, o Programa de Avaliação Tecnológica do CTBE vem desenvolvendo uma plataforma integrada de simulação computacional, denominada Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC)¹⁰. Através da simulação computacional de processos, a BVC estima os impactos socioeconômicos e ambientais, de uma nova tecnologia comparada a uma cadeia de produção de referência do setor.

¹⁰ Detalhes sobre Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar e atividades do Programa de Avaliação Tecnológica do CTBE estão em Bonomi et al. (2012).

Neste trabalho, utilizou-se a BVC para mensurar a viabilidade econômica e os impactos ambientais, dos cenários descritos no item 3.1, analisando de forma integrada as fases agrícola e industrial com recolhimento e uso da palha de cana-de-açúcar. Em relação aos impactos socioeconômicos, a BVC possibilitou a obtenção dos coeficientes técnicos, necessários para o modelo de Insumo-Produto, das rotas de produção processamento de cana (e palha) dos cenários avaliados.

3.2.1. Fase Agrícola - CanaSoft

Para a simulação da etapa agrícola de produção da cana-de-açúcar, o Programa de Avaliação Tecnológica, com o auxílio do Programa Agrícola, tem desenvolvido um modelo computacional para simulação e quantificação de parâmetros importantes para avaliações técnicas, econômicas (em termos de custos e rentabilidades) e ambientais das práticas agrícolas no sistema de produção de cana-de-açúcar, denominado CanaSoft.

O CanaSoft é desenvolvido a partir de planilhas eletrônicas e integra vários módulos de cálculo. A partir dos principais parâmetros que descrevem um sistema de produção, o modelo calcula os custos de produção da cana-de-açúcar e também o seu inventário do ciclo de vida.

Principais módulos de cálculo do CanaSoft:

- Descrição do cenário - neste módulo são informados: moagem da usina (para determinar a produção de cana), ciclo da cana (cana de ano ou de ano e meio e número de cortes), produtividade da cana (por hectare colhido e hectare plantado), fator de aglomeração da cultura¹¹ (relacionado com produtividade e área plantada), área e tipo de plantio, número de cortes, quantidade de mudas utilizadas, tipo de colheita, recolhimento de palha, tipo de transporte, aplicação de resíduos industriais e propriedade da terra (própria ou arrendamento).

- Operações - são descritas todas as operações realizadas no processo de produção de cana de açúcar, compreendendo: pré-plantio (preparo do solo), plantio, tratos culturais, corte, carregamento e transporte - considerando as máquinas e implementos utilizados - parâmetros de desempenho (eficiências operacionais, gerenciais e de manutenção), consumo de óleo diesel e utilização efetiva.

¹¹ Fator de aglomeração: determina o raio médio em função da área disponível para cana

- Maquinário - considera a potência das máquinas, custo, peso, depreciação, vida útil, velocidade da operação, largura operacional e capacidade operacional.

- Insumos - define os insumos utilizados (mudas, calcário, gesso, torta de filtro, vinhaça, cinzas, inseticida, nematicida, herbicida, maturador, fertilizante e fio de amarração para cenários com fardos).

- Inventário para ACV - este módulo analisa os fatores de emissões de GEE, decorrentes de todas as operações da produção de cana-de-açúcar, incluindo a quantidade e o material envolvido na fabricação dos maquinários utilizados, combustível, quantidade e tipo de insumo.

Neste trabalho, para os cenários analisados, foram admitidos as mesmas operações e parâmetros para pré-plantio.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros usados para o plantio nos cenários analisados. Para os cenários com colhedora convencional, foram consideradas plantadoras, com largura operacional de 3 m, tracionadas por tratores, com potência de 175 cv e fator de utilização de potência de 0,55.

Para os cenários com ETC, foi considerado o módulo de plantio da ETC, acoplado à máquina base que possui 320 cv de potência, com fator de utilização de potência de 0,70 para o plantio e largura operacional de 9 m.

A velocidade considerada para o plantio foi de 2 m/s, para os cenários com colhedora Convencional e para os cenários com ETC.

Tabela 4: Parâmetros utilizados no plantio

Plantio	Mudas utilizadas (t/ha)	Largura operacional (m)	Velocidade (m/s)	Potência da máquina (cv)	Fator de utilização de potência
Cenários com colhedora Convencional	16	3	2	175	0,55
Cenários com ETC	7	9	2	320	0,70

O módulo de plantio da ETC é projetado para ter uma melhor distribuição das mudas, quando comparada com a plantadora convencional, sendo utilizadas 16 toneladas de mudas¹² por hectare nos cenários com plantadoras convencionais e 7 toneladas por hectare para os cenários com ETC. Outro ponto importante é a qualidade; as mudas utilizadas pela ETC são selecionadas

¹² Quantidade média de mudas, por hectare, utilizadas no plantio com a colhedora convencional

o que permite o uso de uma quantidade menor de mudas por hectare¹³, além de melhor distribuição das mudas, com o plantio de precisão. Como já mencionado no item 3.1, o custo (por tonelada) das mudas utilizadas pelo módulo de plantio da ETC é 50% maior que o custo das mudas convencionais.

Com a retirada de parte da palha, o solo deixa de aproveitar os nutrientes nela contidos. A Tabela 5 mostra as quantidades de fósforo, potássio e nitrogênio, considerando base seca de palha.

Tabela 5: Nutrientes na Palha em base seca (bs)

	P₂O₅ (%)	K₂O (%)	N (%)
Folhas secas	0,05	0,27	0,5
Folhas verdes	0,20	1,33	1,0
Palmito	0,25	2,95	0,8

Fonte: Hassuani et al. (2005)

As folhas verdes e palmitos, que compõem o ponteiro, além de maior quantidade de água (Tabela 2), também possuem maior quantidade de nutrientes (Tabela 5). Quando se recolhe palha através do enfardamento as proporções de folhas secas, palmitos e folhas verdes recolhidas são as mesmas para diferentes quantidades de recolhimento. Isto ocorre porque o material é todo lançado ao solo para, depois de atingir a umidade de 13%, ser enleirado e posteriormente enfardado. Quando o recolhimento de palha se dá através da colheita integral, a proporção não se mantém, pois com menor potência do extrator da colhedora, mais folhas secas permanecem na carga (Tabela 6).

¹³ A plantadora convencional também pode utilizar mudas selecionadas, entretanto, neste trabalho considerou-se que somente a ETC usa este tipo de mudas.

Tabela 6: Composição da palha recolhida

		Composição da carga (kg _{bs} /kg _{bs})			
		Palha Recolhida	Folha seca (%)	Palmito (%)	Folha verde (%)
Convencional	Fardos	3,2 t/ha	71,6	5,3	23,1
		5,4 t/ha	71,6	5,3	23,1
		7,5 t/ha	71,6	5,3	23,1
	Integral	3,2 t/ha	49,7	14,0	36,3
		5,4 t/ha	67,3	8,9	23,9
		7,5 t/ha	77,0	6,2	16,8
ETC	Fardos	3,2 t/ha	93,8	1,2	5,0
		5,4 t/ha	93,8	1,2	5,0
		7,5 t/ha	93,8	1,2	5,0
	Integral	3,2 t/ha	49,9	13,9	36,2
		5,4 t/ha	67,5	8,8	23,7
		7,5 t/ha	77,2	6,1	16,7
	Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	100,0	0,0
Integral sem ponteiro repicada		7,5 t/ha	100,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado a partir de Hassuani et al. (2005)

Os tratos culturais são os mesmos para os cenários com a colhedora convencional e para os cenários com a ETC, exceto pela quantidade de fertilizante utilizada. A reposição de fertilizantes após a colheita e retirada da palha e, portanto, é realizada na cana soca. Considerou-se que os nutrientes contidos na palha retirada, em cada cenário, são repostos com fertilizantes para a cana soca, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7: Nutrientes retirados com a palha e reposição com aplicação de fertilizantes

		Nutrientes retirados com a palha (kg/ha.ano)			Fertilizantes Aplicados ⁽¹⁾ (kg/ha.ano)				
Palha Recolhida		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅ ^(*)	K ₂ O		
Convencional	Cenário Base	-	-	-	120,00	-	120,00		
	Fardos	3,2 t/ha	20,20	3,05	21,00	140,20	3,05	141,00	
		5,4 t/ha	34,09	5,14	35,44	154,09	5,14	155,44	
		7,5 t/ha	47,35	7,14	49,22	167,35	7,14	169,22	
	Integral	3,2 t/ha	23,16	4,24	32,98	143,16	4,24	152,98	
		5,4 t/ha	34,88	5,59	41,09	154,88	5,59	161,09	
		7,5 t/ha	45,19	6,56	45,97	165,19	6,56	165,97	
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	16,92	1,92	11,34	136,92	1,92	131,34
			5,4 t/ha	28,55	3,23	19,13	148,55	3,23	139,13
7,5 t/ha			39,65	4,49	26,57	159,65	4,49	146,57	
Integral		3,2 t/ha	23,13	4,23	32,87	143,13	4,23	152,87	
		5,4 t/ha	34,86	5,58	40,93	154,86	5,58	160,93	
		7,5 t/ha	45,15	6,55	45,84	165,15	6,55	165,84	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	37,50	3,75	20,25	157,50	3,75	140,25	
Integral sem ponteiro repicada		7,5 t/ha	37,50	3,75	20,25	157,50	3,75	140,25	

(1) – Cana Soca

(*) A aplicação de P₂O₅ é realizada na cana planta, havendo somente a reposição com a retirada da palha

Para os cenários onde o ponteiro é deixado no campo, a reposição de nutrientes através de fertilizantes é menor se comparada com o cenário onde se retira o ponteiro. Quando comparados os cenários da colhedora convencional e ETC com fardos, a diferença de retirada de nutrientes se dá em função da forma como a ETC separa a palha dos colmos, deixando parte dos ponteiros no campo (item 3.1).

A colheita mecanizada de cana-de-açúcar ainda apresenta índices elevados de perda e, de acordo com Rosa et al. (2009), podem atingir 15% da cana colhida. Segundo Ueno e Izumi (1995), apud Mello e Harris (2003), índices de perdas entre 10% e 15% são frequentes em colheita mecanizada de cana crua. Magalhães et al. (2006) estimaram, com dados do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), perdas de 10% na colheita mecanizada. Estes índices de perdas estão associados a diversos fatores, tais como: estrutura do talhão, relevo, preparo do solo, variedade da cana, treinamento do operador da colhedora, manutenção das lâminas do corte basal e velocidade do extrator (BENEDINI et al., 2009; RIPOLI; RIPOLI, 2009, SHOGOR et al., 2009). As perdas da colheita são classificadas como perdas visíveis e invisíveis. As visíveis se

caracterizam por perda de pedaços de colmos lançados pelo extrator da colhedora, corte de base acima da altura ideal, por falha no sistema de alimentação da colhedora e pelo arranquio de soqueiras (NEVES et al., 2004; VOLPATO, 2001; VOLPATO et al., 2002). As perdas invisíveis podem chegar a 5,4% (Neves et al., 2003) e são caracterizadas por perda de caldo ou estilhaços de cana ocasionados pelo sistema de corte e limpeza das colhedoras (RIPOLI; RIPOLI, 2007).

Estudos apontam que as perdas na colheita de cana crua estão diretamente relacionadas com a velocidade do extrator primário, ou seja, quanto maior a rotação do extrator, maior será a perda (HASSUANI et al., 2005; NEVES et al., 2004; NEVES et al., 2006). Para o recolhimento de palha através da colheita integral, junto com os colmos, é necessário que se diminua a potência dos extratores da colhedora, de acordo com a quantidade de recolhimento desejada.

Para o cenário Base (sem recolhimento de palha), e para recolhimento através de fardos, adotou-se o índice de 10% estimado por Magalhães et al. (2006). Para a ETC, as perdas são menores, pois o processo de colheita é projetado com sistema de corte de base flutuante, sistema de alimentação contínuo e extrator primário com melhor direcionamento do ar. Foi estimada perda de 5% para a colheita com ETC. Para calcular a redução da perda de colmos em função da quantidade de palha recolhida através da colheita integral, onde a potência do extrator é diminuída, foram adotados os dados de Hassuani et al. (2005), assumindo-se o mesmo comportamento para a ETC, de acordo com a Figura 13 .

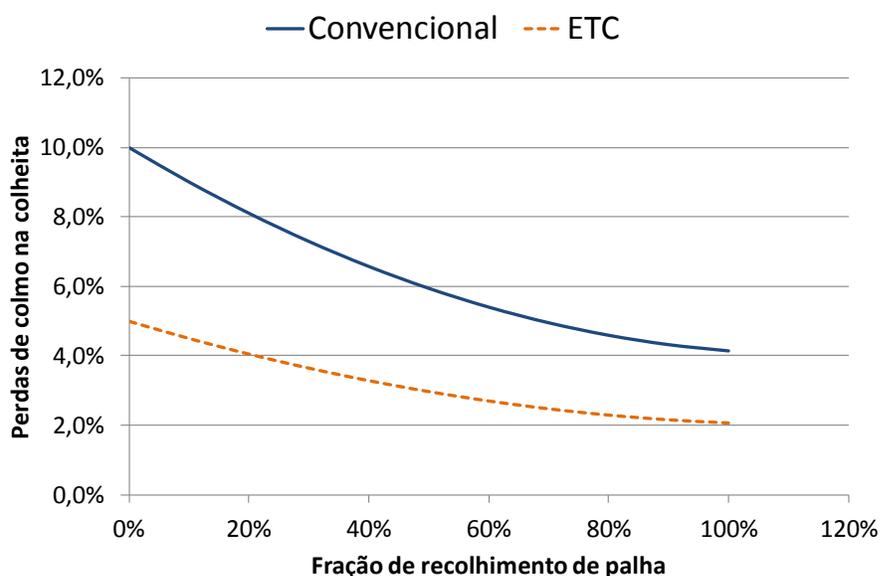


Figura 13: Perda na colheita em função do recolhimento de palha através da colheita integral

Fonte: Elaborado a partir de Hassuani et al. (2005)

Com menor perda na colheita, a produtividade real do canavial (quantidade de cana produzida por hectare) é maior que a produtividade observada (quantidade efetivamente recuperada por hectare), por área colhida e área plantada, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Produtividade real e produtividade observada

	Convencional					ETC			
	Base	Fardos	Integral 3,2 t/ha	Integral 5,4 t/ha	Integral 7,5 t/ha	Fardos	Integral 3,2 t/ha	Integral 5,4 t/ha	Integral 7,5 t/ha
Produtividade Real¹ (t/ha)*	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3
Produtividade Observada² (t/ha)*	82,2	82,2	84,6	85,9	86,8	86,7	88,0	88,6	89,1
Produtividade observada área plantada (t/ha)	79,0	79,0	81,4	82,7	83,6	85,3	86,6	87,2	87,7

* Área colhida; ¹ produtividade total do canavial, sem considerar as perdas; ² produtividade observada de acordo com as perdas na colheita

Além de menor perda, o sistema de alimentação contínua da ETC evita que a cana colhida se acumule, provocando “embuchamento” - termo bastante usado pelo setor. Para que a máquina seja capaz de recolher a cana acumulada no alimentador, é necessário aumentar a utilização de potência da máquina, induzindo a altos valores de potência total instalada nas colhedoras de cana-de-açúcar. Eliminar o acúmulo de cana no sistema de alimentação (embuchamento) permite reduzir a potência total instalada na colhedora. Somado a isso, as trilhas de tráfego da ETC devem ser mais compactadas, mais uniformes e com menor resistência ao rolamento.

Desta forma, a ETC colhendo duas linhas de cana, conseguirá operar com potência total de 320 cv, com fator de utilização de potência de 0,80, que é proporcionalmente menor que a colhedora convencional, que colhe uma linha com fator de utilização de potência de 0,7 e potência de 358 cv (Tabela 9).

Tabela 9: Parâmetros da colhedora

Colheita	Largura operacional (m)	Potência (cv)	Fator de utilização de potência
Cenários Convencional	1,5	358	0,70
Cenários ETC	3	320	0,80

Com a redução da potência dos extratores na colheita integral, é possível aumentar a velocidade da colheita. A colheita nos cenários com recolhimento através de fardos (3,2 t, 5,4 t e 7,5 t) apresentam as mesmas características do cenário Base (sem recolhimento). A velocidade e a capacidade efetiva de colheita, para cada cenário analisado, estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Velocidade e capacidade efetiva de colheita

	Colheita	Velocidade (m/s)	Capacidade efetiva (t colmo/dia)
Convencional	Base (sem recolhimento) e Fardos	1,50	715
	Integral (3,2 t/ha)	1,55	760
	Integral (5,4 t/ha)	1,58	787
	Integral (7,5 t/ha)	1,61	811
ETC	Fardos	1,50	1.510
	Integral (3,2 t/ha)	1,55	1.588
	Integral (5,4 t/ha)	1,59	1.639
	Integral (7,5 t/ha)	1,63	1.685
	Integral sem ponteiro (7,5 t/ha)	1,50	1.551
	Integral sem ponteiro repicada (7,5 t/ha)	1,23	1.269

Com o recolhimento de palha, através da colheita integral, o volume de material recolhido é maior, tanto pela velocidade da colheita quanto pelo acréscimo da palha; o número de conjuntos de transbordos utilizados deve acompanhar essa mudança. O número de conjuntos de transbordos necessários por colhedora, para cada cenário, foi determinado, com base nos dados de IDEANews (2012), considerando-se:

- Carregamento: velocidade da colhedora, produtividade da lavoura, espaçamento da lavoura, capacidade do transbordo, metros lineares por hectare de lavoura, quantidade de cana por metro linear, quantidade de cana colhida por minuto, tempo para encher o conjunto de transbordo.

- Deslocamento (carregado): velocidade de deslocamento cheio, distância até o ponto de transbordamento, tempo de deslocamento até o ponto de transbordamento.

- Descarregamento: tempo de ciclo de transbordamento de cada transbordo, tempo auxiliar entre transbordamento do 1º e 2º transbordo, tempo total de transbordamento.

-Deslocamento (descarregado): velocidade de deslocamento vazio, distância até a colhedora em operação e tempo de deslocamento até o ponto de colheita.

Cada conjunto de transbordo é composto por um trator de 180,0 cv de potência e dois transbordos, com capacidade unitária de 24 m³. A Tabela 11 mostra o número de plantadoras (ou módulo de plantio), colhedoras (ou módulo de colheita) e conjuntos de transbordos necessários para cada colhedora/ETC, de acordo com os parâmetros de cada máquina e operação, considerando colheita de 2 milhões de toneladas de colmos ao ano, já descontadas as perdas.

Tabela 11: Número de máquinas requeridas nos cenários

		Número de Plantadoras	Colhedoras / ETC	Conjuntos de transbordos (por colhedora/ETC)
Convencional	Base (sem recolhimento) e Fardos	6,79	32,5	2,1
	Integral (3,2 t/ha)	6,58	30,5	2,5
	Integral (5,4 t/ha)	6,48	29,5	2,7
	Integral (7,5 t/ha)	6,41	28,6	3,0
ETC	Fardos	2,27	15,0	3,3
	Integral (3,2 t/ha)	2,24	14,3	4,0
	Integral (5,4 t/ha)	2,22	13,8	4,6
	Integral (7,5 t/ha)	2,21	13,5	5,1
	Integral sem ponteiro (7,5 t/ha)	2,21	14,6	4,5
	Integral sem ponteiro repicada (7,5 t/ha)	2,21	17,9	2,9

Para o transporte de colmos, colmos mais palha (colheita integral) e fardos foram considerados caminhões do tipo rodotrens, com capacidade de 184 m³ cada. O número de caminhões necessários para o transporte foi determinado de acordo com a densidade de carga em cada cenário. A Tabela 12 apresenta as densidades de carga dos rodotrens, para transporte de colmos e colmos mais palha, de acordo com a quantidade de palha recolhida.

Tabela 12: Densidade da carga para transporte de colmos e colmos + palha

		Densidade da Carga (kg/m ³)
Convencional	Base (sem recolhimento)*	326,1
	Integral (3,2 t/ha)	259,5
	Integral (5,4 t/ha)	225,4
	Integral (7,5 t/ha)	202,2
ETC	Integral (3,2 t/ha)	262,5
	Integral (5,4 t/ha)	228,2
	Integral (7,5 t/ha)	204,5
	Integral sem ponteiro (7,5 t/ha)	221,9
	Integral sem ponteiro repicada (7,5 t/ha)	326,1

* Para os cenários com recolhimento de palha através de fardos, para colhedora convencional e ETC, a densidade de carga dos colmos é igual à densidade do cenário Base, 326,1 kg/m³.

Para o cálculo do número de caminhões necessários, além da densidade de carga também foi considerado que, como mencionado anteriormente, 4,8% da carga de colmos é composta por impurezas vegetais (principalmente palha aderida aos colmos).

Para transporte dos fardos, considerou-se a densidade de 180,0 kg/m³ por fardo, com dimensões 0,9 m x 1,2 m x 2,3 m. Assim, cada rodotrem carrega 33,1 t de palha enfardada (com 13% de umidade).

É importante ressaltar que nos cenários com ETC, como há menor perda na colheita, há menor área colhida para atingir 2 milhões de toneladas de colmos e, conseqüentemente, uma vez que foi fixada a quantidade de palha recolhida por hectare, a quantidade de palha recolhida por safra é menor (Tabela 13).

Tabela 13: Palha recolhida, de acordo com cenários

		Convencional (t_{bs}/safra)	ETC (t_{bs}/safra)
Fardos	3,2 t/ha	81.042	74.997
	5,4 t/ha	136.759	126.558
	7,5 t/ha	189.942	175.775
Integral	3,2 t/ha	78.581	73.917
	5,4 t/ha	130.558	123.818
	7,5 t/ha	179.404	171.100
Integral sem ponteiro	7,5 t/ha		171.100
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha		171.100

Com relação ao uso de óleo diesel, seu preço foi admitido como R\$ 2,20 por litro, que corresponde ao valor corrigido para 2011 da média do preço ao consumidor para região Sudeste, de 2003 a 2012, considerando preços constantes (corrigidos pelo IPCA), de acordo com o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2013 (www.anp.gov.br).

De maneira análoga, o valor do ATR considerado foi de R\$ 0,392 por kg de ATR, que é a média dos valores constantes de ATR no período de 2003 a 2013, corrigido para o ano de 2011, de acordo com dados da Consecana/Unica. Considerou-se que a tonelada de cana-de-açúcar possui 140 kg de ATR (BONOMI et al., 2012).

Para o cálculo do custo da palha, para os cenários com fardos, considerou-se a diferença de custo entre o cenário Base (sem recolhimento) e o cenário com recolhimento. Para os cenários de recolhimento com colheita integral, a diferença de custo entre o cenário Base e o cenário com recolhimento foi dividida proporcionalmente às massas de palha (base úmida) e de colmo recolhidos a mais, em função da menor perda na colheita com a diminuição da velocidade do extrator da colhedora/ETC. Desta forma, o custo da tonelada de colmo foi recalculado de acordo com o total de colmos recuperados por hectare total e o custo da tonelada de palha, em base seca, por hectare total.

Para estimar o preço da tonelada de palha, tomou-se como base o cálculo do preço da tonelada de cana utilizado pelo Consecana (www.udop.com.br), onde o valor do ATR é dado em função do preço médio dos produtos (etanol e açúcar) no mercado externo e interno e, da participação do custo da cana nos custos dos produtos (etanol e açúcar). De acordo com a

Consecana, a partir da safra 2005/2006, a participação da cana no custo do etanol representa 62,1% e 59,5% no açúcar¹⁴. Considerou-se, ainda, a energia elétrica produzida pela palha e o preço médio do MWh. Admitindo que o potencial de produção de eletricidade da palha é de 1498,0 kWh/t e que a eficiência do Turbo gerador é de 83,4%, têm-se a produção média de 1248,5 kWh por tonelada de palha (de acordo com as simulações da BVC). Assim, uma tonelada de palha produz, aproximadamente, 1,25 MWh. Considerando R\$ 110,23 o preço médio do MWh, uma tonelada de palha (base seca), usada para produção de eletricidade, tem receita de R\$ 137,62; assumindo que o custo da palha representa cerca de 60% de sua receita com energia elétrica¹⁵, temos que o custo da tonelada de palha (base seca) é R\$ 82,57 para a usina.

3.2.2. Fase Industrial - Aspen Plus®

Para a avaliação da fase industrial, a BVC utiliza o simulador de processos comercial Aspen Plus®. Este software é bastante utilizado na simulação de processos químicos industriais para avaliar rendimentos em diferentes condições operacionais (ALBARELLI, 2013). A simulação de processos permite calcular balanços de massa e energia, avaliar rendimentos em diferentes condições de operação, comparar alternativas de projetos, avaliar custos de produção e investimento, ajustar condições operacionais e dimensionar equipamentos (BERNARDO-GIL, 1998).

A Tabela 14 apresenta os principais parâmetros utilizados pela BVC nas simulações com o Aspen Plus® para tecnologia 1G.

¹⁴ Manual Consecana, disponível em: http://www.udop.com.br/index.php?item=consecana_sp&op=index

¹⁵ Assumiu-se 60%, que é uma participação próxima das representadas pelo etanol e açúcar, respectivamente, de 62,1% e 59,5%.

Tabela 14: Principais parâmetros das simulações com cenários 1G

Parâmetros	Valor adotado
Eficiência média de extração de açúcares (glicose e sacarose) nas moendas – caso Base	96%
Umidade do bagaço	50%
Eficiência de remoção de fibras e de terra nas peneiras	65%
Eficiência de decantação de sólidos insolúveis	99,7%
Quantidade de torta de filtro (para etanol)	25 kg/TC
Pol na torta	1,0%
Concentração de sólidos no lodo (sólidos solúveis e insolúveis)	9%
Quantidade de torta de filtro (para açúcar)	45 kg/TC
Brix na saída do evaporador	65 °
Brix do açúcar final	99,9 °
Pureza do açúcar final	99,6%
Recuperação total de açúcar	76,5%
Teor de etanol no vinho alimentado nas colunas	8,5 °GL
Grau INPM da solução alcoólica que deixa a coluna de absorção	3 ° INPM
Conversão de ART a etanol e CO ₂ (anexa)	89,50%
Adição de ácido sulfúrico no tratamento de células	5 g/L etanol
Teor alcoólico do AEHC (em massa)	93,0%
Recuperação do etanol na adsorção (em massa)	81,40%
Teor alcoólico do AEAC (em massa)	99,6%
Perdas etanol na vinhaça	< 0,02%
Consumo de eletricidade no processo	30 kWh/TC
Eficiência da caldeira	87,8%
Eficiência dos turbogeradores	83,3%

Fonte: Bonomi et al. (2012)

Para os cenários com a tecnologia 1G2G, os principais parâmetros adotados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Principais parâmetros das simulações com cenários 1G2G

Pré-tratamento (ácido-catalisado)	
Temperatura	150°C
Pressão no reator (abs.)	4,75 bar
Tempo de residência	10 min
Teor de sólidos (temperatura de 150 °C)	
Adição de ácido	0,5% (m/m)*
Conversão de xilana em xilose	65%
Conversão de xilana em oligômeros de xilose	5%
Degradação de xilana (xilose) em furfural	10%
Conversão de celulose em glicose	5%
Conversão de celulose em oligômeros de glicose	2%
Degradação de celulose (glicose) em HMF	1,5%
Conversão do grupo acetil em ácido acético	80%
Solubilização de lignina	15%
Separação após Pré-tratamento (Difusor)	
Temperatura	90°C
Taxa média de água de embebição (em relação ao teor de fibras da celulignina)	150%
Temperatura da água de embebição	90°C
Pressão atmosférica	1,013 bar
Retenção de Sólidos	99,50%
Recuperação de solúveis no licor	98%
Umidade da Celulignina	50%
Hidrólise Enzimática	
Temperatura	50°C
Pressão atmosférica	1,013 bar
Tempo de residência	48 h
Teor de sólidos	15%
Proporção de adição de enzima (FPU/g material pré-tratado seco)	10
Conversão de celulose em glicose	70%
Conversão de celulose em oligômeros de glicose	0,5%
Conversão de xilana em xilose	35%
Conversão de xilana em oligômeros de xilose	0%
Conversão do grupo acetil em ácido acético	35%
Consumo de eletricidade no processo	24 kWh/ML**
Fermentação de C5	
Conversão de xilose a etanol e CO ₂	80%
Conversão de xilose em subprodutos	iguais da 1G
Conversão de glicose a etanol e CO ₂	90%
Conversão de glicose em subprodutos	iguais da 1G

* massa/massa; ** material lignocelulósico (base úmida)

Fonte: Bonomi et al. (2012)

De acordo com a configuração industrial, é possível estimar o consumo de vapor, com auxílio do Aspen Plus[®], para cada cenário. Nos cenários Base e Fardos não há a estação de limpeza a seco que elimina parte da palha inserida na carga (4,8% da carga), resultando em maior quantidade de fibra na moenda se comparados ao cenário de colheita integral com 3,2t/ha de recolhimento de palha, consumindo mais vapor na concentração do caldo. Nos cenários com recolhimento de palha de 5,4 t/ha e 7,5 t/ha, colheita integral, a maior quantidade de fibras na moenda requer maior quantidade de água para embebição, que os cenários Base e Fardos, aumentando o consumo de vapor na concentração do caldo. Os cenários com sistema de recolhimento através de Fardos e o cenário Base apresentam o mesmo consumo de vapor, uma vez que o material processado nas etapas de preparação e extração não se altera (Tabela 16).

Tabela 16: Consumo de vapor de processo (kg vapor/t cana processada)

		Convencional		ETC	
		1G	1G2G	1G	1G2G
Cenário Base		346			
Fardos	3,2 t/ha	346		346	
	5,4 t/ha	346		346	
	7,5 t/ha	346	584	346	575
Integral	3,2 t/ha	333		330	
	5,4 t/ha	348		347	
	7,5 t/ha	352	587	351	582
Integral sem ponteiro	7,5 t/ha			341	
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha			342	576

Neste trabalho, considerou-se que a cana colhida com a ETC tem as mesmas características da cana colhida pela colhedora convencional. A composição da palha, considerada neste trabalho, está descrita na Tabela 17.

Tabela 17: Composição da palha

Composição da palha (base seca)	
Sais	2,08%
Acetato	2,53%
Celulose	46,05%
Lignina	24,67%
Xylana	24,68%

De acordo com os dados provenientes do CanaSoft, foi possível estabelecer as características da palha recebida pela usina, tais como a quantidade de água, fibra e impurezas minerais de acordo com cada cenário de recolhimento (Tabela 18).

Tabela 18: Características da palha, por tonelada de colmo processado, na usina

		Componentes da palha por tonelada de colmo processado			
		H ₂ O (kg/t cana)	Fibras (kg/t cana)	Impurezas Minerais (kg/t cana)	
Convencional	Fardos	3,2 t/ha	5,5	36,2	0,9
		5,4 t/ha	9,3	59,6	3,0
		7,5 t/ha	13,0	78,2	8,7
	Integral	3,2 t/ha	23,6	35,0	1,0
		5,4 t/ha	30,0	58,1	1,8
		7,5 t/ha	34,3	79,7	2,6
ETC	Fardos	3,2 t/ha	5,2	34,3	0,8
		5,4 t/ha	8,9	56,4	2,8
		7,5 t/ha	12,3	74,1	8,2
	Integral	3,2 t/ha	22,6	33,6	1,0
		5,4 t/ha	29,0	56,2	1,8
		7,5 t/ha	33,4	77,6	2,6
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	13,3	77,6	2,6
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha	13,3	77,6	2,6	

Como o processo de limpeza é realizado através de separação por ventilação, as folhas secas requerem menor impulso para gerar a quantidade de movimento transversal ao fluxo dos colmos, sendo mais facilmente retiradas. Assim, a eficiência da estação de limpeza a seco varia em virtude do percentual de folhas secas, folhas verdes e palmitos, que compõem o material que chega até a usina, de acordo com a quantidade de palha recolhida (Tabela 6, item 3.2.1). Com base em dados apresentados por Romão Jr (2009), foram estimadas as eficiências de separação de impurezas minerais e palha (impurezas vegetais) da estação de limpeza a seco (Tabela 19), assim como a perda de colmos, de acordo com a composição do material que chega à usina.

Tabela 19: Parâmetros da Estação de Limpeza a Seco

		Eficiência de Separação		Perda de colmos (%)	
		Impurezas minerais (%)	Palha (%)		
Integral Convencional	3,2 t/ha	52,4	55,4	0,2	
	5,4 t/ha	63,4	56,4	0,5	
	7,5 t/ha	69,6	57,7	1,0	
ETC	Integral	3,2 t/ha	52,5	55,4	0,2
		5,4 t/ha	63,5	56,4	0,5
		7,5 t/ha	69,7	57,8	1,0
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	69,7	63,1	1,0
	Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha	69,7	68,1	1,0

Fonte: Adaptado de Romão Jr (2009)

A maior eficiência na limpeza a seco no cenário de recolhimento de palha através da colheita integral sem ponteiro com palha repicada se dá, em parte, pela maior quantidade de folhas secas no material recolhido, já que os ponteiros, compostos por folhas verdes e palmitos, são deixados no campo. Além disso, a palha é repicada, diminuindo o seu tamanho, ficando mais fácil sua remoção através da sopragem, pois a palha se entrelaça menos com os colmos. Com a palha repicada, acredita-se que é possível diminuir a velocidade do jato de ar, reduzindo a perda de colmos na estação de limpeza. Contudo, neste estudo considerou-se a mesma fração de perda de colmos para os cenários de colheita integral, sem ponteiro e sem ponteiro repicada, com recolhimento de 7,5 t/ha de palha (base seca).

3.3. Parâmetros para a Análise de Viabilidade Econômica

A Análise de viabilidade econômica foi realizada através de estimativas da Taxa Interna de Retorno (TIR) em cada cenário, levando-se em consideração as expectativas para os respectivos fluxos de caixa. A descrição metodológica sobre os cálculos da TIR para projetos de investimentos pode ser encontrada em Ehrlich e Moraes (2005). Os custos de cada sistema de recolhimento foram calculados e comparados com o cenário onde não há recolhimento de palha (cenário Base). Nos itens 3.3.1. e 3.3.2. são detalhados, respectivamente, os valores da fase agrícola e da fase industrial utilizados para compor o fluxo de caixa integrado.

3.3.1. Fase Agrícola

Os investimentos considerados por plantadora, trator, colhedora, ETC base, módulo de plantio, módulo de colheita e conjunto de transbordo são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Investimentos em maquinário no plantio e colheita

	Convencional (R\$ milhão/unidade)	ETC (R\$ milhão/unidade)
Máquina Base	-	1,30
Plantadora + Trator	0,39	-
Módulo plantio	-	0,40
Colhedora Convencional	0,85	-
Módulo colheita	-	0,30
Conjunto de transbordo (trator + 2 transbordos)	0,36	0,36

(R\$ de 2011)

Apesar do investimento por máquina nos cenários com a ETC ser maior, o número de máquinas exigidas por hectare é reduzido, em comparação aos cenários com a colhedora convencional, como mostrado no item 3.2.1. Assim, os investimentos, em máquinas e equipamentos, para produção e transporte da cana-de-açúcar, nos cenários com a colhedora convencional é maior que nos cenários com a ETC. Contudo, como a ETC apresenta menor perda na colheita, há maior quantidade de colmos para transportar por hectare, o que torna os valores de transporte, nos cenários fardos ETC, um pouco mais altos em comparação aos cenários com colhedora convencional. Já para os cenários com colheita integral, a redução no raio médio de transporte é mais significativa e reduz o custo com transporte para os cenários com ETC em comparação aos cenários com colhedora convencional (Tabela 21).

Tabela 21: Investimentos em máquinas e equipamentos, ao ano

			Maquinário Produção ¹ R\$/(ha.ano)	Maquinário Transporte ² R\$/(ha.ano)	Maquinário Produção ¹ R\$/(t.ano)	Maquinário Transporte ² R\$/(t.ano)	
Convencional	Cenário Base		624,37	191,93	7,90	2,43	
	Fardos	3,2 t/ha	699,79	207,91	8,86	2,63	
		5,4 t/ha	709,00	218,89	8,97	2,77	
		7,5 t/ha	722,18	229,38	9,14	2,90	
	Integral	3,2 t/ha	649,71	242,57	7,98	2,98	
		5,4 t/ha	670,68	281,15	8,11	3,40	
		7,5 t/ha	688,66	316,33	8,24	3,78	
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	597,26	210,73	7,00	2,47
			5,4 t/ha	605,51	221,43	7,10	2,60
7,5 t/ha			617,40	231,65	7,24	2,72	
Integral		3,2 t/ha	553,53	242,13	6,39	2,80	
		5,4 t/ha	574,53	279,25	6,59	3,20	
		7,5 t/ha	592,95	313,5	6,76	3,57	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	597,48	288,01	6,81	3,28	
Integral sem ponteiro repicada		7,5 t/ha	593,34	210,94	6,77	2,41	

(R\$ de 2011)

- 1- Inclui máquinas (colhedoras, plantadoras, tratores, carregadoras) e equipamentos (pulverizador, grade, arado, subsolador, enleirador, etc.).
- 2- Inclui caminhões e reboques.

A Tabela 22 apresenta os investimentos iniciais totais na parte agrícola e os custos operacionais anuais. O investimento total engloba as máquinas e implementos necessários para a produção e transporte dos colmos e palha. O custo operacional anual considera os gastos com mão de obra, insumos, diesel, manutenção de maquinário e caminhões, arrendamento de terra e aplicação de vinhaça. Ressaltando que, como a avaliação de viabilidade econômica foi feita com o fluxo de caixa de cada cenário, para os custos operacionais a depreciação não foi considerada, uma vez que não representa saída de caixa.

Tabela 22: Investimentos totais e custos operacionais agrícolas

		Investimento total (R\$ milhão)		Custos operacionais anuais (R\$ milhão)	
		Convencional	ETC	Convencional	ETC
Cenário Base		98,46		80,38	
Fardos	3,2 t/ha	110,06	98,63	84,40	70,42
	5,4 t/ha	113,20	101,40	85,58	71,27
	7,5 t/ha	116,72	104,48	86,79	72,17
Integral	3,2 t/ha	105,47	96,28	81,11	69,52
	5,4 t/ha	111,37	102,47	81,83	71,09
	7,5 t/ha	116,87	108,20	82,65	72,55
Integral sem ponteiro			105,45		71,18
Integral sem ponteiro repicada			95,47		68,64

(R\$ de 2011)

Verifica-se que o investimento inicial total nos cenários com ETC é menor, devido ao menor número de máquinas, como já foi discutido. Os custos operacionais também são menores nos cenários com ETC que necessita menos mão de obra, consome menos óleo diesel e requer menor área para plantio (pois apresenta menores perdas).

3.3.2. Fase Industrial

Os investimentos da parte industrial foram estimados utilizando as premissas empregadas pela BVC (Bonomi et al., 2012), a partir da capacidade de moagem (500 toneladas de colmo por hora) e das características de processamento da usina. A Tabela 23 apresenta os principais investimentos, de acordo com cenários de colheita com colhedora convencional.

Tabela 23: Principais investimentos com equipamentos industriais, cenários colhedora convencional

		Sistema Recepção/Extração (R\$ milhão)	Destilaria (R\$ milhão)	Indústria de açúcar (R\$ milhão)	Sistema de cogeração (R\$ milhão)	Etanol 2G (R\$ milhão)	Outros (R\$ milhão)	Investimento Base (R\$ milhão)
	Base	40,7	42,8	30,7	94,5	0,0	193,2	425,6
Fardos	3,2 t/ha	41,3	42,8	30,7	112,6	0,0	193,2	445,3
	5,4 t/ha	41,3	42,8	30,7	123,3	0,0	193,2	456,7
	7,5 t/ha	41,3	42,8	30,7	131,3	0,0	193,2	465,2
	1G2G 7,5 t/ha	41,3	49,7	30,7	98,4	139,3	193,8	585,9
	3,2 t/ha	50,6	42,8	30,6	110,2	0,0	193,1	452,7
Integral	5,4 t/ha	50,6	42,8	30,5	120,1	0,0	193,1	463,0
	7,5 t/ha	50,6	42,8	30,4	129,1	0,0	193,1	472,4
	1G2G 7,5 t/ha	50,6	49,8	30,3	98,7	139,3	193,8	595,9

(R\$ de 2011)

Com a primeira geração, o investimento em geradores de vapor aumenta à medida que a quantidade de palha recolhida é maior. Para os cenários com recolhimento através da colheita integral, verifica-se um maior investimento na parte de recepção/extração, em virtude da separação da palha através da estação de limpeza a seco e da maior quantidade de fibras recebida pela moenda. A Tabela 24 apresenta os principais investimentos, de acordo com cenários de colheita com a ETC.

Tabela 24: Principais investimentos com equipamentos industriais, cenários ETC

		Sistema Recepção/Extração (R\$ milhão)	Destilaria (R\$ milhão)	Indústria de açúcar (R\$ milhão)	Sistema de cogeração (R\$ milhão)	Etanol 2G (R\$ milhão)	Outros (R\$ milhão)	Investimento Base (R\$ milhão)
Fardos	3,2 t/ha	41,3	42,8	30,7	111,7	0,0	193,2	444,4
	5,4 t/ha	41,3	42,8	30,7	121,9	0,0	193,2	455,2
	7,5 t/ha	41,3	42,8	30,7	129,6	0,0	193,2	463,4
	2G 7,5 t/ha	41,3	49,6	30,7	97,5	137,3	193,8	582,6
Integral	3,2 t/ha	50,6	42,8	30,6	109,5	0,0	193,1	452,0
	5,4 t/ha	50,6	42,8	30,5	119,4	0,0	193,1	462,2
	7,5 t/ha	50,6	42,8	30,4	128,3	0,0	193,1	471,6
	2G 7,5 t/ha	50,6	49,8	30,4	98,3	137,3	193,8	593,2
Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	50,6	42,8	30,4	129,4	0,0	193,1	472,8
Integral sem Ponteiro repicada	7,5 t/ha	50,6	42,8	30,4	129,7	0,0	193,1	473,1
	2G 7,5 t/ha	50,6	49,9	30,4	97,6	137,3	193,8	592,7

(R\$ de 2011)

A Tabela 25 apresenta o investimento na indústria e os custos operacionais. No investimento iniciam estão inseridos os equipamentos, start-up e capital de giro. Os custos operacionais englobam insumos (cana, palha e outros insumos), manutenção, mão de obra e imposto sobre produção (sem considerar a depreciação). Reforçando a informação que a quantidade de cana (colmo) processada é a mesma em todos os cenários e que a cana colhida com colhedora convencional e a cana colhida com ETC apresentam as mesmas características; no entanto, a quantidade de palha processada é diferente (Tabela 13, item 3.2.1), o que explica a diferença nos custos operacionais e nos investimentos (Tabelas 23 a 25).

Tabela 25: Investimentos totais e custos operacionais industriais

			Investimento total (R\$ milhão)		Custos operacionais anuais (R\$ milhão)		
			Convencional	ETC	Convencional	ETC	
Cenário Base			434,13		144,05		
1G	Fardos	3,2 t/ha	454,24	453,26	151,12	150,62	
		5,4 t/ha	465,82	464,31	155,77	154,92	
		7,5 t/ha	474,54	472,66	160,20	159,03	
	Integral	3,2 t/ha	461,73	461,04	151,81	151,42	
		5,4 t/ha	472,29	471,49	156,13	155,57	
		7,5 t/ha	481,85	480,98	160,20	159,51	
	Integral sem ponteiro		7,5 t/ha		482,21		159,52
	Integral sem ponteiro repicada		7,5 t/ha		482,53		159,52
	1G2G	Fardos	7,5 t/ha	597,61	594,27	164,24	162,94
Integral		7,5 t/ha	607,82	605,10	163,44	163,44	
Integral sem ponteiro repicada		7,5 t/ha		604,60		163,62	

(R\$ de 2011)

3.3.3. Análise do modelo verticalizado de produção

Foi realizada uma análise considerando a verticalização do setor sucroenergético, ou seja, a usina produz toda a cana que será processada (colmo + palha). Sendo assim, o investimento é a soma dos investimentos agrícola e industrial, incluindo o transporte até a usina; os custos operacionais englobam a fase agrícola (mão de obra, insumos, diesel, manutenção de maquinário e caminhões, arrendamento de terra e aplicação de vinhaça) e a fase industrial (mão

de obra, insumos industriais e manutenção); e a receita é proveniente da venda da produção de açúcar, etanol (anidro e hidratado) e eletricidade excedente.

Para os investimentos da fase agrícola adotou-se que se inicia com todas as máquinas necessárias para a produção de 2 milhões de toneladas de colmo. Também foi considerada a reposição necessária do maquinário, de acordo com a vida útil de cada máquina. Ao final da vida útil, o maquinário é vendido e o valor residual, de 20% do valor inicial (Hassuani et al., 2005), é incorporado à receita. Considerou-se o período de 25 anos, que é a média de vida útil dos equipamentos de uma usina. Adotou-se alíquota de imposto sobre a produção de 0,65% e alíquota de Imposto de renda de pessoa jurídica (IRPJ) e Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) igual a 34,0% (de acordo com os dados utilizados nas simulações, pela BVC).

A receita da análise verticalizada é proveniente da venda da produção industrial. Os preços do etanol anidro e hidratado, bem como do açúcar e da eletricidade excedente, foram estimados pela BVC, de acordo com o que se segue:

- Açúcar (R\$ 0,75/kg): preço a partir da média ponderada da produção entre VHP (55,3%) e açúcar cristal (44,7%) pelas usinas de cana de açúcar de 2007 a 2012, em São Paulo, utilizando como referência os relatórios do PECEGE (www.pecege.org.br).

- Etanol anidro (R\$ 1,18/L) e hidratado (R\$ 1,04/L): preços a partir da média móvel, de 6 anos, no estado de São Paulo, período de maio/2002 a dezembro/2012.

- Eletricidade (R\$ 116,67/MWh): preço a partir da média ponderada dos preços dos leilões de 2005 a 2012 (valores dez/2012).

Estes valores correspondem a dezembro de 2012. Para este estudo, aplicou-se o IPCA para correção do valor para o ano de 2011, ano base dos investimentos.

3.4. Análise de Ciclo de Vida (ACV)

A análise dos impactos ambientais foi realizada através da Análise de Ciclo de Vida - ACV (*Life Cycle Assessment - LCA*), que é uma metodologia bastante utilizada e aceita para avaliação ambiental. De acordo com Chebebe (1997), todo produto provoca um impacto ambiental que pode ser em razão de sua matéria-prima, do processo de produção, do seu uso ou da disposição final. A ACV permite avaliar os aspectos ambientais, e os potenciais impactos, de uma determinada atividade ou produto, desde a extração ou produção das matérias-primas até o

uso e descarte final (COLTRO, 2007). Produto, em ACV, envolve não só bens físicos, mas também serviços (GUINEÉ, 2002; CIAMBRONE, 1997).

Esta metodologia permite avaliar aspectos ambientais tais como: diminuição de recursos abióticos, acidificação, eutrofização, diminuição da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, potencial de aquecimento global e ecotoxicidade humana (LUO, 2009).

A metodologia de ACV está normatizada pela ISO 14040 (ISO, 2006a) e engloba quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (Figura 14).

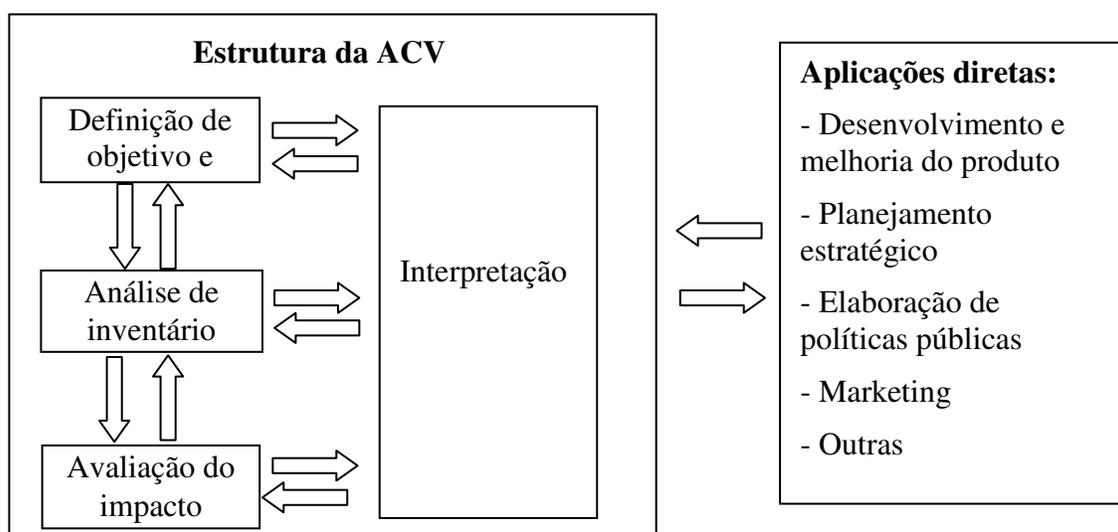


Figura 14: Etapas da ACV
Fonte: Adaptado de ISO, 2006a

A primeira etapa, definição de objetivo e escopo, é onde se definem as fronteiras do sistema, a unidade funcional a ser utilizada, os critérios de alocação e o nível de detalhe a ser considerado. A unidade funcional é uma unidade quantitativa à qual estão relacionados todos os fluxos de entradas e saídas da ACV e a alocação refere-se à forma como os impactos ambientais do processo serão distribuídos aos produtos e co-produtos (COLTRO, 2007). Para este trabalho, adotou-se a alocação econômica (ISO, 2006a; 2006b), e os resultados foram analisados considerando a receita produzida em cada cenário.

As fronteiras, assim como o detalhamento da ACV, podem variar em função do objetivo ou da disponibilidade e acesso aos dados produtivos do sistema (FUKUROZAKI, 2011). Os limites da ACV, para este trabalho, abrangem desde a produção dos colmos e da palha de cana-

de-açúcar até o processamento industrial deste material para a produção de etanol anidro, etanol hidratado, açúcar e eletricidade; entretanto, o uso dos produtos não foi considerado, ou seja, neste trabalho assumiu-se a fronteira semelhante à considerada em Cavalett et al. (2011, 2012). Assim, assumiu-se a abordagem “berço ao portão” (“*cradle to gate*”). Desta forma, foram consideradas as etapas agrícolas de produção da cana-de-açúcar (preparo do solo, plantio, tratos culturais, colheita), recolhimento, transporte e conversão dos colmos e da palha em açúcar, etanol anidro e hidratado e eletricidade (Figura 15).

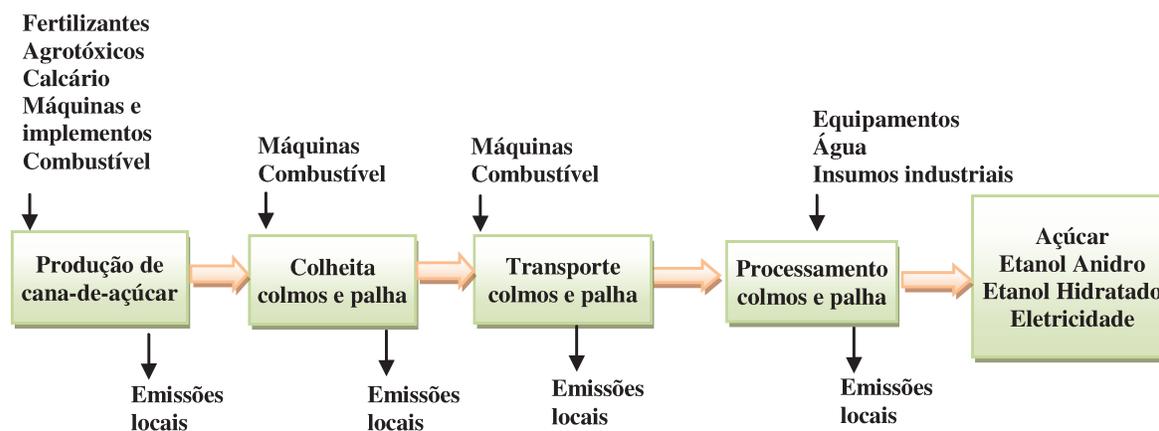


Figura 15: Principais etapas do ciclo de vida da produção e processamento de cana-de-açúcar com recolhimento de palha

A etapa de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a que possibilita visão geral das intervenções ambientais do sistema estudado, tais como extração de recursos, uso de energia e emissões para o ar, água e solo (CAVALETT et al., 2011). A etapa de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é direcionada para, usando os resultados da análise de inventário, avaliar a significância dos impactos e tentar compreendê-los (BARBOSA JÚNIOR et al., 2008). Em ACV, existem diversos métodos de avaliação de impacto. Uma análise de alguns métodos é apresentada em EC-JCR (2010), dentre eles: CML 2002, Eco-indicator 99, EDIP 2003, IMPACT 2002+ e ReCiPe.

Os métodos de AICV podem ser classificados de acordo com a abordagem *midpoint* (ponto médio) ou *endpoint* (ponto final). A abordagem *midpoint* é orientada ao problema e usa como unidade de referência os compostos químicos ligados a cada categoria – indicadores de impactos em potencial; a abordagem *endpoint* é orientada ao dano, usando como referência os

danos causados à saúde humana, ao ecossistema e aos recursos naturais (MANTOVANI, 2012; PIEKARSKI et al., 2012; VILELA, 2013).

Como não existe um método específico de AICV para as condições do Brasil, é importante considerar as características e objetivos do estudo para efetuar a escolha do método de avaliação, permitindo, inclusive, a escolha de mais de um método para maior confiabilidade dos resultados (PIEKARSKI et al., 2012).

Seabra et al. (2011) apontam que um banco de dados abrangente, com as condições brasileiras para a cana-de-açúcar, ainda não foi completamente estabelecido. Chagas et al. (2012) realizaram estudo buscando adaptar às condições nacionais as fontes de energia, tecnologias empregadas e principais insumos da cadeia de produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil, partindo dos ICVs da base de dados internacional *ecoinvent*.

Um banco de dados de ICVs adaptado às especificidades brasileiras para os processos associados ao ciclo de vida dos produtos de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar contribui para a representatividade dos estudos de ACV realizados para o setor sucroenergético no Brasil. Nesse contexto a atualização e adaptação do banco de dados *ecoinvent* permite uma descrição mais adequada dos processos agrícolas e industriais do setor canavieiro no Brasil. (Chagas et al., 2012, p.1).

Utilizou-se, neste trabalho, o banco de dados *ecoinvent* com as adaptações realizadas pelo Programa de Avaliação Tecnológica do CTBE/CNPEM (CHAGAS et al., 2012). Com o software SimaPro[®], adotou-se o método CML 2 Baseline 2000 (Versão 2.05)¹⁶, com abordagem *midpoint*, orientada ao problema (GUINEÉ, 2002). Este método aborda as seguintes categorias: depleção de recursos abióticos, aquecimento global, depleção de ozônio estratosférico, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade de água marinha, ecotoxicidade terrestre, toxicidade humana, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização (GOEDKOOOP et al., 2008). Entretanto, neste estudo, foram analisadas 5 (cinco) categorias que, acreditamos, são as mais relevantes para a produção de cana, etanol, açúcar e eletricidade, descritas a seguir:

- Depleção de recursos abióticos: redução das reservas de recursos naturais (incluindo os recursos energéticos), como minério de ferro e petróleo bruto, mensurada em quilogramas de antimônio equivalente (kg Sb eq) (GUINÉE et al., 2002).

¹⁶ Método comumente utilizado pela BVC nas análises de impactos ambientais

- Aquecimento global: emissões de CO₂, N₂O, CH₄, aerossóis e outros gases causadores do efeito estufa na atmosfera terrestre, mensurado em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq) (CHEHEBE, 1997).

- Toxicidade humana: impactos na saúde humana de substâncias tóxicas presentes no ambiente, mensurada em quilogramas de 1,4-diclorobenzeno equivalente (kg 1,4 - DB eq) (GUINÉE et al., 2002).

- Acidificação: deposição ácida, resultante da emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre para a atmosfera, conduzindo a mudanças na acidez da água e do solo, com efeito na fauna e flora, mensurada em quilogramas de dióxido de enxofre (kg SO₂ eq) (CHEHEBE, 1997).

- Eutrofização: impactos potenciais de elevados níveis ambientais de macronutrientes, principalmente nitrogênio (N) e fósforo (P), nos ecossistemas aquáticos e terrestres, mensurada em quilogramas de fosfato equivalente (kg PO₄ eq) (GUINÉE et al., 2002).

3.5. Análise de Insumo-Produto

A quantificação de impactos socioeconômicos, levando em consideração os efeitos diretos e indiretos, demanda uma metodologia que represente toda a cadeia produtiva da economia. Assim sendo, foi desenvolvido e implementado um modelo de insumo-produto para identificar e analisar os impactos socioeconômicos, provenientes das diferentes tecnologias de recolhimento e uso da palha estudadas neste trabalho.

3.5.1. O modelo de Insumo-Produto

Este modelo, desenvolvido por Wassily Leontief na década de 1930, possibilita descrever o fluxo monetário entre os setores produtivos e a demanda final, ou seja, permite identificar a interdependência das atividades produtivas no que diz respeito aos insumos utilizados e produtos provenientes no processo de produção (MILLER; BLAIR, 2009; GUILHOTO, 2011; FEIJÓ et al., 2007). A tabela Insumo-Produto indica a distribuição do produto de uma indústria para outras indústrias (ou setores) da economia, considerando como indústrias o conjunto de empresas de produtos similares (MIERNYK, 1974). O emprego da técnica da análise estática comparativa permite avaliar os impactos gerados pela mudança ou

inserção de uma ou mais tecnologias, comparando o cenário anterior com o(s) novo(s) cenário(s) obtido(s).

A metodologia descrita a seguir está fortemente baseada em Guilhoto (2011) e Cunha (2011).

Guilhoto (2011) apresenta um exemplo de tabela de Insumo-Produto, de maneira simplificada, para uma economia com apenas 2 setores (Tabela 26).

Tabela 26: Tabela de Insumo-Produto – economia com 2 setores

	Setor 1	Setor 2	Consumo das Famílias	Consumo do Governo	Investimento (Formação Bruta de Capital)	Exportações	Total
Setor 1	$z_{1,1}$	$z_{1,2}$	F_1	G_1	I_1	E_1	X_1
Setor 2	$z_{2,1}$	$z_{2,2}$	F_2	G_2	I_2	E_2	X_2
Importação	Imp_1	Imp_2	Imp_C	Imp_G	Imp_I		IMP
Impostos	T_1	T_2	T_3	T_4	T_I	T_E	T
Valor Adicionado	W_1	W_2					W
Total	X_1	X_2	F	G	I	E	

Fonte: Guilhoto (2011)

Onde:

$z_{i,j}$: produção do setor i que é utilizada como insumo intermediário pelo setor j

F_i : consumo das famílias dos produtos do setor i

G_i : gasto do governo junto ao setor i

I_i : demanda por bens de investimento produzidos pelo setor i

E_i : total exportado pelo setor i

X_i : total da produção doméstica do setor i

T_j : total de impostos indiretos líquidos pagos pelo setor i

Imp_j : importação realizada pelo setor i

W_j : valor adicionado gerado pelo setor i

De acordo com Guilhoto (2011), a partir da Tabela 26 é possível generalizar para n setores, obtendo:

$$\sum_{j=1}^n z_{i,j} + F_i + G_i + I_i + E_i = X_i \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (1)$$

A equação (1) mostra que o valor da produção (X_i) corresponde à soma dos insumos que o setor i destina a todos os setores produtivos da economia para estes realizarem as suas produções ($Z_{i,j}$), ao consumo das famílias pelos produtos produzidos pelo setor i (F_i), ao gasto do Governo junto ao setor i (G_i), à demanda por bens de investimento produzidos pelo setor i (I_i) e ao total exportado pelo setor i (E_i).

A Demanda Final (Y) é composta por: consumo das famílias (F), consumo do governo (G), exportações (E), investimentos (I). O valor adicionado (W) corresponde à remuneração do fator trabalho, remuneração do fator capital, impostos indiretos líquidos e dos impostos e subsídios líquidos sobre a produção (CUNHA, 2011). Então, a equação (1) pode ser escrita como:

$$\sum_{j=1}^n z_{i,j} + Y_i = X_i \quad \text{para } 1 \leq i \leq n \quad (2)$$

É possível, também, definir coeficientes técnicos diretos de produção a partir de um determinado setor. O coeficiente técnico ($a_{i,j}$) indica a quantidade de insumos que o setor j utiliza do setor i para a produção de uma unidade monetária de produto do setor j , ou seja:

$$a_{i,j} = z_{i,j}/X_j \quad (3)$$

Assim, a partir da equação (3), temos $z_{i,j} = a_{i,j} \cdot X_j$, que substituindo na equação (2), obtém-se:

$$\sum_{j=1}^n a_{i,j} \cdot X_j + Y_i = X_i \quad \text{para } 1 \leq i \leq n \quad (4)$$

Escrevendo o sistema de equações obtidas em (4), na forma matricial tem-se:

$$A \cdot X + Y = X \quad (5)$$

Resolvendo a equação (5) para X em função de Y , obtém-se a produção total que é necessária para satisfazer a demanda final. Assim, tem-se:

$$X = (I - A)^{-1} \cdot Y \quad (6)$$

Onde I é a matriz identidade de ordem n e $(I - A)^{-1}$ é a matriz de Leontief.

Criado, inicialmente, para analisar relações na economia nacional, o modelo trabalhava basicamente com matrizes nacionais. Entretanto, a metodologia tem sido aplicada para estudos de regiões menores e também para relações internacionais (LEONTIEF, 1988). O modelo clássico desenvolvido por Leontief pode ter suas hipóteses resumidas em:

“1) HOMOGENEIDADE - cada produto, ou grupo de produtos, é fornecido por uma única atividade;

Corolários: a) somente uma tecnologia é utilizada para produzir um produto.

b) cada atividade produz apenas um único produto.

2) PROPORCIONALIDADE - os insumos consumidos por cada atividade são uma função somente do nível de produção dessa atividade” (FEIJÓ et al., 2007, p.277).

Modificações no modelo de Insumo-Produto foram motivadas pelo interesse de uma análise econômica em nível regional, que pudesse refletir as peculiaridades da região de interesse (MILLER; BLAIR, 2009). A análise de Insumo-Produto regional é semelhante ao modelo nacional, porém necessita de algumas alterações na tabela nacional para atender às necessidades da região (MIERNYK, 1974).

Uma análise inter-regional possibilita verificar a interdependência ou o nível de interações entre as regiões com a análise de seus fluxos de bens e serviços (BRENE et al., 2011). Neste trabalho, a análise inter-regional permite um estudo dos impactos do recolhimento e aproveitamento da palha de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, maior produtor nacional de cana-de-açúcar, com aproximadamente 53% da área plantada (CONAB, 2011), e também os impactos nas demais regiões agregadas para esta pesquisa.

Com os cenários (tecnologias) de recolhimento definidos no CanaSoft e através dos dados da tabela de recursos e usos, foi utilizado o Modelo de Insumo-Produto através de uma análise estática comparativa. Para este estudo foi adotado um modelo com 5 (cinco) regiões: 1) estado de São Paulo (SP), 2) restante da região Sudeste (RSE), 3) região Centro-Oeste (CO), 4) região Sul (SUL) e 5) região Norte/Nordeste (N-NE).

Em Insumo-Produto são utilizadas, geralmente, duas hipóteses relacionadas ao modo de produção e participação das indústrias no mercado:

1- tecnologia baseada no produto: a participação da produção de cada produto produzido é constante em relação ao valor da produção setorial.

2- tecnologia Baseada na indústria¹⁷: a participação no mercado dos produtos produzidos é constante para cada setor (GUILHOTO, 2011).

É possível adotar a hipótese de tecnologia mista, ou seja, uma combinação da tecnologia Baseada na indústria e da tecnologia Baseada no produto em um modelo de insumo-produto (Miller; Blair, 2009). Utilizando a combinação destas tecnologias, Cunha (2005) propõe um método de construção de um modelo de insumo-produto com tecnologia mista com número de produtos igual ao número de setores. Aqui, neste trabalho, foi utilizado número de produtos diferente do número de setores, de acordo com a abordagem proposta por Cunha (2011).

A hipótese de tecnologia mista foi adotada em função de que aproximadamente 83% da cana, no setor sucroenergético brasileiro, é processada em usinas com destilarias anexas (Conab, 2013c) e a capacidade de alterar o mix de produção nessas unidades é limitada, ou seja, não há uma flexibilidade tão significativa no sistema de produção. Com isso, um aumento expressivo na produção de um produto acaba se traduzindo também em aumento do outro produto. Assim, a produção de açúcar, etanol e eletricidade provenientes da cana foi caracterizada pela hipótese de tecnologia Baseada no produto, quando o mix de produção não é alterado. Já os demais setores são mais bem caracterizados pela hipótese de tecnologia Baseada na indústria quando o mix de produção é alterado, mantém-se a participação dos setores nos mercados de produtos.

3.5.2. Modelo Didático

Para melhor entendimento da hipótese de tecnologia mista é apresentado, a seguir, um modelo didático que representa o modelo implementado de forma simplificada e ajuda na compreensão da metodologia. Possibilita, também, avaliar o fechamento do modelo, buscando identificar quais são as variáveis endógenas e exógenas do modelo que apresentam sentido

¹⁷ Também pode ser usado o termo tecnologia do setor, para evidenciar que a hipótese abrange todas as atividades consideradas na Matriz de Insumo-Produto (IBGE, 2008).

matemático e econômico, com a inserção dos cenários com recolhimento de palha para o estado de São Paulo (Tabela 27).

Tabela 27: Modelo Didático – Matriz de Uso (U)

Matriz U Uso	Sucro	Sucro P1	Cana	Cana P1	Resto Ger. Eletric.	Mist. Açúcar	Mist. Anidro	Mist. Hidrat.	Mistur. Ger. Eletric.	T&D Eletric.	Outros set.	Demanda Final	Demanda Total
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	E	Q
Cana P_1	$u_{1,1}$	$u_{1,2}$	$u_{1,3}$	$u_{1,4}$	$u_{1,5}$	$u_{1,6}$	$u_{1,7}$	$u_{1,8}$	$u_{1,9}$	$u_{1,10}$	$u_{1,11}$	E_1	Q_1
Cana P1 P_2	$u_{2,1}$	$u_{2,2}$	$u_{2,3}$	$u_{2,4}$	$u_{2,5}$	$u_{2,6}$	$u_{2,7}$	$u_{2,8}$	$u_{2,9}$	$u_{2,10}$	$u_{2,11}$	E_2	Q_2
Açúcar P_3	$u_{3,1}$	$u_{3,2}$	$u_{3,3}$	$u_{3,4}$	$u_{3,5}$	$u_{3,6}$	$u_{3,7}$	$u_{3,8}$	$u_{3,9}$	$u_{3,10}$	$u_{3,11}$	E_3	Q_3
Açúcar P1 P_4	$u_{4,1}$	$u_{4,2}$	$u_{4,3}$	$u_{4,4}$	$u_{4,5}$	$u_{4,6}$	$u_{4,7}$	$u_{4,8}$	$u_{4,9}$	$u_{4,10}$	$u_{4,11}$	E_4	Q_4
Açúcar total P_5	$u_{5,1}$	$u_{5,2}$	$u_{5,3}$	$u_{5,4}$	$u_{5,5}$	$u_{5,6}$	$u_{5,7}$	$u_{5,8}$	$u_{5,9}$	$u_{5,10}$	$u_{5,11}$	E_5	Q_5
Anidro P_6	$u_{6,1}$	$u_{6,2}$	$u_{6,3}$	$u_{6,4}$	$u_{6,5}$	$u_{6,6}$	$u_{6,7}$	$u_{6,8}$	$u_{6,9}$	$u_{6,10}$	$u_{6,11}$	E_6	Q_6
Anidro P1 P_7	$u_{7,1}$	$u_{7,2}$	$u_{7,3}$	$u_{7,4}$	$u_{7,5}$	$u_{7,6}$	$u_{7,7}$	$u_{7,8}$	$u_{7,9}$	$u_{7,10}$	$u_{7,11}$	E_7	Q_7
Anidro total P_8	$u_{8,1}$	$u_{8,2}$	$u_{8,3}$	$u_{8,4}$	$u_{8,5}$	$u_{8,6}$	$u_{8,7}$	$u_{8,8}$	$u_{8,9}$	$u_{8,10}$	$u_{8,11}$	E_8	Q_8
Hidratado P_9	$u_{9,1}$	$u_{9,2}$	$u_{9,3}$	$u_{9,4}$	$u_{9,5}$	$u_{9,6}$	$u_{9,7}$	$u_{9,8}$	$u_{9,9}$	$u_{9,10}$	$u_{9,11}$	E_9	Q_9
Hidratado P1 P_{10}	$u_{10,1}$	$u_{10,2}$	$u_{10,3}$	$u_{10,4}$	$u_{10,5}$	$u_{10,6}$	$u_{10,7}$	$u_{10,8}$	$u_{10,9}$	$u_{10,10}$	$u_{10,11}$	E_{10}	Q_{10}
Hidratado total P_{11}	$u_{11,1}$	$u_{11,2}$	$u_{11,3}$	$u_{11,4}$	$u_{11,5}$	$u_{11,6}$	$u_{11,7}$	$u_{11,8}$	$u_{11,9}$	$u_{11,10}$	$u_{11,11}$	E_{11}	Q_{11}
Eletric. Sucro P_{12}	$u_{12,1}$	$u_{12,2}$	$u_{12,3}$	$u_{12,4}$	$u_{12,5}$	$u_{12,6}$	$u_{12,7}$	$u_{12,8}$	$u_{12,9}$	$u_{12,10}$	$u_{12,11}$	E_{12}	Q_{12}
Eletric. Sucro P1 P_{13}	$u_{13,1}$	$u_{13,2}$	$u_{13,3}$	$u_{13,4}$	$u_{13,5}$	$u_{13,6}$	$u_{13,7}$	$u_{13,8}$	$u_{13,9}$	$u_{13,10}$	$u_{13,11}$	E_{13}	Q_{13}
Eletric. Ger. Resto P_{14}	$u_{14,1}$	$u_{14,2}$	$u_{14,3}$	$u_{14,4}$	$u_{14,5}$	$u_{14,6}$	$u_{14,7}$	$u_{14,8}$	$u_{14,9}$	$u_{14,10}$	$u_{14,11}$	E_{14}	Q_{14}
Eletric. Ger. Total P_{15}	$u_{15,1}$	$u_{15,2}$	$u_{15,3}$	$u_{15,4}$	$u_{15,5}$	$u_{15,6}$	$u_{15,7}$	$u_{15,8}$	$u_{15,9}$	$u_{15,10}$	$u_{15,11}$	E_{15}	Q_{15}
Eletricidade T&D P_{16}	$u_{16,1}$	$u_{16,2}$	$u_{16,3}$	$u_{16,4}$	$u_{16,5}$	$u_{16,6}$	$u_{16,7}$	$u_{16,8}$	$u_{16,9}$	$u_{16,10}$	$u_{16,11}$	E_{16}	Q_{16}
Outros produtos P_{17}	$u_{17,1}$	$u_{17,2}$	$u_{17,3}$	$u_{17,4}$	$u_{17,5}$	$u_{17,6}$	$u_{17,7}$	$u_{17,8}$	$u_{17,9}$	$u_{17,10}$	$u_{17,11}$	E_{17}	Q_{17}
Importação	Imp_1	Imp_2	Imp_3	Imp_4	Imp_5	Imp_6	Imp_7	Imp_8	Imp_9	Imp_{10}	Imp_{11}	Imp_E	Imp_Q
Valor Adicionado	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_E	W_Q
X	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}		

Considerando um modelo com 11 setores e 17 produtos, temos a matriz de Uso (U), representada na Tabela 3, onde Cana¹⁸ P1(S₄) e Sucro¹⁹ P1(S₂) são os setores que produzem e processam cana com recolhimento de palha, respectivamente. Da mesma forma, os produtos Cana P1 (P₂), Açúcar P1(P₄), Anidro P1(P₇), Hidratado P1(P₁₀) e Eletricidade Sucro P1(P₁₃), são relativos ao recolhimento de palha (Tabela 27).

Na Matriz U, temos que:

$u_{i,j}$ = valor que o setor j usa de insumos do produto i para realizar sua produção

X_j = valor da produção do setor j

E_i = demanda final do produto i

Q_i = demanda total do produto i

A longo da linha i, somando-se os elementos $u_{i,j}$ com o elemento E_i , temos o valor do produto i utilizado no consumo intermediário e consumido na demanda final, ou seja, o valor de produção do produto i (Q_i).

$$\sum_{j=1}^{11} u_{i,j} + E_i = Q_i \quad (\text{para } 1 \leq i \leq 17) \quad (7)$$

A partir da Matriz U, é possível calcular os coeficientes técnicos do consumo intermediário para cada setor:

$$b_{i,j} = u_{i,j} / X_j \quad (8)$$

Sendo que $b_{i,j}$ é o valor que o setor j utiliza de insumos do produto i para produzir uma unidade monetária em sua produção.

Assim, a matriz de coeficientes técnicos diretos dos setores em relação aos produtos é definida por: $B = [b_{i,j}]$

¹⁸ Cana diz respeito à fase agrícola do setor sucroenergético

¹⁹ Sucro diz respeito à fase industrial do setor sucroenergético

Da equação (8), temos que:

$$u_{i,j} = b_{i,j} \cdot X_j \quad (9)$$

Desta forma, a partir das equações (8) e (9), temos que:

$$\sum_{j=1}^{11} b_{i,j} \cdot X_j + E_i = Q_i \quad (\text{para } 1 \leq i \leq 17) \quad (10)$$

O sistema de equações (10) é apresentado em sua forma aberta no sistema (11) a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{1,1} \cdot X_1 + b_{1,2} \cdot X_2 + b_{1,3} \cdot X_3 + \dots + b_{1,11} \cdot X_{11} + E_1 = Q_1 \\ b_{2,1} \cdot X_1 + b_{2,2} \cdot X_2 + b_{2,3} \cdot X_3 + \dots + b_{2,11} \cdot X_{11} + E_2 = Q_2 \\ b_{3,1} \cdot X_1 + b_{3,2} \cdot X_2 + b_{3,3} \cdot X_3 + \dots + b_{3,11} \cdot X_{11} + E_3 = Q_3 \\ b_{4,1} \cdot X_1 + b_{4,2} \cdot X_2 + b_{4,3} \cdot X_3 + \dots + b_{4,11} \cdot X_{11} + E_4 = Q_4 \\ b_{5,1} \cdot X_1 + b_{5,2} \cdot X_2 + b_{5,3} \cdot X_3 + \dots + b_{5,11} \cdot X_{11} + E_5 = Q_5 \\ b_{6,1} \cdot X_1 + b_{6,2} \cdot X_2 + b_{6,3} \cdot X_3 + \dots + b_{6,11} \cdot X_{11} + E_6 = Q_6 \\ b_{7,1} \cdot X_1 + b_{7,2} \cdot X_2 + b_{7,3} \cdot X_3 + \dots + b_{7,11} \cdot X_{11} + E_7 = Q_7 \\ b_{8,1} \cdot X_1 + b_{8,2} \cdot X_2 + b_{8,3} \cdot X_3 + \dots + b_{8,11} \cdot X_{11} + E_8 = Q_8 \\ b_{9,1} \cdot X_1 + b_{9,2} \cdot X_2 + b_{9,3} \cdot X_3 + \dots + b_{9,11} \cdot X_{11} + E_9 = Q_9 \\ b_{10,1} \cdot X_1 + b_{10,2} \cdot X_2 + b_{10,3} \cdot X_3 + \dots + b_{10,11} \cdot X_{11} + E_{10} = Q_{10} \\ b_{11,1} \cdot X_1 + b_{11,2} \cdot X_2 + b_{11,3} \cdot X_3 + \dots + b_{11,11} \cdot X_{11} + E_{11} = Q_{11} \\ b_{12,1} \cdot X_1 + b_{12,2} \cdot X_2 + b_{12,3} \cdot X_3 + \dots + b_{12,11} \cdot X_{11} + E_{12} = Q_{12} \\ b_{13,1} \cdot X_1 + b_{13,2} \cdot X_2 + b_{13,3} \cdot X_3 + \dots + b_{13,11} \cdot X_{11} + E_{13} = Q_{13} \\ b_{14,1} \cdot X_1 + b_{14,2} \cdot X_2 + b_{14,3} \cdot X_3 + \dots + b_{14,11} \cdot X_{11} + E_{14} = Q_{14} \\ b_{15,1} \cdot X_1 + b_{15,2} \cdot X_2 + b_{15,3} \cdot X_3 + \dots + b_{15,11} \cdot X_{11} + E_{15} = Q_{15} \\ b_{16,1} \cdot X_1 + b_{16,2} \cdot X_2 + b_{16,3} \cdot X_3 + \dots + b_{16,11} \cdot X_{11} + E_{16} = Q_{16} \\ b_{17,1} \cdot X_1 + b_{17,2} \cdot X_2 + b_{17,3} \cdot X_3 + \dots + b_{17,11} \cdot X_{11} + E_{17} = Q_{17} \end{array} \right. \quad (11)$$

A Matriz de Produção V, onde um elemento $v_{i,j}$ qualquer desta matriz indica o valor que o setor i produz do produto j ; $c_{i,j}$ representa o valor da produção do produto j pelos setores S_1 e S_2 e, a multiplicação $d_{i,j} \cdot Q_j$ representa a produção dos produtos dos setores S_3 a S_{11} , estão representados na Tabela 28.

Tabela 28: Modelo didático - Matriz de produção V

Matriz V Produção		Cana	Cana P1	Acúcar	Acúcar P1	Acúcar total	Anidro	Anidro P1	Anidro total	Hidratado	Hidratado P1	Hidratado total	Eletric. Sucro	Eletric. Sucro P1	Eletric. Ger. Resto	Eletric. Ger. Total	Eletricid. T&D	Outros produtos
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
Sucro	S1	0	0	$c_{1,3}X_3$	$c_{1,4}X_4$	0	$c_{1,6}X_6$	$c_{1,7}X_7$	0	$c_{1,9}X_9$	$c_{1,10}X_{10}$	0	$c_{1,12}X_{12}$	$c_{1,13}X_{13}$	0	0	0	0
Sucro P1	S2	0	0	$c_{2,3}X_3$	$c_{2,4}X_4$	0	$c_{1,6}X_6$	$c_{1,7}X_7$	0	$c_{2,9}X_9$	$c_{2,10}X_{10}$	0	$c_{2,12}X_{12}$	$c_{2,13}X_{13}$	0	0	0	0
Cana	S3	$d_{3,1}Q_1$	$d_{3,2}Q_2$	$d_{3,3}Q_3$	$d_{3,4}Q_4$	$d_{3,5}Q_5$	$d_{3,6}Q_6$	$d_{3,7}Q_7$	$d_{3,8}Q_8$	$d_{3,9}Q_9$	$d_{3,10}Q_{10}$	$d_{3,11}Q_{11}$	$d_{3,12}Q_{12}$	$d_{3,13}Q_{13}$	$d_{3,14}Q_{14}$	$d_{3,15}Q_{15}$	$d_{3,16}Q_{16}$	$d_{3,17}Q_{17}$
Cana P1	S4	$d_{4,1}Q_1$	$d_{4,2}Q_2$	$d_{4,3}Q_3$	$d_{4,4}Q_4$	$d_{4,5}Q_5$	$d_{4,6}Q_6$	$d_{4,7}Q_7$	$d_{4,8}Q_8$	$d_{4,9}Q_9$	$d_{4,10}Q_{10}$	$d_{4,11}Q_{11}$	$d_{4,12}Q_{12}$	$d_{4,13}Q_{13}$	$d_{4,14}Q_{14}$	$d_{4,15}Q_{15}$	$d_{4,16}Q_{16}$	$d_{4,17}Q_{17}$
Resto Ger. Eletric.	S5	$d_{5,1}Q_1$	$d_{5,2}Q_2$	$d_{5,3}Q_3$	$d_{5,4}Q_4$	$d_{5,5}Q_5$	$d_{5,6}Q_6$	$d_{5,7}Q_7$	$d_{5,8}Q_8$	$d_{5,9}Q_9$	$d_{5,10}Q_{10}$	$d_{5,11}Q_{11}$	$d_{5,12}Q_{12}$	$d_{5,13}Q_{13}$	$d_{5,14}Q_{14}$	$d_{5,15}Q_{15}$	$d_{5,16}Q_{16}$	$d_{5,17}Q_{17}$
Mist. Acúcar	S6	$d_{6,1}Q_1$	$d_{6,2}Q_2$	$d_{6,3}Q_3$	$d_{6,4}Q_4$	$d_{6,5}Q_5$	$d_{6,6}Q_6$	$d_{6,7}Q_7$	$d_{6,8}Q_8$	$d_{6,9}Q_9$	$d_{6,10}Q_{10}$	$d_{6,11}Q_{11}$	$d_{6,12}Q_{12}$	$d_{6,13}Q_{13}$	$d_{6,14}Q_{14}$	$d_{6,15}Q_{15}$	$d_{6,16}Q_{16}$	$d_{6,17}Q_{17}$
Mist. Anidro	S7	$d_{7,1}Q_1$	$d_{7,2}Q_2$	$d_{7,3}Q_3$	$d_{7,4}Q_4$	$d_{7,5}Q_5$	$d_{7,6}Q_6$	$d_{7,7}Q_7$	$d_{7,8}Q_8$	$d_{7,9}Q_9$	$d_{7,10}Q_{10}$	$d_{7,11}Q_{11}$	$d_{7,12}Q_{12}$	$d_{7,13}Q_{13}$	$d_{7,14}Q_{14}$	$d_{7,15}Q_{15}$	$d_{7,16}Q_{16}$	$d_{7,17}Q_{17}$
Mist. Hidrat.	S8	$d_{8,1}Q_1$	$d_{8,2}Q_2$	$d_{8,3}Q_3$	$d_{8,4}Q_4$	$d_{8,5}Q_5$	$d_{8,6}Q_6$	$d_{8,7}Q_7$	$d_{8,8}Q_8$	$d_{8,9}Q_9$	$d_{8,10}Q_{10}$	$d_{8,11}Q_{11}$	$d_{8,12}Q_{12}$	$d_{8,13}Q_{13}$	$d_{8,14}Q_{14}$	$d_{8,15}Q_{15}$	$d_{8,16}Q_{16}$	$d_{8,17}Q_{17}$
Mistur. Ger. Eletric.	S9	$d_{9,1}Q_1$	$d_{9,2}Q_2$	$d_{9,3}Q_3$	$d_{9,4}Q_4$	$d_{9,5}Q_5$	$d_{9,6}Q_6$	$d_{9,7}Q_7$	$d_{9,8}Q_8$	$d_{9,9}Q_9$	$d_{9,10}Q_{10}$	$d_{9,11}Q_{11}$	$d_{9,12}Q_{12}$	$d_{9,13}Q_{13}$	$d_{9,14}Q_{14}$	$d_{9,15}Q_{15}$	$d_{9,16}Q_{16}$	$d_{9,17}Q_{17}$
T&D Eletric.	S10	$d_{10,1}Q_1$	$d_{10,2}Q_2$	$d_{10,3}Q_3$	$d_{10,4}Q_4$	$d_{10,5}Q_5$	$d_{10,6}Q_6$	$d_{10,7}Q_7$	$d_{10,8}Q_8$	$d_{10,9}Q_9$	$d_{10,10}Q_{10}$	$d_{10,11}Q_{11}$	$d_{10,12}Q_{12}$	$d_{10,13}Q_{13}$	$d_{10,14}Q_{14}$	$d_{10,15}Q_{15}$	$d_{10,16}Q_{16}$	$d_{10,17}Q_{17}$
Outros setores	S11	$d_{11,1}Q_1$	$d_{11,2}Q_2$	$d_{11,3}Q_3$	$d_{11,4}Q_4$	$d_{11,5}Q_5$	$d_{11,6}Q_6$	$d_{11,7}Q_7$	$d_{11,8}Q_8$	$d_{11,9}Q_9$	$d_{11,10}Q_{10}$	$d_{11,11}Q_{11}$	$d_{11,12}Q_{12}$	$d_{11,13}Q_{13}$	$d_{11,14}Q_{14}$	$d_{11,15}Q_{15}$	$d_{11,16}Q_{16}$	$d_{11,17}Q_{17}$

A partir da Matriz V (Tabela 28), temos 9 equações com tecnologia Baseada na indústria:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_3 = d_{3,1}Q_1 + d_{3,2}Q_2 + \dots + d_{3,17}Q_{17} \\ X_4 = d_{4,1}Q_1 + d_{4,2}Q_2 + \dots + d_{4,17}Q_{17} \\ X_5 = d_{5,1}Q_1 + d_{5,2}Q_2 + \dots + d_{5,17}Q_{17} \\ X_6 = d_{6,1}Q_1 + d_{6,2}Q_2 + \dots + d_{6,17}Q_{17} \\ X_7 = d_{7,1}Q_1 + d_{7,2}Q_2 + \dots + d_{7,17}Q_{17} \\ X_8 = d_{8,1}Q_1 + d_{8,2}Q_2 + \dots + d_{8,17}Q_{17} \\ X_9 = d_{9,1}Q_1 + d_{9,2}Q_2 + \dots + d_{9,17}Q_{17} \\ X_{10} = d_{10,1}Q_1 + d_{10,2}Q_2 + \dots + d_{10,17}Q_{17} \\ X_{11} = d_{11,1}Q_1 + d_{11,2}Q_2 + \dots + d_{11,17}Q_{17} \end{array} \right. \quad (12)$$

Com tecnologia Baseada no produto, temos 8 equações, a partir de V (Tabela 28):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_3 = c_{1,3}X_3 + c_{2,3}X_3 + d_{3,3}Q_3 + \dots + d_{10,3}Q_3 + d_{11,3}Q_3 \\ Q_4 = c_{1,4}X_4 + c_{2,4}X_4 + d_{3,4}Q_4 + \dots + d_{10,4}Q_4 + d_{11,4}Q_4 \\ Q_6 = c_{1,6}X_6 + c_{2,6}X_6 + d_{3,6}Q_6 + \dots + d_{10,6}Q_6 + d_{11,6}Q_6 \\ Q_7 = c_{1,7}X_7 + c_{2,7}X_7 + d_{3,7}Q_7 + \dots + d_{10,7}Q_7 + d_{11,7}Q_7 \\ Q_9 = c_{1,9}X_9 + c_{2,9}X_9 + d_{3,9}Q_9 + \dots + d_{10,9}Q_9 + d_{11,9}Q_9 \\ Q_{10} = c_{1,10}X_{10} + c_{2,10}X_{10} + d_{3,10}Q_{10} + \dots + d_{10,10}Q_{10} + d_{11,10}Q_{10} \\ Q_{12} = c_{1,12}X_{12} + c_{2,12}X_{12} + d_{3,10}Q_{12} + \dots + d_{10,12}Q_{12} + d_{11,12}Q_{12} \\ Q_{13} = c_{1,13}X_{13} + c_{2,13}X_{13} + d_{3,13}Q_{13} + \dots + d_{10,13}Q_{13} + d_{11,13}Q_{13} \end{array} \right. \quad (13)$$

Dessa forma, a partir de (11), (12) e (13), temos um sistema linear com 34 equações, que corresponde ao modelo didático, de acordo com (14).

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
b_{1,1} \cdot X_1 + b_{1,2} \cdot X_2 + b_{1,3} \cdot X_3 + \dots + b_{1,11} \cdot X_{11} + E_1 &= Q_1 \\
b_{2,1} \cdot X_1 + b_{2,2} \cdot X_2 + b_{2,3} \cdot X_3 + \dots + b_{2,11} \cdot X_{11} + E_2 &= Q_2 \\
b_{3,1} \cdot X_1 + b_{3,2} \cdot X_2 + b_{3,3} \cdot X_3 + \dots + b_{3,11} \cdot X_{11} + E_3 &= Q_3 \\
b_{4,1} \cdot X_1 + b_{4,2} \cdot X_2 + b_{4,3} \cdot X_3 + \dots + b_{4,11} \cdot X_{11} + E_4 &= Q_4 \\
b_{5,1} \cdot X_1 + b_{5,2} \cdot X_2 + b_{5,3} \cdot X_3 + \dots + b_{5,11} \cdot X_{11} + E_5 &= Q_5 \\
b_{6,1} \cdot X_1 + b_{6,2} \cdot X_2 + b_{6,3} \cdot X_3 + \dots + b_{6,11} \cdot X_{11} + E_6 &= Q_6 \\
b_{7,1} \cdot X_1 + b_{7,2} \cdot X_2 + b_{7,3} \cdot X_3 + \dots + b_{7,11} \cdot X_{11} + E_7 &= Q_7 \\
b_{8,1} \cdot X_1 + b_{8,2} \cdot X_2 + b_{8,3} \cdot X_3 + \dots + b_{8,11} \cdot X_{11} + E_8 &= Q_8 \\
b_{9,1} \cdot X_1 + b_{9,2} \cdot X_2 + b_{9,3} \cdot X_3 + \dots + b_{9,11} \cdot X_{11} + E_9 &= Q_9 \\
b_{10,1} \cdot X_1 + b_{10,2} \cdot X_2 + b_{10,3} \cdot X_3 + \dots + b_{10,11} \cdot X_{11} + E_{10} &= Q_{10} \\
b_{11,1} \cdot X_1 + b_{11,2} \cdot X_2 + b_{11,3} \cdot X_3 + \dots + b_{11,11} \cdot X_{11} + E_{11} &= Q_{11} \\
b_{12,1} \cdot X_1 + b_{12,2} \cdot X_2 + b_{12,3} \cdot X_3 + \dots + b_{12,11} \cdot X_{11} + E_{12} &= Q_{12} \\
b_{13,1} \cdot X_1 + b_{13,2} \cdot X_2 + b_{13,3} \cdot X_3 + \dots + b_{13,11} \cdot X_{11} + E_{13} &= Q_{13} \\
b_{14,1} \cdot X_1 + b_{14,2} \cdot X_2 + b_{14,3} \cdot X_3 + \dots + b_{14,11} \cdot X_{11} + E_{14} &= Q_{14} \\
b_{15,1} \cdot X_1 + b_{15,2} \cdot X_2 + b_{15,3} \cdot X_3 + \dots + b_{15,11} \cdot X_{11} + E_{15} &= Q_{15} \\
b_{16,1} \cdot X_1 + b_{16,2} \cdot X_2 + b_{16,3} \cdot X_3 + \dots + b_{16,11} \cdot X_{11} + E_{16} &= Q_{16} \\
b_{17,1} \cdot X_1 + b_{17,2} \cdot X_2 + b_{17,3} \cdot X_3 + \dots + b_{17,11} \cdot X_{11} + E_{17} &= Q_{17}
\end{aligned} \right\} \tag{14} \\
& \left. \begin{aligned}
X_3 &= d_{3,1}Q_1 + d_{3,2}Q_2 + \dots + d_{3,17}Q_{17} \\
X_4 &= d_{4,1}Q_1 + d_{4,2}Q_2 + \dots + d_{4,17}Q_{17} \\
X_5 &= d_{5,1}Q_1 + d_{5,2}Q_2 + \dots + d_{5,17}Q_{17} \\
X_6 &= d_{6,1}Q_1 + d_{6,2}Q_2 + \dots + d_{6,17}Q_{17} \\
X_7 &= d_{7,1}Q_1 + d_{7,2}Q_2 + \dots + d_{7,17}Q_{17} \\
X_8 &= d_{8,1}Q_1 + d_{8,2}Q_2 + \dots + d_{8,17}Q_{17} \\
X_9 &= d_{9,1}Q_1 + d_{9,2}Q_2 + \dots + d_{9,17}Q_{17} \\
X_{10} &= d_{10,1}Q_1 + d_{10,2}Q_2 + \dots + d_{10,17}Q_{17} \\
X_{11} &= d_{11,1}Q_1 + d_{11,2}Q_2 + \dots + d_{11,17}Q_{17} \\
c_{1,3}X_3 + c_{2,3}X_3 + d_{3,3}Q_3 + \dots + d_{10,3}Q_3 + d_{11,3}Q_3 &= Q_3 \\
c_{1,4}X_4 + c_{2,4}X_4 + d_{3,4}Q_4 + \dots + d_{10,4}Q_4 + d_{11,4}Q_4 &= Q_4 \\
c_{1,6}X_6 + c_{1,6}X_6 + d_{3,6}Q_6 + \dots + d_{10,6}Q_6 + d_{11,6}Q_6 &= Q_6 \\
c_{1,7}X_7 + c_{1,7}X_7 + d_{3,7}Q_7 + \dots + d_{10,7}Q_7 + d_{11,7}Q_7 &= Q_7 \\
c_{1,9}X_9 + c_{2,9}X_9 + d_{3,9}Q_9 + \dots + d_{10,9}Q_9 + d_{11,9}Q_9 &= Q_9 \\
c_{1,10}X_{10} + c_{2,10}X_{10} + d_{3,10}Q_{10} + \dots + d_{10,10}Q_{10} + d_{11,10}Q_{10} &= Q_{10} \\
c_{1,12}X_{12} + c_{2,12}X_{13} + d_{3,12}Q_{12} + \dots + d_{10,12}Q_{12} + d_{11,12}Q_{12} &= Q_{12} \\
c_{1,13}X_{13} + c_{2,13}X_{13} + d_{3,13}Q_{13} + \dots + d_{10,13}Q_{13} + d_{11,13}Q_{13} &= Q_{13}
\end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

Como no modelo didático temos 45 variáveis (X_j , Q_i e E_i variáveis, com $j = 1, \dots, 11$ e $i = 1, \dots, 17$) e 34 equações independentes, isso quer dizer que necessariamente 11 variáveis devem ser exógenas e 34 endógenas. A escolha das variáveis exógenas deve ser adequada ao que se pretende avaliar com o modelo; esta escolha recebe o nome de fechamento do modelo, que deve permitir a resolução matemática e, também, fazer sentido econômico (CUNHA, 2011).

Assim, as variáveis exógenas escolhidas foram: produção do setor cana (X_3), produção do setor na cana P1 (X_4), demanda final de cana (E_1), demanda final de cana P1 (E_2), demanda final de açúcar total (E_5), demanda final de anidro total (E_8), demanda final de hidratado total (E_{11}), demanda final de eletricidade P1 (E_{13}), demanda final de resto da geração de eletricidade (E_{14}), demanda final de transmissão e distribuição de eletricidade (E_{16}), demanda final de outros produtos (E_{17}).

As demais variáveis (X_1 , X_2 , X_5 , X_6 , X_7 , X_8 , X_9 , X_{10} , X_{11} , E_3 , E_4 , E_6 , E_7 , E_9 , E_{10} , E_{12} , E_{15} , Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 , Q_6 , Q_7 , Q_8 , Q_9 , Q_{10} , Q_{11} , Q_{12} , Q_{13} , Q_{14} , Q_{15} , Q_{16} e Q_{17}), são obtidas endogenamente pela solução do sistema (14).

Os choques (valores atribuídos às variáveis exógenas) foram realizados na produção do setor cana (ou seja, o setor de produção de cana em que não há recolhimento de palha), como também na produção dos setores de cana com sistemas de recolhimento de palha. Assim, o objetivo é analisar como a economia se comportaria com a inserção de novas tecnologias de recolhimento e aproveitamento da palha de cana-de-açúcar.

O modelo implementado, onde estão inseridas as tecnologias de recolhimento e aproveitamento de palha, analisadas através do CanaSoft e Aspen Plus[®], é inter-regional, o qual permite melhor análise dos impactos socioeconômicos da inserção das tecnologias de recolhimento de palha de cana-de-açúcar no estado de São Paulo sobre outras regiões do Brasil.

O modelo inter-regional complementa o modelo regional de insumo-produto, apresentando troca de relações entre as regiões, exportações e importações, expressas por meio do fluxo de bens destinados para o consumo intermediário e também para a demanda final (GUILHOTO, 2011). Um exemplo esquemático das relações inter-regionais de insumo produto pode ser observado na Figura 16.

		Setores		L	M	
		Região L	Região M			
Setores	Região L	Insumos intermediários LL	Insumos intermediários LM	Demanda Final LL	Demanda Final LM	Produção Total L
	Região M	Insumos intermediários ML	Insumos intermediários MM	Demanda Final ML	Demanda Final MM	Produção Total M
	Importação Resto do Mundo (M)	Importação Resto do Mundo (M)	M	M	M	
	Impostos Indiretos Líquidos (ILL)	Impostos Indiretos Líquidos (ILL)	ILL	ILL	ILL	
	Valor Adicionado	Valor Adicionado				
	Produção Total L	Produção Total M				

Figura 16: Relações de Insumo-Produto Inter-regional

Fonte: Guilhoto, 2011

De forma análoga ao exposto para o modelo nacional (uma região) de acordo com Guilhoto (2011), o modelo inter-regional pode ser apresentado através de fluxos intersetoriais e inter-regionais de bens para as regiões L e M, hipoteticamente com 2 setores.

Z_{ij}^{LL} = fluxo monetário do setor i, da região L, para o setor j, da região L,

Z_{ij}^{ML} = fluxo monetário do setor i, da região M, para o setor j, da região L.

Tem-se então, a matriz:

$$Z = \begin{bmatrix} Z^{LL} & Z^{LM} \\ Z^{ML} & Z^{MM} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde,

Z^{LL} e Z^{MM} representam matrizes dos fluxos monetários intrarregionais,

Z^{LM} e Z^{ML} representam matrizes dos fluxos monetários inter-regionais.

A partir de (1) temos que:

$$X_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{in} + Y_i \quad (16)$$

Onde, X_i indica a produção total do setor i; z_{in} representa o fluxo monetário do setor i para o setor n e, Y_i indica a demanda final do setor i. Assim, é possível obter (17):

$$X_1^L = z_{11}^{LL} + z_{12}^{LL} + z_{11}^{LM} + z_{12}^{LM} + Y_1^L \quad (17)$$

Desta forma, X_1^L representa a produção total do produto 1 produzido na região L.

Considerando os coeficientes técnicos diretos de insumo regional para as regiões L e M, temos:

- Coeficientes intrarregionais a_{ij}^{LL} , definidos como coeficientes técnicos diretos de produção e que representam quanto o setor j da região L adquire de insumos do setor i, da região L, para produzir uma unidade monetária. E, da mesma forma, é definido a_{ij}^{MM} , tais que:

$$a_{ij}^{LL} = \frac{z_{ij}^{LL}}{X_j^L} \quad \rightarrow \quad z_{ij}^{LL} = a_{ij}^{LL} \cdot X_j^L \quad (18)$$

$$a_{ij}^{MM} = \frac{z_{ij}^{MM}}{X_j^M} \quad \rightarrow \quad z_{ij}^{MM} = a_{ij}^{MM} \cdot X_j^M \quad (19)$$

- Coeficientes inter-regionais a_{ij}^{LM} , definidos como os coeficientes técnicos diretos de produção e que representam quanto o setor j da região M adquire de insumos do setor i, da região L, para produzir uma unidade monetária. E, da mesma forma, a_{ij}^{ML} , é definido como quanto o setor j da região L adquire de insumos do setor i, da região M, para produzir uma unidade monetária.

$$a_{ij}^{LM} = \frac{z_{ij}^{LM}}{X_j^M} \quad \rightarrow \quad z_{ij}^{LM} = a_{ij}^{LM} \cdot X_j^M \quad (20)$$

$$a_{ij}^{ML} = \frac{z_{ij}^{ML}}{X_j^L} \quad \rightarrow \quad z_{ij}^{ML} = a_{ij}^{ML} \cdot X_j^L \quad (21)$$

Assim, substituindo as equações (18) a (20) na equação (17), temos:

$$X_1^L = a_{11}^{LL} X_1^L + a_{12}^{LL} X_2^L + a_{11}^{LM} X_1^M + a_{12}^{LM} X_2^M + Y_1^L \quad (22)$$

As demais produções são obtidas de forma similar.

Desta forma é possível obter a matriz de coeficientes técnicos diretos inter-regionais (A), o vetor demanda final (Y) e o vetor com o valor da produção (X). Efetuando as operações necessárias, obtemos o sistema de Leontief inter-regional (Guilhoto, 2011):

$$X = (1 - A)^{-1}Y \quad (23)$$

A estrutura do modelo implementado neste trabalho é apresentada na Figura 17, onde a diagonal sombreada representa os fluxos monetários intrarregionais e os demais elementos representam fluxos monetários inter-regionais.

	SP	RSE	SUL	CO	N-NE
SP	$Z_{SP,SP}$	$Z_{SP,RSE}$	$Z_{SP,SUL}$	$Z_{SP,CO}$	$Z_{SP,N-NE}$
RSE	$Z_{RSE,SP}$	$Z_{RSE,RSE}$	$Z_{RSE,SUL}$	$Z_{RSE,CO}$	$Z_{RSE,N-NE}$
SUL	$Z_{SUL,SP}$	$Z_{SUL,RSE}$	$Z_{SUL,SUL}$	$Z_{SUL,CO}$	$Z_{SUL,N-NE}$
CO	$Z_{CO,SP}$	$Z_{CO,RSE}$	$Z_{CO,SUL}$	$Z_{CO,CO}$	$Z_{CO,N-NE}$
N-NE	$Z_{N-NE,SP}$	$Z_{N-NE,RSE}$	$Z_{N-NE,SUL}$	$Z_{N-NE,CO}$	$Z_{N-NE,N-NE}$

Figura 17: Estrutura do modelo inter-regional

Para esta análise, foram inseridos 15 cenários de tecnologias agrícolas (Cenários Cana), e 20 cenários com tecnologias industriais (Cenários Sucro). Foi considerado que cada tecnologia na fase industrial utiliza a cana apropriada da fase agrícola; as combinações das fases industriais e das fases agrícolas resultam nos cenários a serem avaliados para a produção de açúcar, de etanol (anidro e hidratado) e excedentes de eletricidade. As tecnologias agrícolas e industriais inseridas no modelo, descritas nos itens 3.2.1 e 3.2.2, estão representadas na Tabela 29.

Tabela 29: Tecnologias agrícolas e industriais inseridas no modelo de Insumo-Produto

	Tecnologias Agrícolas	Tecnologias Industriais	
Colhedora Convencional	Base sem recolhimento	1G	
	Fardo 3,2 t/ha	1G	
	Fardo 5,4 t/ha	1G	
	Fardo 7,5 t/ha	1G	1G2G
	Integral 3,2 t/ha	1G	
	Integral 5,4 t/ha	1G	
	Integral 7,5 t/ha	1G	1G2G
	ETC	Fardo 3,2 t/ha	1G
Fardo 5,4 t/ha		1G	
Fardo 7,5 t/ha		1G	1G2G
Integral 3,2 t/ha		1G	
Integral 5,4 t/ha		1G	
Integral 7,5 t/ha		1G	1G2G
Integral sem ponteiro 7,5 t/ha		1G	
Integral sem ponteiro repicada 7,5 t/ha		1G	1G2G

Cabe lembrar que as tecnologias industriais foram aplicadas para os cenários com tecnologia agrícola com colhedora convencional e com a ETC.

O modelo implementado foi desenvolvido, inicialmente, a partir de uma matriz com 110 produtos e 56 setores. Foram desagregados os setores produtores de cana e os setores sucroenergéticos. Como alguns setores e produtos tem pouca relevância nos impactos socioeconômicos avaliados, o nível de agregação final do modelo é de 49 produtos e 41 setores, como apresentado na Tabela 30.

Tabela 30: Nível de agregação de produtos e setores adotado no modelo de Insumo-Produto

	Produtos	Setores
1	Cana	Agricultura, silvicultura, exploração florestal
2	Outros produtos agrícolas	Pecuária e pesca
3	Produtos da pesca e pecuária	Petróleo e gás natural
4	Petróleo e gás natural	Extração Mineral
5	Produtos da extração mineral	Alimentos e bebidas
6	Alimentos e bebidas	Açúcar
7	Açúcar	Têxteis e Vestuário
8	Produtos têxteis	Produtos de madeira - exclusive móveis
9	Vestuário e calçados	Celulose, papel, jornais e revistas
10	Produtos da madeira	Refino de petróleo e coque
11	Celulose, papel, jornais e revistas	Etanol Anidro
12	Outros produtos do refino de petróleo e coque	Etanol Hidratado
13	Gasolina A	Produtos químicos
14	Gasolina C	Outros produtos químicos
15	Óleo diesel	Produtos farmacêuticos
16	Anidro	Defensivos agrícolas
17	Hidratado	Produtos e preparados químicos diversos
18	Produtos químicos inorgânicos	Artigos de borracha e plástico
19	Produtos químicos orgânicos	Produtos minerais não-metálicos
20	Outros produtos químicos	Fabricação de aço e derivados
21	Produtos farmacêuticos	Produtos metalúrgicos, máquinas e equipamentos
22	Defensivos agrícolas	Eletrrodomésticos, equipamentos de informática e eletro-eletrônicos
23	Produtos e preparados químicos diversos	Aparelhos/instrumentos médico-hospitalar, medida e óptico
24	Artigos de borracha e plástico	Automóveis, camionetas e utilitários
25	Produtos minerais não-metálicos	Caminhões e ônibus
26	Gusa, ferro-ligas e produtos de aço	Peças e acessórios para veículos automotores
27	Produtos metalúrgicos, máquinas e equipamentos	Outros equipamentos de transporte
28	eletrrodomésticos, equipamentos de informática e eletro-eletrônicos	Móveis e produtos das indústrias diversas
29	Aparelhos médico-hospitalares	Geração de eletricidade
30	Automóveis, camionetas e utilitários	T&D de eletricidade
31	Caminhões e ônibus	Eletricidade e gás, água, esgoto e limpeza urbana
32	Peças e acessórios para veículos automotores	Construção
33	Outros equipamentos de transporte	Comércio
34	Móveis e produtos das indústrias diversas	Transporte, armazenagem e correio
35	Sucatas recicladas	Serviços prestados à empresa, de informação e alojamento
36	Eletric. Ger. Total	Intermediação financeira e seguros
37	Eletricidade T&D	Serviços imobiliários e aluguel
38	Gás, água, esgoto e limpeza urbana	Serviços de manutenção e reparação
39	Construção	Educação e saúde mercantis
40	Comércio	Serviços domésticos, associativos e prestados às famílias
41	Transportes	Educação, saúde, serviços e seguridade social públicos
42	Correio	
43	Serviços prestados à empresa, de informação e alojamento	
44	Intermediação financeira e seguros	
45	Serviços imobiliários e aluguel	
46	Serviços de manutenção e reparação	
47	Educação e saúde mercantis	
48	Serviços domésticos, associativos e prestados às famílias	
49	Educação, saúde, serviços e seguridade social públicos	

A partir do modelo implementado, obtém-se 893 equações e 1212 variáveis. Como o que se pretende avaliar são os impactos socioeconômicos do uso da palha de cana-de-açúcar, analisando também a forma de recolhimento, a produção de cana dos cenários analisados foi escolhida como variável exógena. A demanda final também foi determinada como variável exógena, totalizando 319 variáveis. As 893 variáveis restantes são endógenas, ou seja, tem seus valores dados pelo modelo, de acordo com o choque realizado nas variáveis exógenas.

Os choques foram realizados nos valores de produção de cana, de acordo com o valor da produção dos respectivos cenários agrícolas. Como os dados da Matriz de Insumo-Produto são correspondentes ao ano de 2008, os valores da produção dos cenários agrícolas foram corrigidos de 2011 para 2008, usando-se o IPCA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho, bem como suas análises e discussões, foram divididas de forma semelhante à realizada na metodologia. Na primeira parte, discute-se a viabilidade econômica dos cenários tecnológicos avaliados, considerando a fase agrícola, a fase industrial e o modelo verticalizado de produção (fases agrícola e industrial em conjunto). A segunda parte refere-se aos impactos ambientais, obtidos através da Análise de Ciclo de Vida, subdivididos em fase agrícola e modelo verticalizado de produção. A terceira parte diz respeito aos resultados socioeconômicos, provenientes da Análise de Insumo-Produto.

4.1. Análise de viabilidade econômica

Com a inserção dos cenários com as tecnologias de recolhimento de palha no CanaSoft, foi possível comparar o custo de produção de cana com recolhimento de palha, considerando a produção para atender uma moagem de 2 milhões de toneladas de colmos ao ano.

4.1.1. Fase Agrícola

A perda na colheita mecanizada é reduzida com o recolhimento de palha através da colheita integral, em virtude da redução da velocidade dos ventiladores da colhedora. Com menor perda na colheita, é possível reduzir a quantidade produzida de cana para atingir a quantidade de colmos que a usina deve processar. Desta forma, necessita-se de menor área para produção de cana, incluindo área de plantio de mudas e de reforma, acarretando em menor raio médio da usina. Um resumo dos valores obtidos é apresentado na Tabela 31.

Tabela 31: Cana produzida*, área total, área de plantio e raio médio dos cenários tecnológicos da fase agrícola**

		Colhedora Convencional				ETC			
		Cana Produzida (t)	Área Total (ha)	Área Plantio (ha)	Raio médio (km)	Cana Produzida (t)	Área Total (ha)	Área Plantio (ha)	Raio médio (km)
Cenário Base		2.081.042	25.326	5.065	25,0	2.032.811	23.437	4.687	24,0
Fardos	3,2 t/ha	2.081.042	25.326	5.065	25,0	2.032.811	23.437	4.687	24,0
	5,4 t/ha	2.081.042	25.326	5.065	25,0	2.032.811	23.437	4.687	24,0
	7,5 t/ha	2.081.042	25.326	5.065	25,0	2.032.811	23.437	4.687	24,0
Integral	3,2 t/ha	2.078.581	24.556	4.911	24,6	2.032.339	23.099	4.620	23,9
	5,4 t/ha	2.077.368	24.177	4.835	24,4	2.032.101	22.929	4.586	23,8
	7,5 t/ha	2.076.546	23.920	4.784	24,3	2.031.939	22.813	4.563	23,7
Integral sem ponteiro	7,5 t/ha					2.031.939	22.813	4.563	23,7
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha					2.031.939	22.813	4.563	23,7

*quantidade de colmos produzidos para atingir 2 milhões de colmos colhidos, considerando as perdas na colheita em cada cenário

**área total corresponde à área cultivada (área de colheita + plantio de mudas + área de reforma)

Com a colhedora convencional, verifica-se que nos cenários com fardos e no cenário Base (sem recolhimento de palha) a perda de colmos na colheita supera 81,0 mil toneladas. Já nos cenários com colheita integral, onde a potência do extrator é reduzida, estimaram-se perdas que variam de 78,5 mil a 76,5 mil toneladas de colmos por safra, aproximadamente, de acordo com a quantidade de palha recolhida (Tabela 31).

Ainda analisando a Tabela 31, estimou-se que com a ETC a redução da perda é menor em números absolutos, quando comparamos os cenários com recolhimento de palha através da colheita integral com o cenário sem recolhimento. Entretanto, como a perda inicial na colheita (cenário Base) é menor, o raio médio inicial com a ETC é 1 km menor que o raio médio com a colhedora convencional.

Parte da redução de área cultivada nos cenários com ETC é em virtude da menor quantidade de mudas exigidas por hectare plantado, aliada à menor perda na colheita. O módulo de plantio da ETC utiliza 44% das mudas utilizadas com a plantadora convencional, o que contribui para tornar o custo do hectare plantado com o módulo da ETC, em média, 27% menor

(Tabela 32). Este aspecto mostra a importância da redução de mudas utilizadas no plantio para promover a redução de custos na fase agrícola.

Tabela 32: Custo do plantio, em R\$ por hectare ao ano

		Plantio Convencional (R\$/ha.ano)	Plantio ETC (R\$/ha.ano)
Cenário Base		708,09	516,52
Fardos	3,2 t/ha	708,09	516,52
	5,4 t/ha	708,09	516,52
	7,5 t/ha	708,09	516,52
Integral	3,2 t/ha	708,00	517,02
	5,4 t/ha	707,89	517,28
	7,5 t/ha	707,74	517,46
Integral sem ponteiro	7,5 t/ha		517,46
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha		517,46

*inclui aplicação de torta de filtro, cinzas, herbicidas, colheita de mudas e plantio

Entretanto, quando se analisa o custo do plantio convencional, os cenários com colheita integral apresentam discreta redução no custo por hectare em relação aos cenários Base e fardos, ao contrário do que se pode observar quando se analisa os cenários que utilizam o módulo de plantio da ETC (Tabela 32).

Esta diferença se explica através da distribuição de torta de filtro e cinzas no plantio. No cenário Base e nos cenários com fardos, a aplicação dos resíduos industriais mantém-se a mesma. Já para os cenários com colheita integral, dada a menor área de plantio, a proporção de área que recebe os resíduos industriais é um pouco maior, influenciando no custo com o plantio nos cenários com colheita integral com ETC (Tabela 33).

Tabela 33: Parcela da área de plantio que recebe aplicação de Torta de Filtro e Cinzas

		Convencional		ETC	
		Torta de Filtro	Cinzas	Torta de Filtro	Cinzas
Cenário Base		13,1%	9,9%	13,8%	10,4%
Fardos	3,2 t/ha	13,1%	9,9%	13,8%	10,4%
	5,4 t/ha	13,1%	9,9%	13,8%	10,4%
	7,5 t/ha	13,1%	9,9%	13,8%	10,4%
Integral	3,2 t/ha	13,5%	10,2%	14,0%	10,6%
	5,4 t/ha	13,7%	10,3%	14,1%	10,6%
	7,5 t/ha	13,8%	10,4%	14,2%	10,7%
Integral sem ponteiro	7,5 t/ha			14,2%	10,7%
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha			14,2%	10,7%

Para todos os cenários são assumidos os mesmos tratos culturais, com exceção da quantidade de fertilizantes aplicados após a retirada da palha, como foi apresentado na Tabela 7, no item 3.2.1..

Ao analisar os custos com corte, carregamento e transporte (CCT), verifica-se que os cenários com fardos apresentam custos mais baixos que a colheita integral. Entretanto, o número de hectares cultivados nos cenários com colheita integral é menor, dada a redução na perda da colheita com recolhimento de palha (Tabela 34).

Tabela 34: Custos com Corte, Carregamento e Transporte (CCT)

		Cohedora Convencional			ETC		
		Colheita ^{1*} (R\$/ha.ano)	Transporte colmos e/ou palha (R\$/ha.ano)	CCT (R\$/ha.ano)	Colheita ^{1*} (R\$/ha.ano)	Transporte colmos e/ou palha (R\$/ha.ano)	CCT (R\$/ha.ano)
Cenário Base		1.459,53	365,42	1.824,94			
Fardos	3,2 t/ha	1.698,93	398,44	2.097,38	1.480,54	405,84	1.886,38
	5,4 t/ha	1.756,53	421,15	2.177,67	1.535,71	427,96	1.963,67
	7,5 t/ha	1.819,95	442,82	2.262,77	1.596,08	449,08	2.045,15
Integral	3,2 t/ha	1.618,69	479,10	2.097,79	1.423,82	479,33	1.903,15
	5,4 t/ha	1.743,23	567,80	2.311,04	1.555,35	564,92	2.120,27
	7,5 t/ha	1.855,01	648,98	2.503,99	1.674,93	644,13	2.319,06
Int. sem ponteiro	7,5 t/ha				1.624,65	585,18	2.209,83
Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha				1.434,95	407,98	1.842,94

¹inclui operações de corte e carregamento

*inclui enleiramento, enfardamento e carregamento para cenários "Fardos"

Como na colheita estão inclusas as operações de enfardamento, os cenários com fardos apresentam custo maiores em relação à colheita integral. O cenário com palha sem ponteiro repicada mostra importante queda nos custos, principalmente relacionado ao transporte, com a densidade de carga preservada, em comparação ao cenário Base.

Nos custos de óleo diesel com o plantio, foi desconsiderado o corte e transporte das mudas até a área de plantio. Considerou-se, portanto, apenas o custo do combustível com a plantadora. Para o custo do óleo diesel com colheita, inclui-se para os cenários com fardos, as operações de enleiramento, enfardamento e carregamento dos fardos, já que os cenários com colheita integral englobam recolhimento da palha. Cabe lembrar que a ETC não faz a operação de enleiramento para os fardos. Para o transporte, não foram considerados os custos de óleo diesel com o transporte de insumos (fertilizantes e agroquímicos), estando contemplados no custo total (Tabela 35).

Tabela 35: Custo com óleo diesel

		Colhedora Convencional				ETC			
		Plantio ¹ (R\$/ha.ano)	Colheita* ² (R\$/ha.ano)	Transporte** (R\$/ha.ano)	Total (R\$/ha.ano)	Plantio (R\$/ha.ano)	Colheita* (R\$/ha.ano)	Transporte** (R\$/ha.ano)	Total (R\$/ha.ano)
Cenário Base		13,39	243,83	125,38	487,47	10,21	205,88	127,46	440,70
Fardos	3,2 t/ha	13,39	286,51	133,95	535,69	10,21	242,17	135,70	485,46
	5,4 t/ha	13,39	290,27	139,84	545,57	10,21	245,54	141,37	494,64
	7,5 t/ha	13,39	295,64	145,46	556,80	10,21	250,38	146,78	505,04
Integral	3,2 t/ha	13,29	249,43	157,95	551,67	10,26	223,41	157,44	488,96
	5,4 t/ha	13,23	254,09	184,16	554,36	10,29	237,39	182,63	528,43
	7,5 t/ha	13,17	257,98	208,18	614,29	10,31	249,69	206,00	564,33
Int. sem ponteiro	7,5 t/ha					10,31	248,61	188,58	545,59
Int. sem pont. repicada	7,5 t/ha					10,31	235,23	137,79	481,42

¹ inclui aplicação de torta de filtro, cinzas, herbicidas, colheita de mudas e plantio

² inclui colhedora e transbordos

*inclui operações de enfardamento para cenários com fardos

**transporte da colheita (colmos ou colmos + palha)

De acordo com a Tabela 35, para os cenários com colheita integral, o custo com óleo diesel é menor no plantio e na colheita, comparando cenários com as mesmas quantidades de palha recolhidas por hectare. Isto se dá em virtude da menor utilização de potência da colhedora com redução da ventilação dos extratores, da redução da área cultivada com menor perda de

colmos na colheita integral, além do maior número de operações consideradas na colheita para cenários com fardos (operações com enfardamento inclusas na colheita).

Entretanto, em função da menor densidade de carga com a palha, os cenários com colheita integral apresentam maiores custos com óleo diesel no transporte, voltando a ter custos menores quando os ponteiros são deixados no campo. A redução no consumo de combustível no transporte é ainda mais expressiva quando a palha é repicada e os ponteiros são deixados no campo (cenário ETC colheita integral sem ponteiro repicada), mantendo a mesma densidade de carga dos cenários com fardos (Tabela 36).

Tabela 36: Custos com óleo diesel no CCT (R\$/ha)

		Cenário Base	Fardos			Integral			Integral sem ponteiro	Integral sem ponteiro repicada
			3,2 t/ha	5,4 t/ha	7,5 t/ha	3,2 t/ha	5,4 t/ha	7,5 t/ha	7,5 t/ha	7,5 t/ha
Convencional	Enleirador	R\$/ha.ano	0	4,23	4,23	4,23	0	0	0	
	Enfardadora	R\$/ha.ano	0	18,30	22,06	27,43	0	0	0	
	Colhedora	R\$/ha.ano	167,88	167,88	167,88	167,88	162,86	159,55	156,51	
	Transbordo	R\$/ha.ano	75,94	75,94	75,94	75,94	86,57	94,54	101,48	
	Transporte*	R\$/ha.ano	125,38	154,09	159,98	165,61	157,95	184,16	208,18	
	Total CCT	R\$/ha.ano	369,20	420,46	430,10	441,10	407,38	438,24	466,16	
ETC	Enleirador	R\$/ha.ano		0	0	0	0	0	0	0
	Enfardadora	R\$/ha.ano		16,14	19,51	24,35	0	0	0	0
	Colhedora	R\$/ha.ano		85,75	85,75	85,75	82,71	80,73	78,94	85,75
	Transbordo	R\$/ha.ano		120,13	120,13	120,13	140,70	156,65	170,75	162,86
	Transporte*	R\$/ha.ano		155,85	161,52	166,93	157,44	182,63	206,00	188,58
	Total CCT	R\$/ha.ano		377,88	386,91	397,16	380,85	420,02	455,69	437,19

* Inclui carregamento de fardos

Os cenários com colheita integral consomem mais óleo diesel no transporte, porém, na colheita, o consumo é menor com a redução da potência dos extratores.

Além de menor consumo de combustível na colheita, a colheita integral reduz a perda de colmos, aumentando o material recolhido por hectare. Quando se analisa o custo por tonelada de material recolhido (colmo e palha base úmida), o custo com diesel é menor à medida que a quantidade de palha recolhida aumenta, para os cenários com fardos e colheita integral, com a colhedora convencional. Contudo, devido à redução na perda de colmos na colheita integral, o custo por tonelada de material recolhido é menor que o custo nos cenários com fardos. Para os

cenários com a ETC, como a perda inicial na colheita é menor, a quantidade de colmo “extra” recuperado na colheita integral não é suficiente para compensar a perda de densidade da carga, fazendo com que o custo por tonelada de material recolhido seja maior que nos cenários com fardos, exceto para os cenários Integral 3,2 t/ha e Integral sem ponteiro repicada (Figura 18).

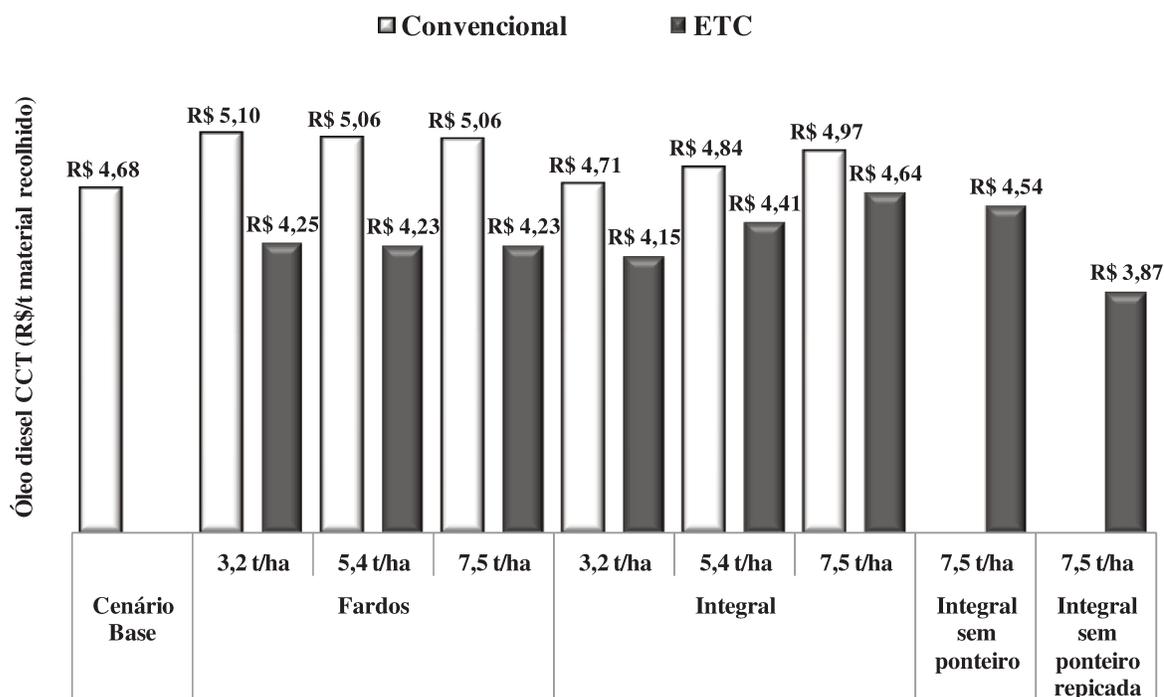


Figura 18: Custo com óleo diesel por tonelada de material recolhido (colmo ou colmo+palha)

Em relação à mão de obra utilizada, observa-se que a ETC demanda um menor número de trabalhadores nas operações mecanizadas, utiliza menos máquinas e a área de cultivo é menor; o número de trabalhadores nas operações manuais é praticamente preservado, alterando-se apenas em função da área cultivada (Tabela 31) em cada cenário. Com o recolhimento de palha, nota-se a alteração no número de motoristas relacionados ao transporte de colmos e palha (Tabela 37).

Tabela 37: Empregos na fase agrícola de acordo com os cenários analisados

						Variação em relação ao cenário Base				
		Operações Manuais	Operações Mecanizadas	Transporte (motoristas)	Total	Operações Manuais	Operações Mecanizadas	Transporte (motoristas)	Total	
Cenário Base		296	158	80	534					
Convencional	Fardos	3,2 t/ha	296	184	87	567	0,0%	16,5%	8,5%	6,1%
		5,4 t/ha	296	186	91	574	0,0%	17,7%	14,3%	7,4%
		7,5 t/ha	296	189	96	581	0,0%	19,5%	19,9%	8,7%
	Integral	3,2 t/ha	287	159	98	545	-3,0%	0,9%	22,8%	2,0%
		5,4 t/ha	283	163	111	557	-4,5%	3,2%	39,7%	4,4%
		7,5 t/ha	280	167	124	570	-5,5%	5,4%	55,1%	6,8%
ETC	Fardos	3,2 t/ha	274	136	82	492	-7,5%	-13,8%	2,6%	-7,8%
		5,4 t/ha	274	138	86	498	-7,5%	-12,7%	8,0%	-6,7%
		7,5 t/ha	274	140	90	505	-7,5%	-11,3%	13,0%	-5,5%
	Integral	3,2 t/ha	270	120	93	483	-8,8%	-24,1%	16,2%	-9,6%
		5,4 t/ha	268	125	106	499	-9,5%	-20,9%	32,5%	-6,6%
		7,5 t/ha	267	130	118	514	-9,9%	-17,9%	47,5%	-3,7%
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	267	128	108	503	-9,9%	-19,2%	35,9%	-5,8%
	Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha	267	118	80	465	-9,9%	-25,3%	0,8%	-12,9%

A Figura 19 mostra os custos de produção, considerando a área total²⁰. Os valores correspondem ao custo total da produção, incluindo preparo do solo, plantio, tratos culturais, colheita e transporte. Verifica-se que os custos com a ETC são, em média, 10% mais baixos que os custos com a colhedora convencional, chegando a ser 14% inferior quando comparamos os cenários com colheita integral 7,5 t/ha (Convencional) e colheita integral sem ponteiro repicada (ETC).

²⁰ área total: total de hectares cultivados pela usina (área de plantio (reforma e mudas) + área de colheita)

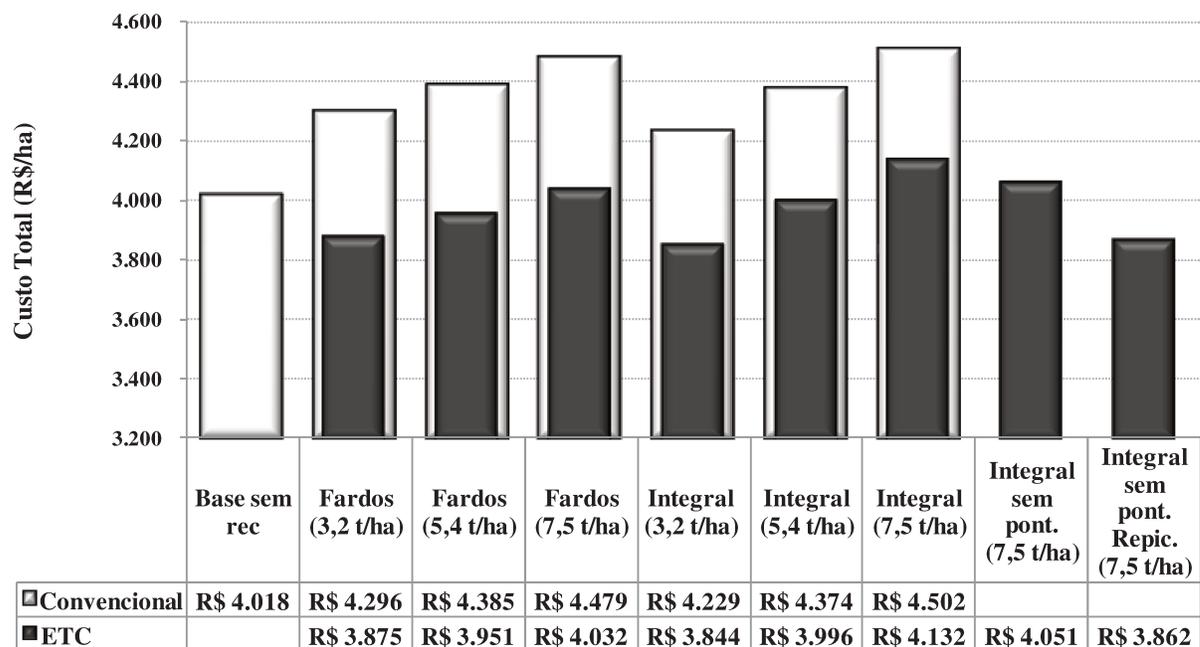


Figura 19: Custo total de produção (R\$ de 2011)

Os custos foram divididos entre colmos e palha recolhida por hectare. De acordo com o item 3.2.1, no caso dos fardos a diferença de custos com o cenário Base é direcionada para a palha. Nos cenários com recolhimento através da colheita integral, a diferença é dividida proporcionalmente à massa de colmos recuperados com a menor perda na colheita e a palha recolhida (Figura 20).

Considerando os sistemas com a colhedora convencional, verifica-se que a colheita integral apresenta custos mais baixos que nos cenários com fardos. Este fato se explica pela menor perda na colheita com a redução da potência dos extratores. Verifica-se também que pequenas quantidades de palha recolhida apresentam custos mais elevados para o sistema de recolhimento através de fardos, em virtude da baixa capacidade operacional das máquinas envolvidas no processo de enfardamento (Figura21).

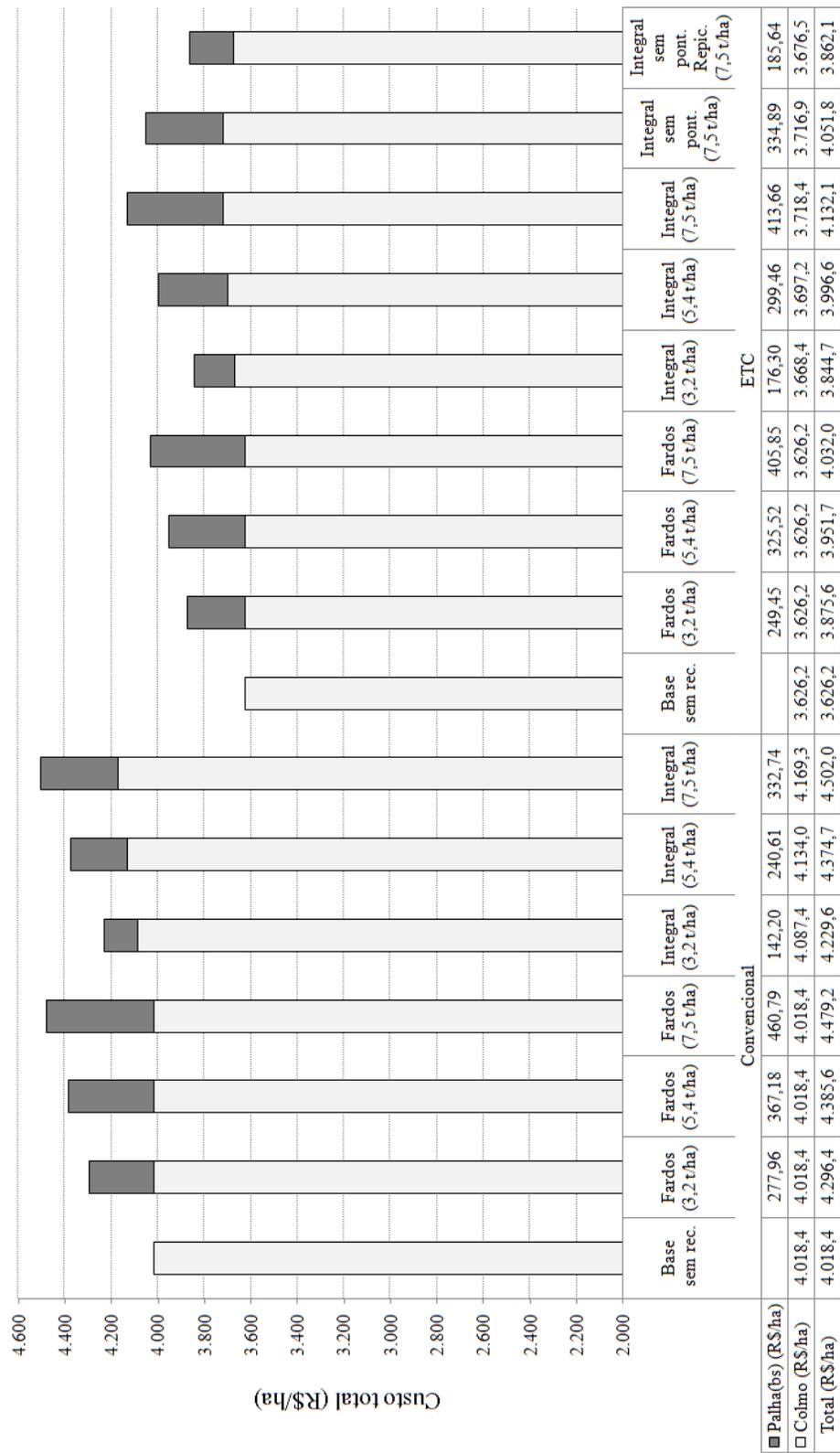


Figura 20: Custo total, palha e colmos, por hectare

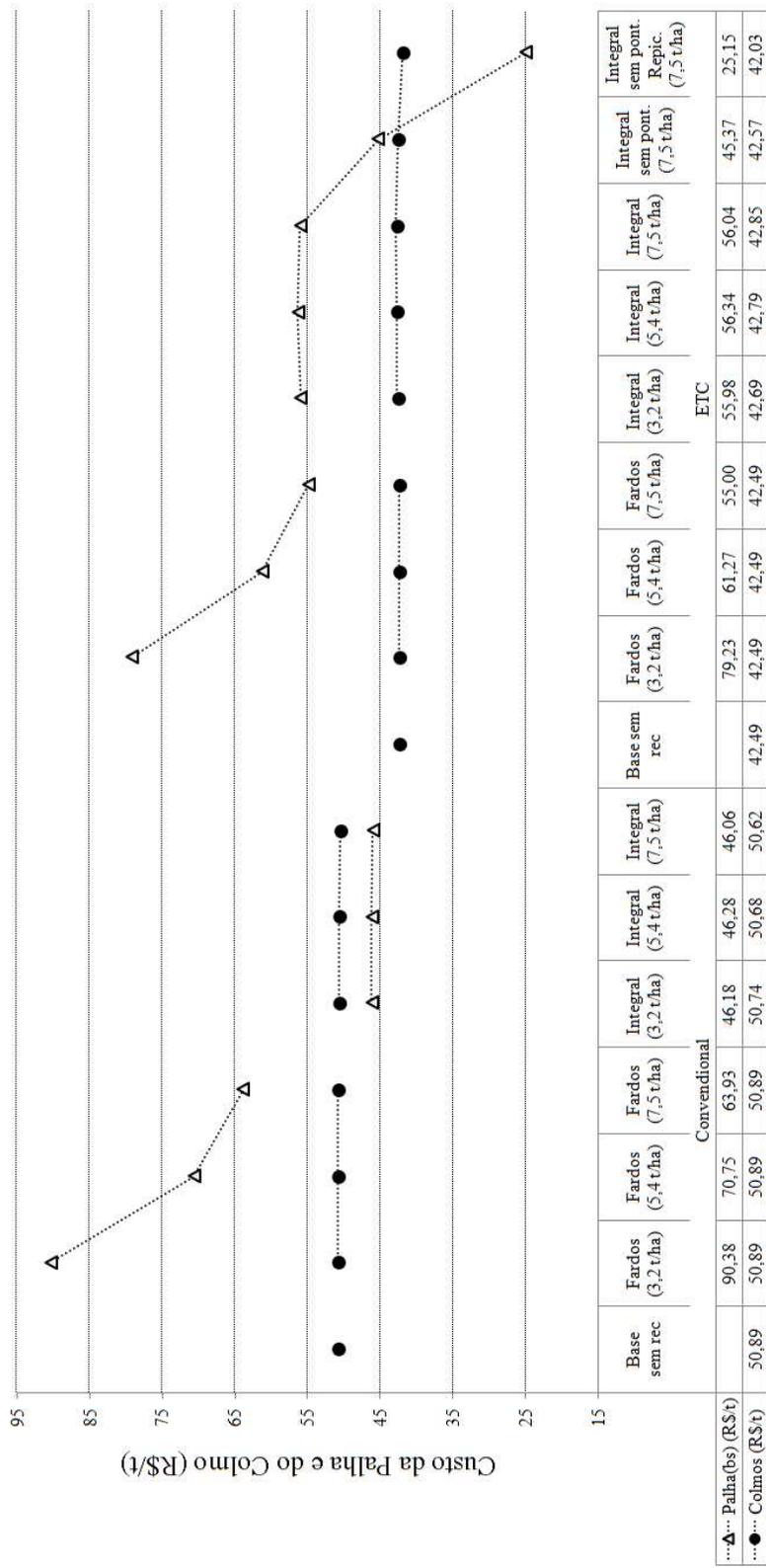


Figura 21: Custo da palha (Base seca) e do colmo

Para recolhimento com fardos, os cenários com ETC apresentam custos menores por tonelada de palha recolhida se comparados aos cenários com a colhedora convencional. Outro fator que reduz os custos nos cenários com fardos na ETC é o fato de não haver a operação de enleiramento e menor reposição de fertilizantes (parte dos ponteiros fica no campo).

Para o sistema de recolhimento de palha com colheita integral com a ETC, a redução de perda de colmos na colheita integral é menos representativa que nos cenários com a colhedora convencional, em função de menor perda inicial na colheita com ETC (Convencional 10% e ETC 5% de perda inicial, Tabela 8, item 3.2.1). Exceção ocorre para o cenário de colheita integral sem ponteiro repicada, onde a densidade de carga no transporte é preservada, o que contribui para menor custo.

Destacando-se que, para cenários com colheita integral, o custo de recolhimento de colmos e palha praticamente não se altera quando a quantidade de palha recolhida aumenta (Figura 20), isto mostra que o custo com a perda de densidade da carga com a palha é compensado pela maior quantidade de colmos recuperados por hectare com a colheita integral.

Outro ponto que merece destaque é que, em função do critério de divisão dos custos adotados neste trabalho, o custo por tonelada de palha (base seca) recolhida com colheita integral, através da ETC, apresenta valores maiores que os observados com a colhedora convencional, entretanto, quando se analisa o custo da tonelada de colmo, a ETC apresenta valores sempre abaixo dos analisados nos cenários com a colhedora convencional. É importante lembrar que colmo ainda representa a principal fonte de receita da fase agrícola e a principal matéria-prima da usina. Neste estudo, os colmos são responsáveis por 85% a 94% da receita da fase agrícola dependendo do cenário de recolhimento de palha (Tabela 38).

Tabela 38: Receita com palha e receita total (palha e colmos) da fase agrícola

			Receita Agrícola (R\$ milhão)	
			Palha	Total
Cenário Base			-	109,76
Convencional	Fardos	3,2 t/ha	6,69	116,45
		5,4 t/ha	11,29	121,05
		7,5 t/ha	15,68	125,44
	Integral	3,2 t/ha	6,49	116,25
		5,4 t/ha	10,78	120,54
		7,5 t/ha	14,81	124,57
ETC	Fardos	3,2 t/ha	6,19	115,95
		5,4 t/ha	10,45	120,21
		7,5 t/ha	14,51	124,27
	Integral	3,2 t/ha	6,10	115,86
		5,4 t/ha	10,22	119,98
		7,5 t/ha	14,13	123,89
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	14,13	123,89
	Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha	14,13	123,89

Quando comparados os dois sistemas de recolhimento de palha com a colhedora convencional, verifica-se que a colheita integral apresenta custos mais baixos, no entanto, esta diferença se reduz à medida que a quantidade de palha recolhida aumenta (Figura 20).

Na comparação dos dois sistemas de recolhimento de palha com a ETC, verifica-se que a colheita integral apresenta custos mais baixos, exceto para o cenário com 7,5 t/ha de palha recolhida, onde a capacidade operacional é favorecida e o custo com enfardamento se reduz. A colheita integral volta a ter custos menores nos cenários sem ponteiro e sem ponteiro com palha repicada, onde a densidade de carga aumenta reduzindo custos com transporte e com menor reposição de fertilizantes (Figura 21).

A Figura 22 engloba custos por hectare (Figura 20) e custos por tonelada para colmos e palha em Base seca (Figura 21), apresentados anteriormente.

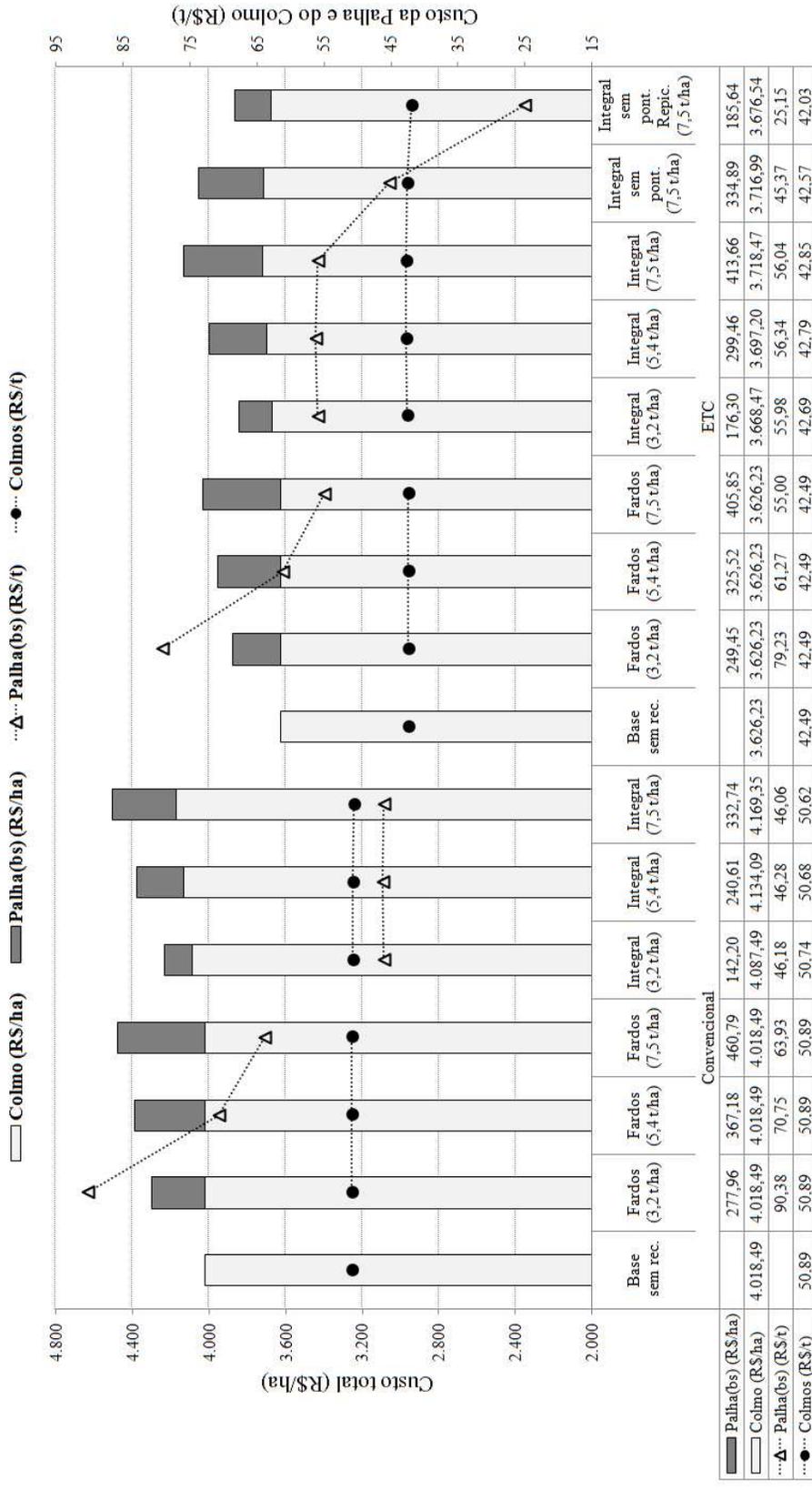


Figura 22: Custos por hectare, por tonelada de colmo e por tonelada de palha (Base seca)

Cabe lembrar que o cenário de recolhimento de 3,2t/ha de palha através de fardos, com a colhedora convencional, com custo de recolhimento de R\$ 90,38 a tonelada de palha (base seca), não seria economicamente viável com o preço da palha adotado neste trabalho, R\$ 82,57/t, considerando a fase agrícola. Quando se analisa o recolhimento através do sistema de colheita integral, verifica-se que os cenários se apresentam economicamente viáveis para o raio médio de 25 km e produtividade real de 91 t/ha (Tabela 39).

Tabela 39: Custos, receita e lucro econômico, por hectare, dos cenários analisados

		Custo		Receita		Lucro econômico			
		Colmos	Palha	Colmos	Palha	Colmos	Palha		
		R\$/ha	R\$/ha	R\$/ha	R\$/ha	R\$/ha	R\$/ha		
Convencional	Base	4.018,49		4.333,94		315,46			
	Fardos	3,2 t/ha	4.018,49	277,96	4.333,94	264,22	315,46	-13,74	
		5,4 t/ha	4.018,49	367,18	4.333,94	445,88	315,46	78,70	
		7,5 t/ha	4.018,49	460,79	4.333,94	619,28	315,46	158,48	
	Integral	3,2 t/ha	4.087,49	142,20	4.733,93	264,22	646,44	122,02	
		5,4 t/ha	4.134,09	240,61	4.985,66	445,88	851,56	205,27	
		7,5 t/ha	4.169,35	332,74	5.207,81	619,28	1.038,46	286,53	
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	3.626,23	249,45	4.683,26	264,22	1.057,03	14,78
			5,4 t/ha	3.626,23	325,52	4.683,26	445,88	1.057,03	120,36
7,5 t/ha			3.626,23	405,85	4.683,26	619,28	1.057,03	213,42	
Integral		3,2 t/ha	3.668,47	176,30	5.015,91	264,22	1.347,45	87,92	
		5,4 t/ha	3.697,20	299,46	5.232,78	445,88	1.535,57	146,42	
		7,5 t/ha	3.718,47	413,66	5.430,49	619,28	1.712,02	205,61	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	3.716,99	334,89	5.430,49	619,28	1.713,51	284,38	
Integral sem ponteiro Repicada		7,5 t/ha	3.676,54	185,64	5.430,49	619,28	1.753,95	433,63	

Os valores apresentados na Tabela 39 foram calculados considerando-se a depreciação das máquinas e a remuneração do capital investido no maquinário (12% ao ano, durante o período da vida útil de cada equipamento).

A Figura 23 mostra a que distâncias e quantidades de palha recolhida o custo de recolhimento de palha através de fardos se iguala ao custo com colheita integral, para produtividades reais de 80 t/ha, 91 t/ha e 100 t/ha. É possível observar que aumentando a quantidade de palha recolhida e a distância, os cenários com fardos ficam mais atrativos, como mostra a Figura 23. Recolhendo 3,2 t/ha de palha, os custos de recolhimento com colheita integral e fardos são iguais, para distâncias de 112,8 km, 103,5 km e 92,8 km, com

produtividades de colmos de 100 t/ha, 91 t/ha e 80 t/ha, respectivamente, com colheita através da colhedora convencional. Quando aumentamos a quantidade recolhida para 7,5 t/ha de palha, as distâncias se reduzem para 55,8 km, 54,3 km e 52,7 km respectivamente às produtividades de 100 t/ha, 91 t/ha e 80 t/ha de colmos.

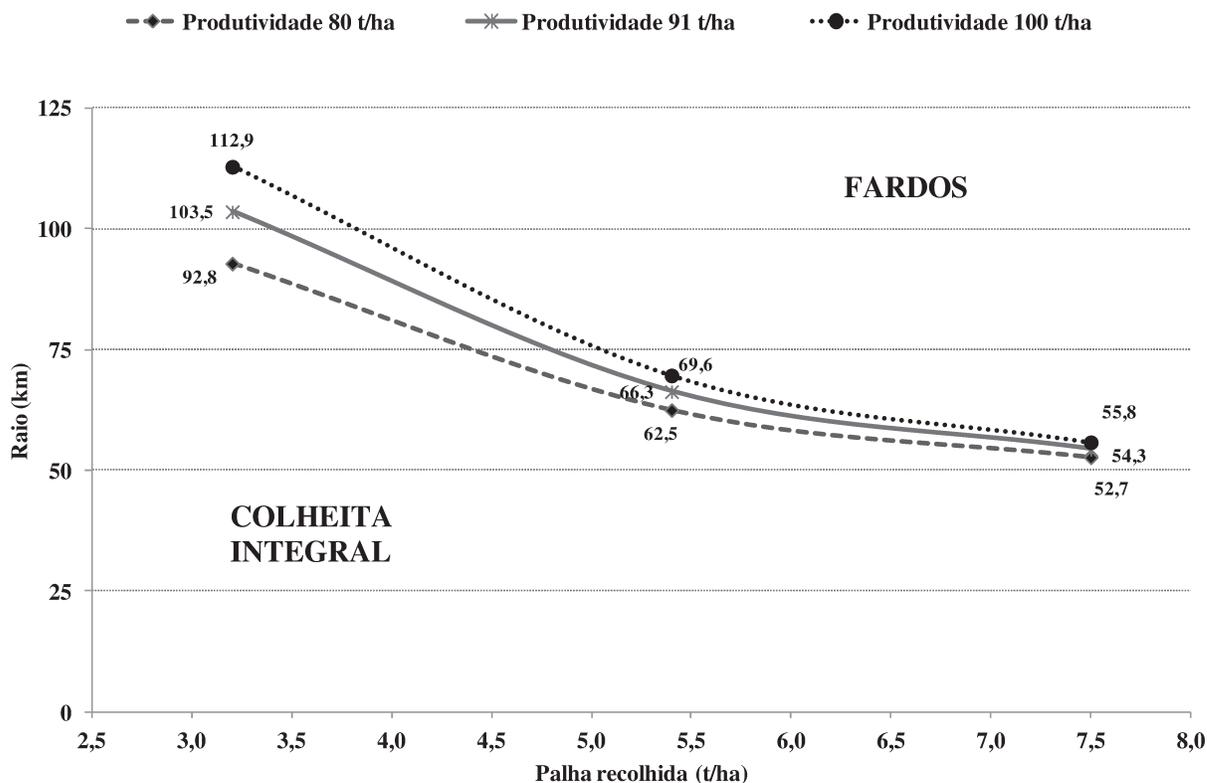


Figura 23: Análise de sensibilidade de custos de recolhimento de palha com colheita integral e fardos, em função da distância de transporte, da quantidade de palha recolhida e da produtividade de cana – colhedora convencional

O mesmo acontece nos cenários com a ETC (Figura 24). Na medida em que se aumenta a quantidade de palha recolhida por hectare, os custos com o recolhimento através de fardos se igualam em distância menores, como pode ser observado na Figura 23. Recolhendo 3,2 t/ha de palha, a colheita convencional tem custo mais baixo que o fardo até 52,4 km de distância para produtividade de 80 t/ha, 60,2 km para produtividade de 91 t/ha e 67,3 km para produtividade de 100 t/ha; acima destas distâncias o fardo se torna a opção mais favorável. Quando a quantidade recolhida de palha é de 7,5 t/ha, o recolhimento com fardo se torna mais atrativo para distâncias

superiores a 23,0 km, 23,6 km e 34,4 km, respectivamente para produtividades de 80 t/ha, 91 t/ha e 100 t/ha.

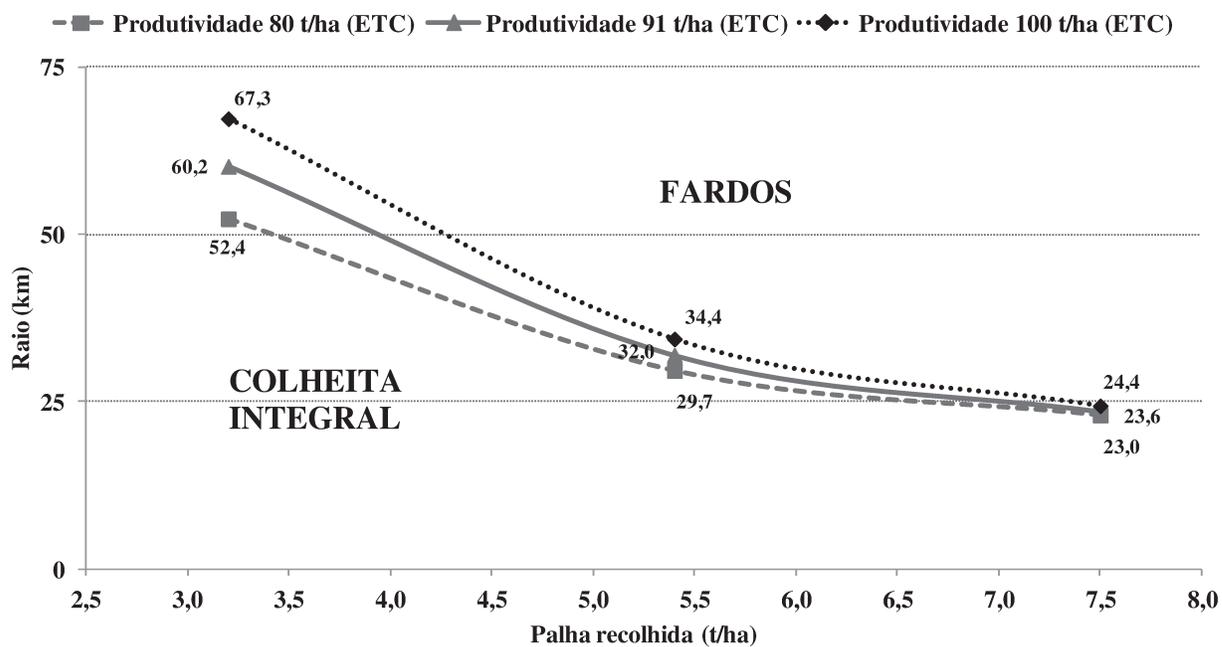


Figura 24: Análise de sensibilidade de custos de recolhimento de palha com colheita integral e fardos, em função da distância de transporte, da quantidade de palha recolhida e da produtividade de cana – ETC

A partir dos dados de investimentos iniciais, custos operacionais e receita, de acordo com o item 3.3.1, foi calculada a TIR da fase agrícola (Figura 25).

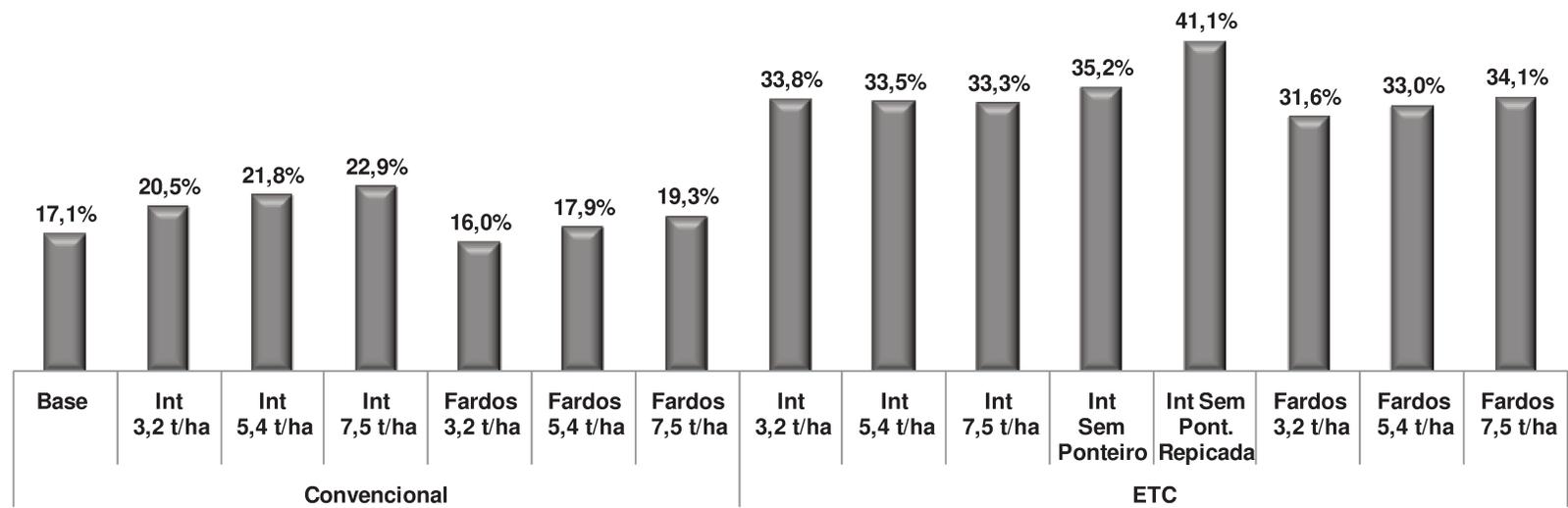


Figura 25: Taxa interna de retorno da fase agrícola

Verifica-se que o cenário com 3,2 t/ha de palha enfardada, colhedora convencional, apresenta TIR menor que a do cenário Base; isto porque o custo de recolhimento de R\$90,38/t palha (Base seca) é maior que o preço adotado, R\$ 82,57/t palha (Base seca). Os demais cenários com recolhimento de palha apresentam valor de TIR acima do apresentado no cenário sem recolhimento (Base). Os cenários com a ETC apresentam significativa vantagem em relação aos cenários com a colhedora convencional, em virtude de a colheita ser mais eficiente, com investimento inicial e custos operacionais menores. Destaque para o cenário de colheita integral com palha sem ponteiro e repicada que reduz o custo com transporte.

Os resultados da análise de viabilidade econômica mostram boa oportunidade econômica a ser explorada com o desenvolvimento da ETC, reforçando a necessidade de eficiência nas operações agrícolas, principalmente na colheita (reduzindo perdas) e no transporte da palha (melhorando a densidade de carga).

4.1.2. Fase Industrial

De acordo com as características e quantidade da palha recolhida em cada cenário analisado, as simulações com Aspen Plus[®] indicam os rendimentos industriais. O recolhimento de palha integral altera a quantidade produzida de etanol e açúcar em função da quantidade de fibras na moenda. Com o aumento de fibras na moenda, o rendimento da extração cai, reduzindo a produção de etanol, anidro e hidratado, (Figura 26) e açúcar (Figura 27).

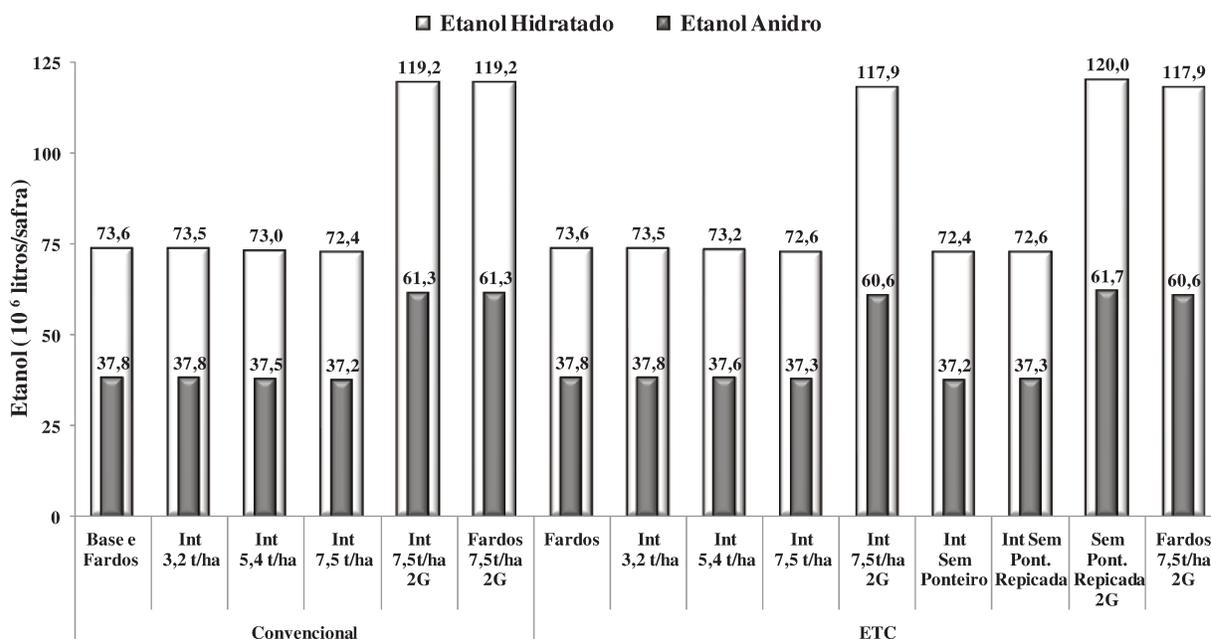


Figura 26: Produção de etanol anidro e hidratado por safra

Verifica-se, portanto, redução na produção de etanol (1G), anidro e hidratado, nos cenários com colheita integral, quando comparados ao cenário Base. Quando se analisa os cenários de colheita integral com ETC onde são recolhidos 7,5 t/ha de palha, verifica-se ligeira queda na produção para o cenário sem ponteiro devido à menor umidade da palha que absorve mais açúcar. Já no cenário sem ponteiro com palha repicada, a maior eficiência da limpeza a seco, devido à palha com tamanhos menores, compensa a baixa umidade da palha.

Os cenários com recolhimento de palha através de fardos não sofrem alterações na produção, quando comparados com o cenário Base (sem recolhimento), já que a palha chega separadamente na usina e não passa pela moenda. Entretanto, cabe lembrar que os fardos possuem maior quantidade de impurezas minerais que ocasionam custos com desgastes nas caldeiras, tubulações e exaustores. Estes custos não foram considerados neste estudo por falta de dados na bibliografia consultada. A Figura 27 mostra a produção de açúcar nos cenários analisados que, assim como a produção de etanol, apresenta ligeira queda nos cenários com colheita integral.

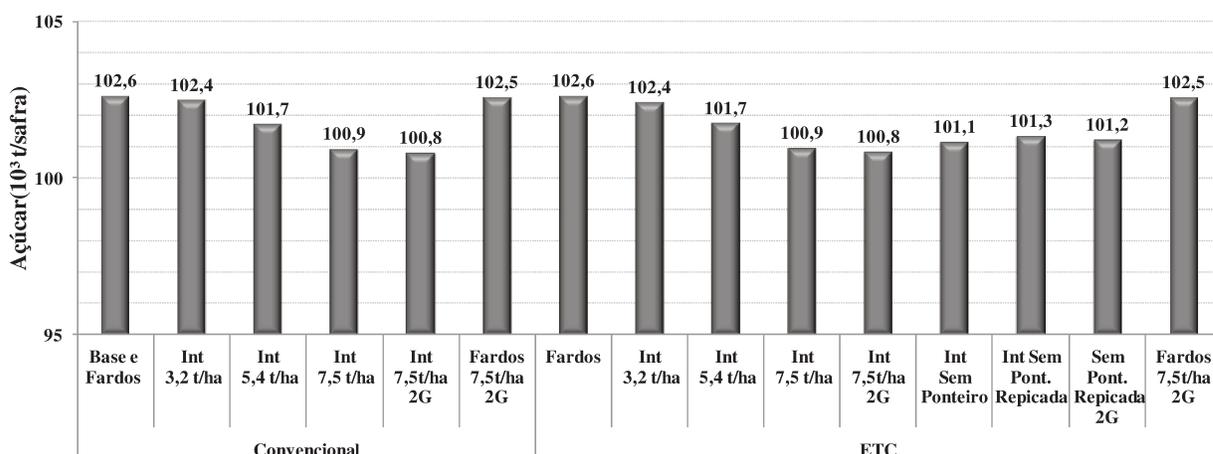


Figura 27: Produção de açúcar por safra

A produção de excedente de eletricidade, naturalmente, aumenta com o recolhimento de palha, exceto para os cenários com tecnologia de segunda geração que utilizam parte da palha e do bagaço para produção de etanol e consomem mais vapor no processo, reduzindo a quantidade de eletricidade excedente (Figura 28).

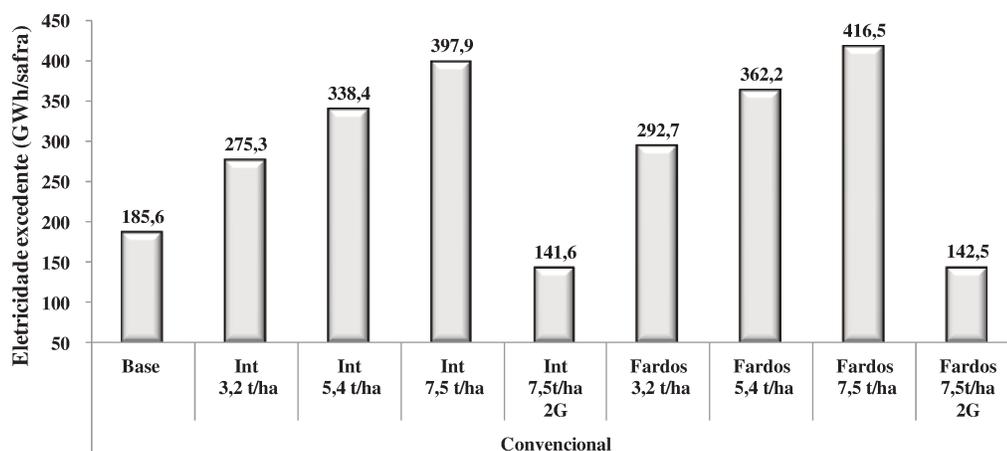


Figura 28: Produção de eletricidade excedente por safra – Cenários com colhedora convencional

Os cenários com ETC processam menos palha que os cenários com a colhedora convencional, já que a quantidade de palha foi fixada por hectare e os cenários com ETC possuem menor área cultivada e, portanto, apresentam pequena redução na eletricidade excedente produzida, quando comparados com os cenários com colhedora convencional (Figura 29).

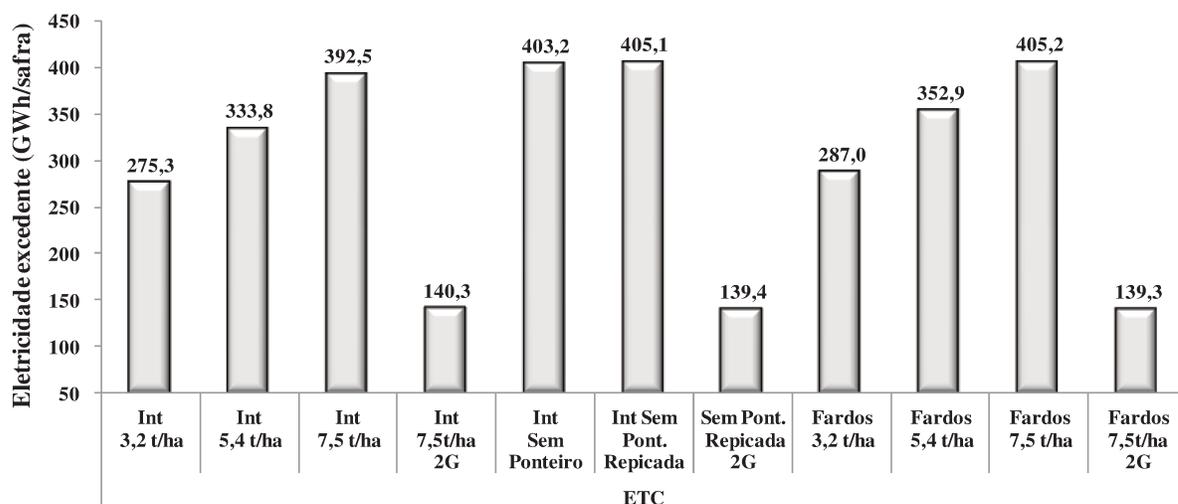


Figura 29: Produção de eletricidade excedente por safra – Cenários com ETC

Como mencionado, a colheita integral reduz a extração de caldo, devido ao aumento de fibra na moenda decorrente da baixa eficiência de limpeza da estação de limpeza a seco, reduzindo o rendimento industrial por material processado. Entretanto, quando se analisa o rendimento por hectare, verifica-se que a redução nas perdas da colheita é um fator importante, pois mesmo com menor rendimento industrial, a produção por hectare com a colheita integral supera a produção dos cenários Base e fardos (Figura 30).

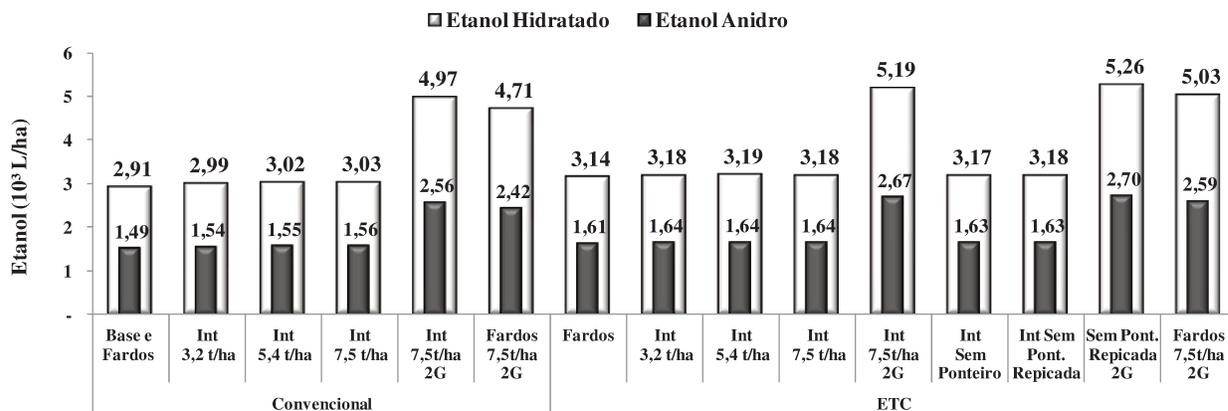


Figura 30: Produção de etanol por hectare

Os cenários fardos com a ETC produzem, em média, 230 litros de etanol hidratado e 120 litros de etanol anidro, por hectare, a mais que o cenário Base da convencional. Os cenários com colheita integral apresentam diferença ainda maior. A produção de açúcar também é influenciada pela menor perda na colheita (Figura 31).

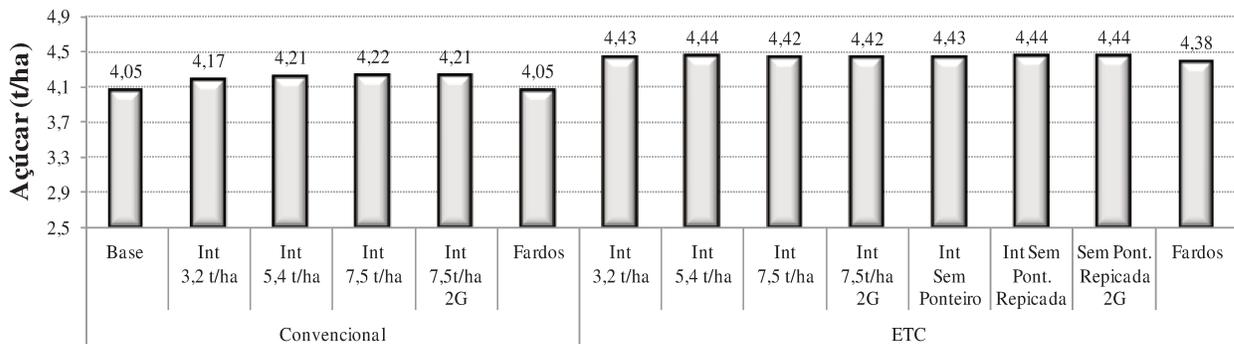


Figura 31: Produção de açúcar por hectare

O aumento de produção por hectare chega a 170 kg de açúcar quando se compara o cenário Base com o cenário de colheita integral recolhendo 7,5 t/ha de palha, com colhedora convencional. Cenários com fardos da ETC apresentam aumento de 330 kg de açúcar por hectare cultivado, chegando a 400 kg de açúcar por hectare com a colheita integral, em comparação ao cenário Base.

A produção de eletricidade também sofre alterações com o sistema de recolhimento; a umidade da palha que chega até a usina com o recolhimento através dos fardos é menor, necessitando de menor consumo de vapor e produzindo mais eletricidade para exportação. Com a colheita integral, com maior recuperação de colmos por hectare, a quantidade de bagaço disponível também é maior, fazendo com que a produção de eletricidade excedente seja um pouco maior em comparação aos cenários com fardos, para cenários com a colhedora convencional (Figura 32).

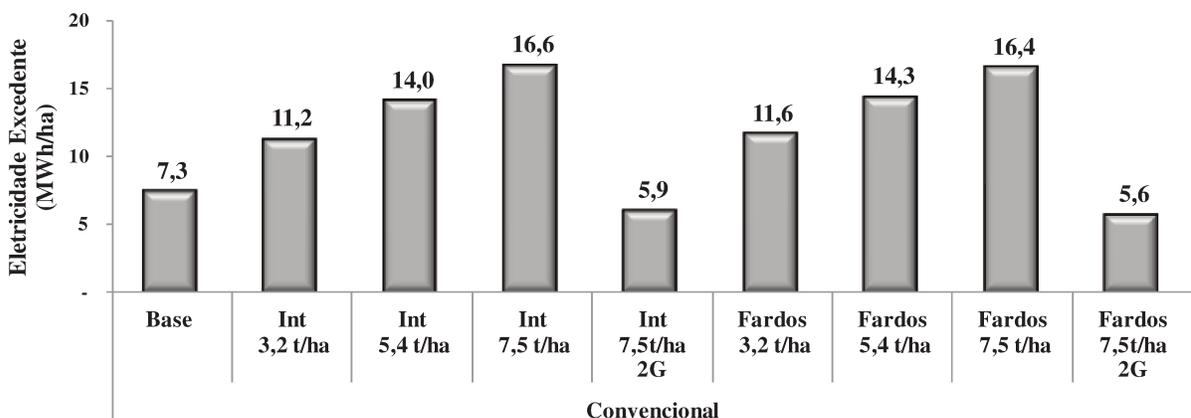


Figura 32: Produção de eletricidade excedente por hectare – cenários com colhedora convencional

Nos cenários com a ETC, como a perda inicial de colmos é menor, os cenários com fardos apresentam valores de produção de eletricidade excedente ligeiramente maiores que os cenários com colheita integral (Figura 33). Cabe lembrar que com menor perda, os cenários com colheita integral necessitam de menor área, reduzindo a palha recolhida.

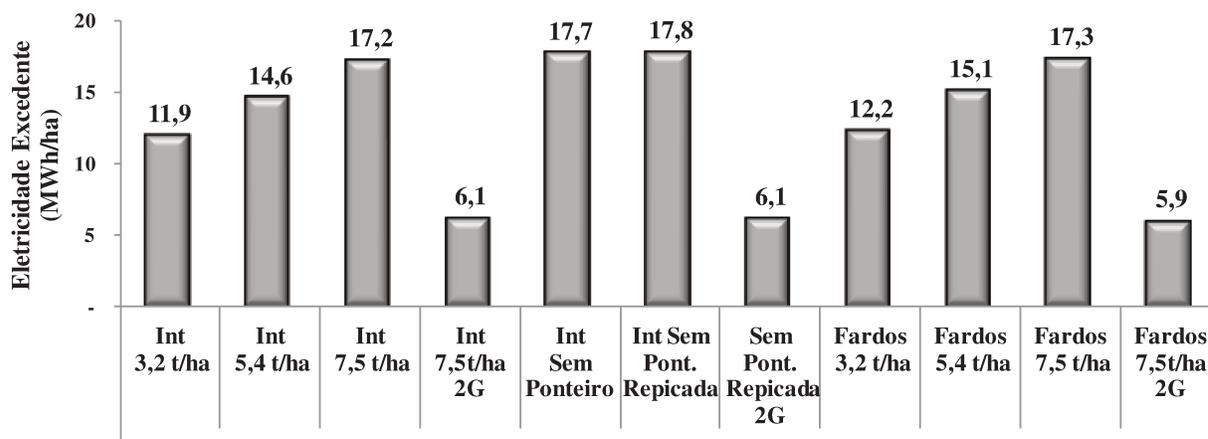


Figura 33: Produção de eletricidade excedente, em MWh, por hectare – cenários com ETC

No caso dos cenários 1G2G, o excedente de eletricidade é menor porque parte da palha e do bagaço são utilizados como matéria-prima para a produção de etanol 2G e também em função do maior gasto de vapor no processo, tanto para cenários com colhedora convencional como para os cenários com ETC (Figuras 32 e 33).

Ao analisar a receita gerada em cada cenário, verifica-se que a receita com etanol e açúcar fica um pouco menor nos cenários com recolhimento de palha através da colheita integral. Já a receita com eletricidade, naturalmente, aumenta nos cenários com recolhimento de palha e, nos cenários com a ETC, que recolhe em menor área devido a menor perda de colmos, a receita é um pouco menor se comparada com os cenários da colhedora convencional (Tabela 40).

Tabela 40: Receita Anual – fase industrial

		RECEITA ANUAL (R\$ milhão)					Total
			Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Açúcar	Eletricidade	
Convencional	Fardos	Base	42,2	72,3	72,8	20,5	207,7
		3,2 t/ha	42,2	72,3	72,8	32,3	219,5
		5,4 t/ha	42,2	72,3	72,8	39,9	227,2
		7,5 t/ha	42,2	72,3	72,8	45,9	233,2
		2G 7,5 t/ha	68,3	117,1	72,7	15,7	273,8
	Integral	3,2 t/ha	42,1	72,2	72,6	30,7	217,6
		5,4 t/ha	41,8	71,7	72,1	37,3	222,9
		7,5 t/ha	41,5	71,1	71,6	43,9	228,0
		2G 7,5 t/ha	68,2	116,9	71,5	15,6	272,2
		Fardos	3,2 t/ha	42,2	72,3	72,8	31,6
5,4 t/ha	42,2		72,3	72,8	38,9	226,2	
7,5 t/ha	42,2		72,3	72,8	44,7	231,9	
2G 7,5 t/ha	67,6		115,8	72,7	15,4	271,5	
Integral	3,2 t/ha		42,1	72,1	72,6	30,3	217,2
	5,4 t/ha	41,8	71,7	72,1	36,8	222,5	
	7,5 t/ha	41,5	71,2	71,6	43,3	227,5	
	2G 7,5 t/ha	67,8	116,2	71,5	15,5	271,0	
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	41,6	71,3	71,7	44,4	229,0
ETC	Integral sem pont. Repicada	7,5 t/ha	41,7	71,4	71,8	44,7	229,5
		2G 7,5 t/ha	68,8	117,9	71,8	15,4	273,8

Quando se analisa a taxa interna de retorno da fase industrial, verifica-se que os cenários com colheita integral são menos atrativos, em virtude do menor rendimento industrial e do maior investimento necessário para instalação e manutenção da estação de limpeza a seco (Figura 34).

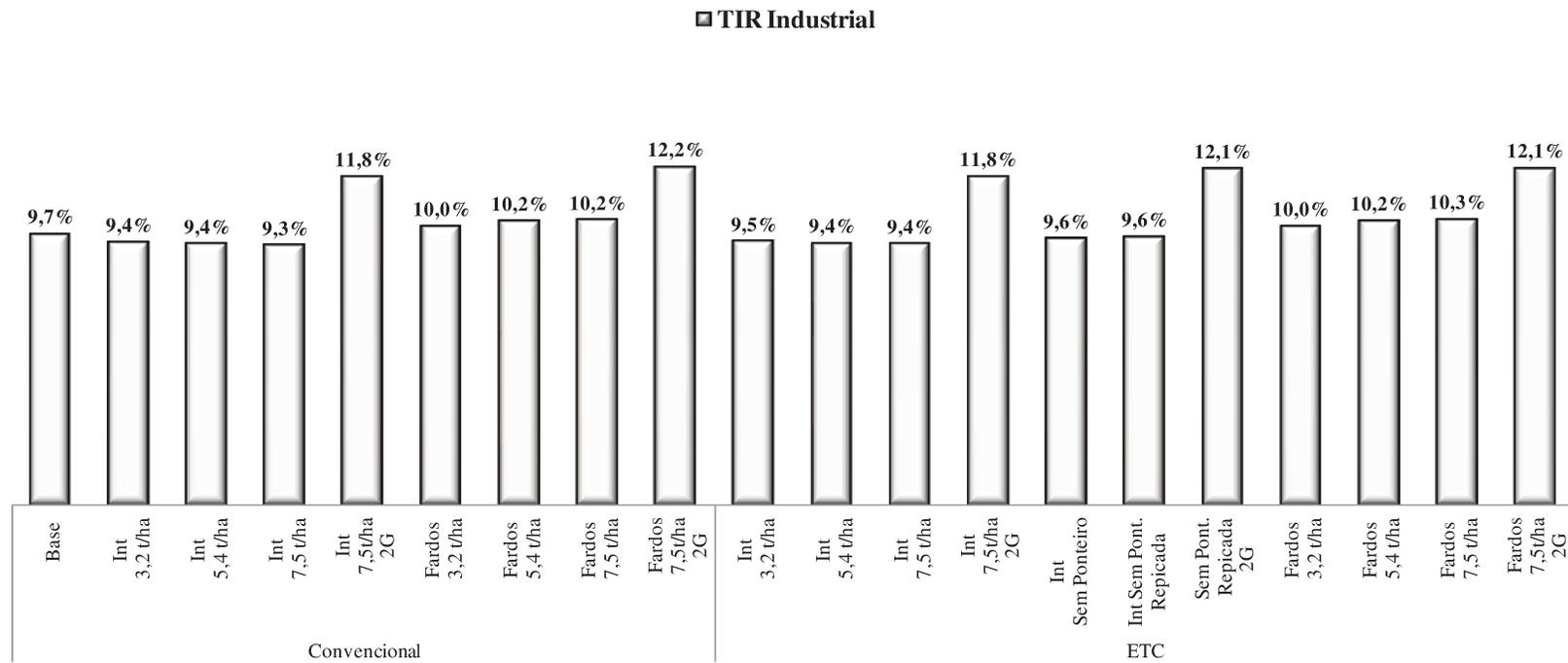


Figura 34: Taxa Interna de Retorno da fase industrial

4.1.3. Análise do modelo verticalizado de produção

Ao analisar os cenários de recolhimento de palha de forma verticalizada, fase agrícola em conjunto com a fase industrial, verifica-se que o recolhimento de palha é atrativo em todos os cenários analisados. Os cenários com colheita integral possuem menor rendimento, maior investimento inicial e maior custo operacional na fase industrial, de acordo com o que foi detalhado no item 3.3.2. . Esses pontos negativos na indústria são compensados na fase agrícola, onde o custo de recolhimento é menor. Para os cenários com fardos a ordem é inversa; o maior custo de recolhimento é compensado pelo rendimento, pelo menor custo operacional e menor investimento inicial na indústria (Figura 35).

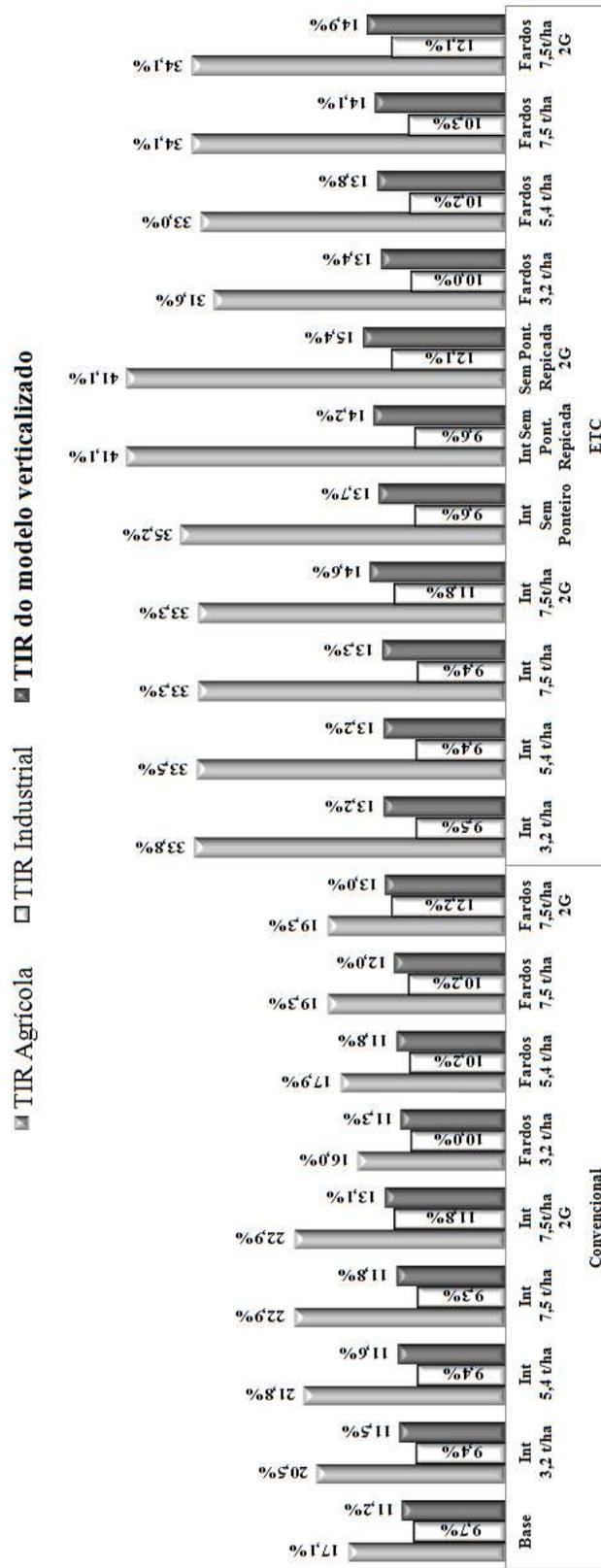


Figura 35: Taxa Interna de Retorno da fase agrícola, fase industrial e modelo verticalizado de produção

Destaque para os cenários com a ETC, principalmente o cenário com recolhimento através da colheita integral com palha sem ponteiro repicada, que apresenta a maior taxa interna de retorno. O cenário fardos 3,2 t/ha, na fase agrícola apresentou TIR menor que o cenário Base, entretanto, a análise do modelo verticalizado mostra que os ganhos na fase industrial são suficientes para viabilizar economicamente esta rota de recolhimento, indicando a necessidade da análise do modelo verticalizado, onde se considera a fase agrícola e a industrial. O estudo adotou Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12% ao ano. Assim, os cenários que apresentam TIR menores que a TMA adotada, possuem VPL negativo, como mostra a Tabela 41.

Tabela 41: TIR e VPL da Fase Agrícola e do Modelo verticalizado

			Fase Agrícola		Modelo verticalizado		
			TIR	VPL (R\$ Milhão)	TIR	VPL (R\$ Milhão)	
Convencional	Fardos	Base	17,1%	26,2	11,2%	-25,8	
		3,2 t/ha	16,0%	23,1	11,3%	-22,2	
		5,4 t/ha	17,9%	35,1	11,8%	-8,4	
		7,5 t/ha	19,3%	45,5	12,0%	0,3	
		2G 7,5 t/ha			13,0%	41,9	
	Integral	3,2 t/ha	20,5%	48,1	11,5%	-18,1	
		5,4 t/ha	21,8%	59,8	11,6%	-12,8	
		7,5 t/ha	22,9%	70,1	11,8%	-6,8	
		2G 7,5 t/ha			13,1%	47,1	
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	31,6%	114	13,4%	46,8
			5,4 t/ha	33,0%	125,9	13,8%	63,0
			7,5 t/ha	34,1%	139	14,1%	73,0
2G 7,5 t/ha					14,9%	129,2	
Integral		3,2 t/ha	33,8%	124	13,2%	40,5	
		5,4 t/ha	33,5%	127,7	13,2%	41,3	
		7,5 t/ha	33,3%	136,2	13,3%	46,1	
		2G 7,5 t/ha			14,6%	116,9	
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	35,2%	145,9	13,7%	58,9	
	Integral sem ponteiro Repicada	7,5 t/ha	41,1%	169,6	14,2%	78,9	
	Integral sem ponteiro Repicada	2G 7,5 t/ha			15,4%	153,4	

Uma análise foi realizada para verificar a variação da TIR dos cenários em função da variação do preço do MWh de energia elétrica. A Figura 35 mostra que o preço pago pela energia tem influência importante na TIR Verticalizada. Os cenários com tecnologia 1G2G apresentam variação discreta, pois proporcionalmente a participação da energia elétrica excedente na receita destes cenários é menor.

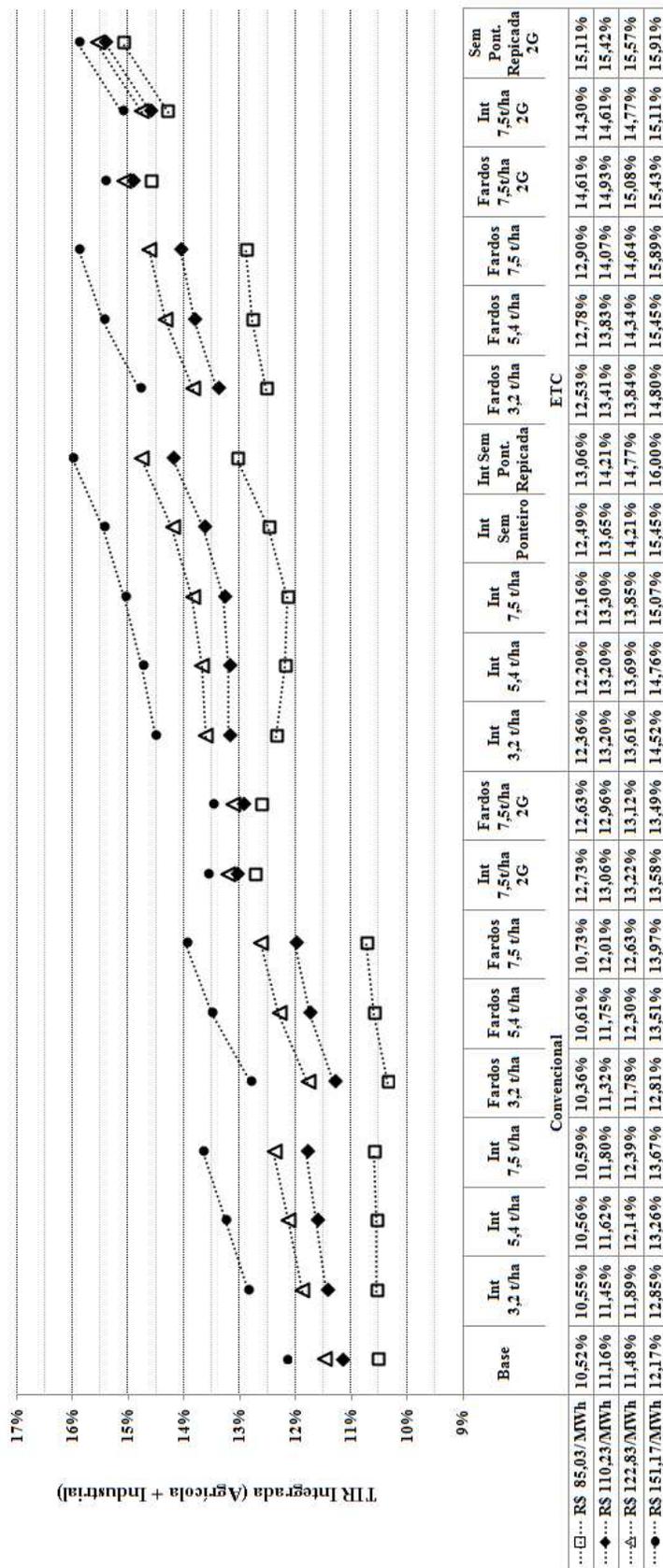


Figura 36: TIR do modelo verticalizado em função da variação do preço MWh de energia elétrica excedente

4.2. Impactos ambientais

A seguir são discutidos os impactos ambientais através da Análise de Ciclo de Vida - ACV (Life Cycle Assessment - LCA) com o auxílio do software SimaPro®, de acordo com os cenários analisados.

Os impactos foram analisados considerando: 1 - produção de cana e o recolhimento da palha (fase agrícola) e 2 - modelo verticalizado de produção (agrícola + industrial).

De acordo com os resultados obtidos para a fase agrícola, o uso de fertilizantes tem maior participação nas categorias de impacto Eutrofização, Acidificação e Aquecimento Global. A produção de fertilizantes é o segundo fator de maior participação nestas categorias de impacto. O uso de óleo diesel aparece como terceiro maior responsável nas categorias Acidificação e Aquecimento Global. A produção de fertilizantes e corretivos para o solo é o principal fator para Depleção Abiótica, em seguida a produção de óleo diesel, transporte de colmos e palha. Na categoria Toxicidade Humana o uso de agroquímicos é o principal fator, seguido por produção de fertilizantes e uso de óleo diesel (Apêndices 1 ao 5).

Os impactos por hectare cultivado, considerando a produção total (colmos + palha), correspondentes à fase agrícola podem ser observados na Tabela 42.

Tabela 42: Impactos ambientais, por categoria analisada, na fase agrícola

		Fase Agrícola (por hectare cultivado)					
		Depleção abiótica	Acidificação	Eutrofização	Aquecimento Global	Toxicidade Humana	
		(kg Sb eq)	(kg SO ₂ eq)	(kg PO ₄ eq)	(kg CO ₂ eq)	(kg 1,4 - DB eq)	
Convencional	Base		10,0	65,9	16,8	2.938,4	1.966,6
	Fardos	3,2 t/ha	10,8	70,3	17,9	3.010,4	2.051,3
		5,4 t/ha	11,1	73,1	18,6	3.022,1	2.077,5
		7,5 t/ha	11,4	75,7	19,3	3.036,3	2.105,4
	Integral	3,2 t/ha	10,7	70,3	17,9	3.003,1	2.027,4
		5,4 t/ha	11,3	72,5	18,5	3.037,2	2.065,4
7,5 t/ha		11,7	74,4	18,9	3.062,2	2.097,9	
ETC	Fardos	3,2 t/ha	10,1	68,4	17,4	2.899,4	1.931,7
		5,4 t/ha	10,3	70,5	17,9	2.896,7	1.951,7
		7,5 t/ha	10,6	72,6	18,5	2.896,9	1.973,4
	Integral	3,2 t/ha	10,2	69,3	17,6	2.927,2	1.931,4
		5,4 t/ha	10,8	71,5	18,2	2.970,9	1.977,6
		7,5 t/ha	11,3	73,4	18,6	3.005,8	2.017,8
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	11,0	72,0	18,3	2.945,6	1.992,0
	Integral sem ponteiro repicada	7,5 t/ha	10,2	71,5	18,2	2.836,6	1.938,8

Os cenários fardos 7,5 t/ha e colheita integral 7,5 t/ha, da colhedora convencional, apresentam valores ligeiramente maiores para as categorias analisadas. Em relação ao cenário Base, sem recolhimento, os impactos aumentam à medida que se aumenta o recolhimento de palha, em virtude da reposição de fertilizantes e utilização de máquinas para recolhimento (fardos) ou transporte (colheita integral) da palha. É importante ressaltar que, apesar dos impactos apresentarem aumento, a quantidade total de material recolhido, nos cenários com recolhimento de palha, também aumenta. Nos cenários com a ETC, os impactos são um pouco menores, já que o sistema é mais eficiente, utilizando menor número de máquinas. Destaque para colheita integral sem ponteiro com palha repicada que apresenta valores menores que o cenário Base para as categorias aquecimento global e toxicidade humana, em virtude de menor necessidade de reposição de fertilizantes e menor consumo de óleo diesel no transporte.

Quando se analisa os impactos ambientais da fase agrícola por safra (considerando a área total cultivada), verifica-se que a colheita integral apresenta valores de impactos menores, pois a área total cultivada é menor em função da menor perda na colheita. Verifica-se, também, que os cenários com ETC - que utilizam menos máquinas - apresentam menor perda e, portanto, também apresentam menor área total cultivada – estes cenários mostram impactos menores quando comparados aos cenários com a colhedora convencional (Figura 37).

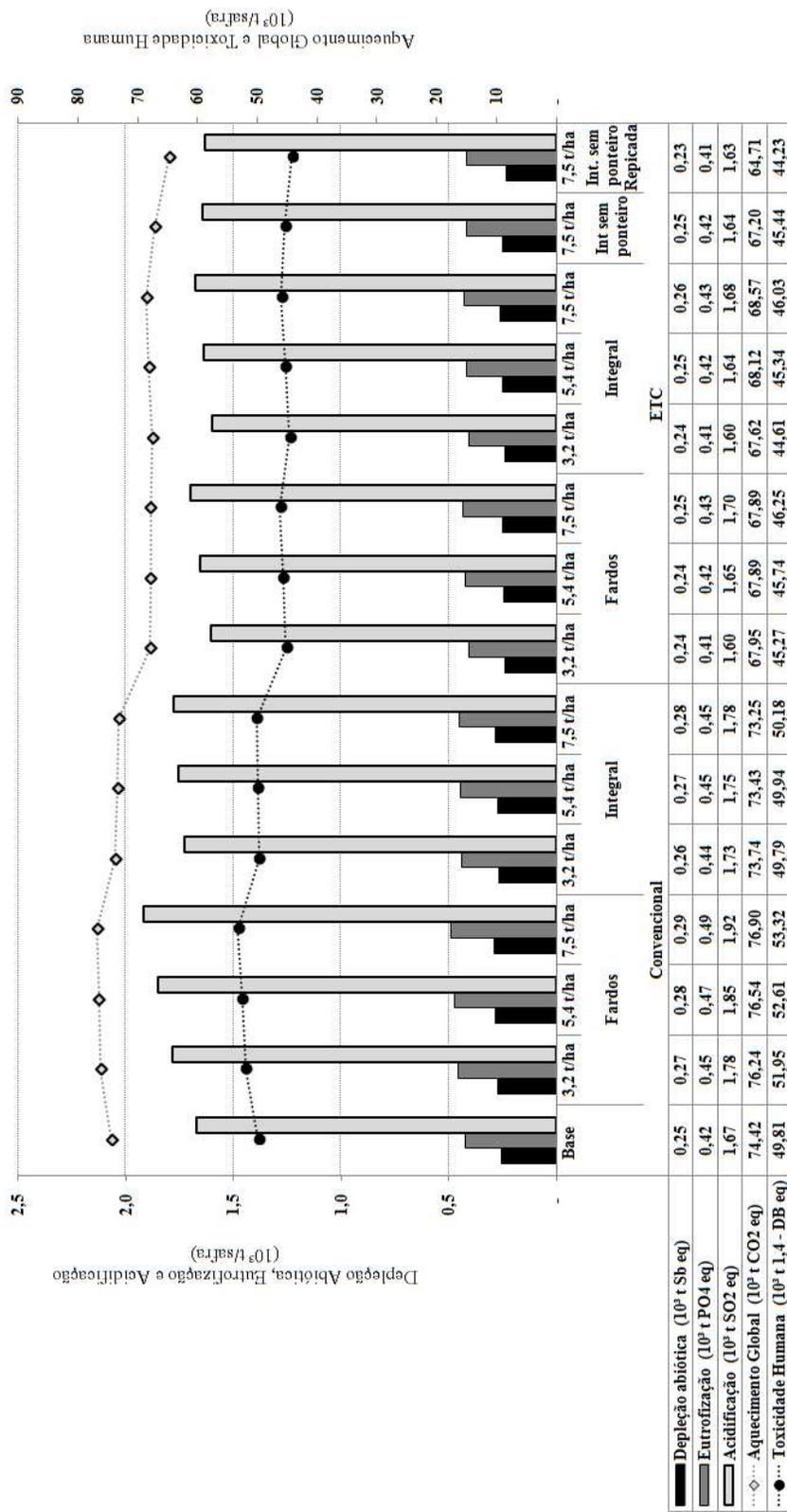


Figura 37: Impactos ambientais da fase agrícola por safra (produção de 2 milhões de toneladas de colmos)

Quando se analisa os impactos ambientais por safra do modelo verticalizado de produção (fase agrícola + fase industrial), os resultados obtidos indicam que a fase agrícola tem expressiva participação nas categorias de impacto analisadas, representando mais de 80% dos impactos totais. Considerando a fase industrial, para as categorias Acidificação, Eutrofização e Aquecimento Global, a maior participação vem de emissões diretas na usina²¹; após verifica-se a participação de insumos industriais²² (mais expressivos para os cenários 1G2G). Para Depleção Abiótica e Toxicidade Humana, insumos industriais apresentam a maior participação nas categorias de impacto; em seguida vem a produção de equipamentos industriais (Apêndices 6 ao 10).

Como a fase agrícola tem grande participação nas categorias de impacto analisadas, observamos que os impactos do modelo verticalizado se assemelham aos da fase agrícola. Os cenários com 1G2G apresentam valores maiores, quando analisamos os impactos por safra, em virtude da maior produção industrial. Os cenários com ETC apresentam valores menores em virtude da maior eficiência da fase agrícola (Figura 38).

Quando se analisa os impactos ambientais considerando a alocação econômica, ou seja, os impactos por milhão de reais produzidos, os cenários com 1G2G apresentam valores menores para as categorias de impactos, uma vez que a receita é maior nos cenários com 1G2G. Apenas para a categoria Depleção Abiótica, os cenários 1G2G apresentam valores maiores ou iguais; isto se deve aos insumos industriais, que possuem a maior participação nesta categoria, considerando apenas a fase industrial (Figura 39).

²¹ Emissões da caldeira (queima da palha e bagaço) e perdas de etanol na destilação.

²² Ácido sulfúrico: tratamento das leveduras da fermentação do etanol e pré-tratamento da 2G; água: reposição e tratamento de águas de recirculação; polímero floculante e antibiótico: tratamento do caldo; zeólitas: reposição das peneiras moleculares da desidratação do etanol; enzimas: na 2G.

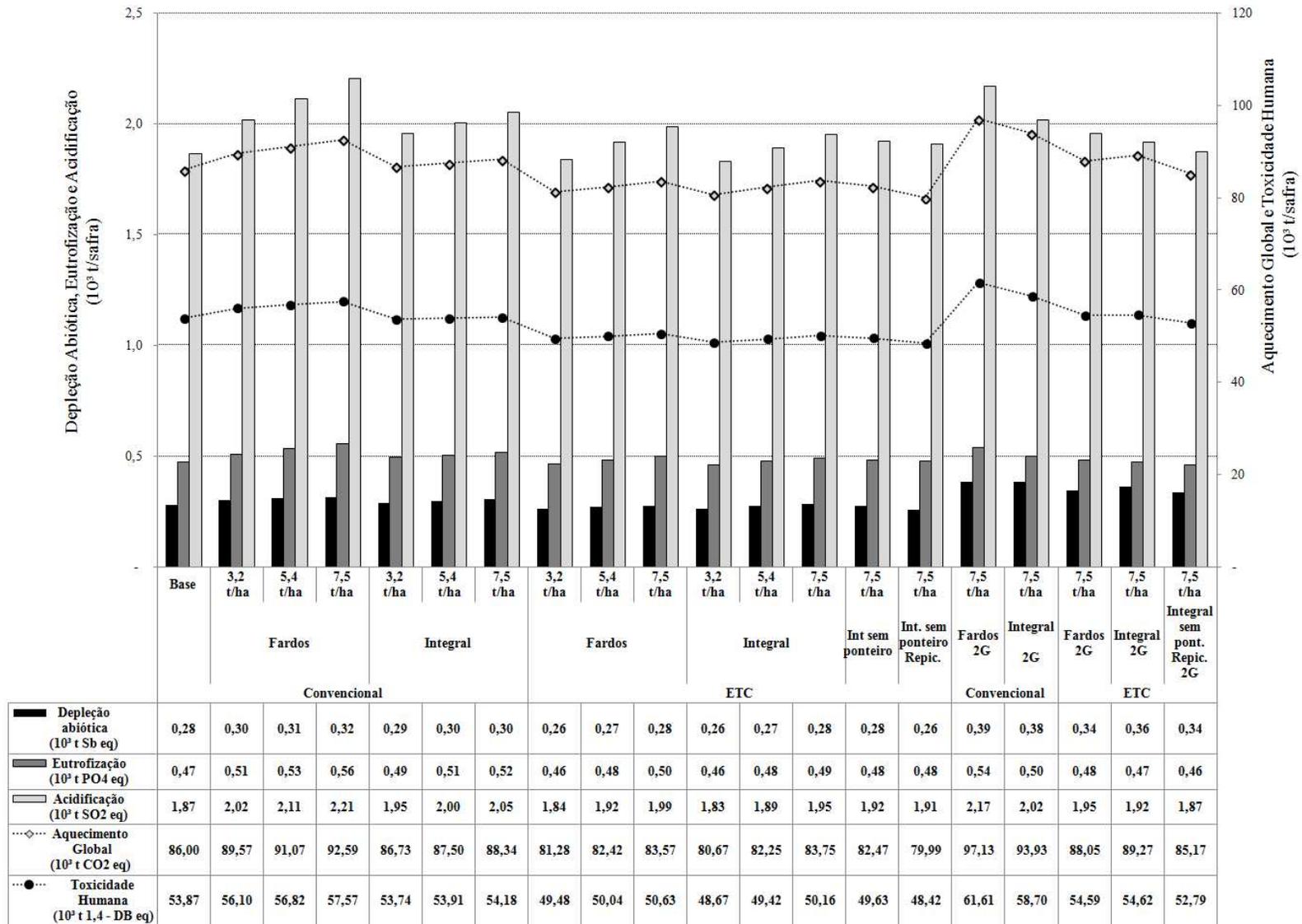


Figura 38: Impactos ambientais do modelo verticalizado por safra (processamento de 2 milhões de toneladas de colmos)

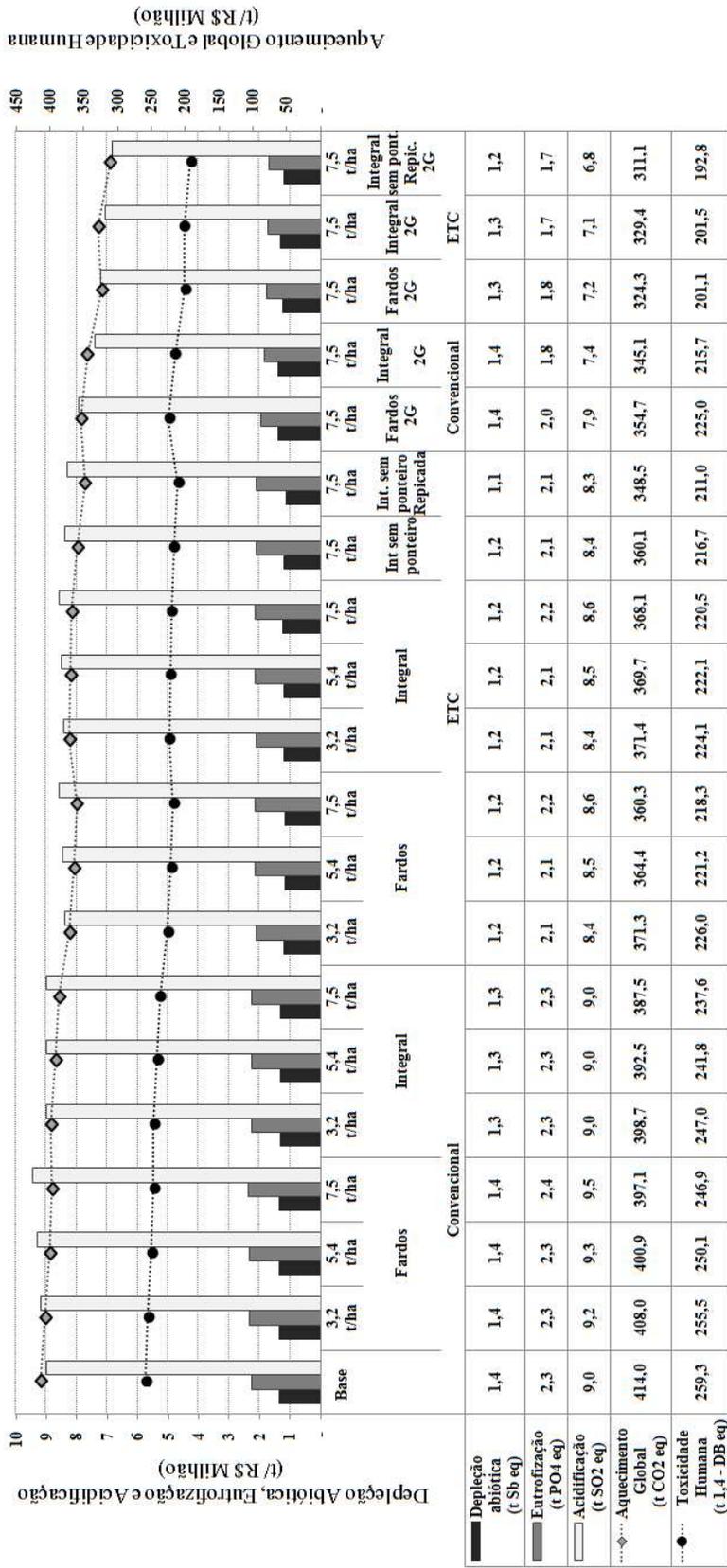


Figura 39: Impactos ambientais do modelo verticalizado

Comparando os resultados das Figuras 38 e 39, verifica-se que, quando se analisam os impactos por safra (Figura 37) observa-se um aumento dos impactos por categoria analisada à medida que a quantidade de palha recolhida é maior. Entretanto, quando se analisa os impactos por milhão de reais produzidos, verifica-se que os cenários com maior recolhimento de palha possuem maior receita, diluindo os resultados com maior produção.

Em resumo:

- Quando se compara os sistemas de recolhimento, a colheita integral apresenta impactos menores em relação ao recolhimento com fardos; entretanto para os cenários com ETC a diferença é menor entre fardos e colheita integral.

- Os cenários com a tecnologia ETC apresentam impactos menores nas categorias analisadas, com menor uso de máquinas e melhor aproveitamento de colmos.

- No modelo verticalizado de produção os resultados seguem praticamente o mesmo comportamento que a fase agrícola - que tem maior participação nos impactos ambientais.

Assim, considerando o modelo verticalizado e tecnologias 1G e 1G2G, o sistema de recolhimento de palha com menor impacto ambiental é a colheita integral. O cenário com a proposta de recolhimento de palha com colheita integral sem ponteiro repicada, com a ETC, apresentou os menores valores de impactos ambientais nas categorias analisadas.

4.3. Análise dos impactos socioeconômicos

A análise socioeconômica foi dividida em duas etapas. A primeira etapa analisa indicadores econômicos e a segunda analisa cenários socioeconômicos em função da eletricidade gerada através do setor sucroenergético.

4.3.1. Indicadores socioeconômicos

Para a análise de indicadores foram escolhidos 10 (dez) cenários, com base nos resultados da TIR do modelo verticalizado. Além do cenário Base, foram escolhidos os cenários com menor resultado da TIR do modelo verticalizado (fardos 3,2 t/ha com colhedora convencional e Integral 3,2 t/ha com ETC) e cenários com maior valor de TIR do modelo verticalizado (fardo 7,5 t/ha com colhedora convencional e Integral repicada com ETC). Dentre

os cenários com os melhores resultados da TIR do modelo verticalizado, também foram escolhidos cenários que permitissem comparação entre a colhedora Convencional e a ETC (Tabela 43).

Tabela 43: Cenários de análise socioeconômica

Colhedora convencional	ETC
Base	Integral 3,2 t/ha
Fardos 3,2 t/ha	Fardos 7,5 t/ha
Fardos 7,5 t/ha	Integral 7,5 t/ha
Integral 7,5 t/ha	Integral Repicada 7,5 t/ha
Integral 7,5 t/ha 2G	Integral 7,5 t/ha 2G

Foi realizado um choque na produção do setor Cana²³ correspondente de cada cenário analisado, de acordo com o valor da produção (Tabela 38), corrigidos para o ano de 2008 através do IPCA (Figura 40). Os choques realizados dizem respeito à produção e processamento de 2 milhões de toneladas de colmo, que em valores monetários correspondem ao valor da produção de colmos e de palha, de acordo com as tecnologias descritas em cada cenário analisado.

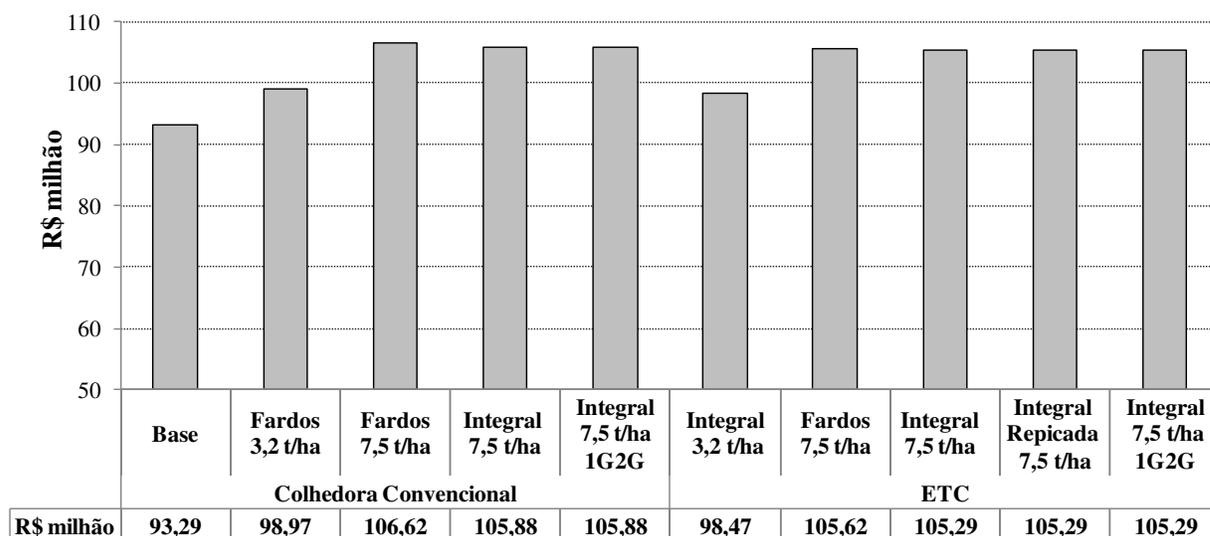


Figura 40: Valores do choque na produção de cana (colmo + palha) para cada cenário analisado

²³ Corresponde à fase agrícola do setor sucroenergético

De acordo com os cenários, foram quantificados os impactos relacionados com: valor da produção, Produto Interno Bruto (PIB), número de empregos gerados, remuneração do fator trabalho, remuneração média mensal por emprego e excedente econômico dos produtos do setor sucroenergético (açúcar, etanol anidro, etanol hidratado e eletricidade excedente). O choque foi realizado utilizando os valores que podem ser observados na Figura 39, mantendo a demanda final por todos os produtos iguais a zero, com exceção dos produtos: açúcar, anidro, hidratado e eletricidade. Os indicadores obtidos representam valores para o ano de 2008; após foi realizada a correção através do IPCA, para o ano de 2013 exceto para número de empregos.

Para apresentação dos resultados, adotou-se a seguinte agregação regional: efeitos em São Paulo (SP) e no restante do Brasil (RBR) - que englobam as regiões: restante da região Sudeste (RSE), Região Sul (S), Região Centro-Oeste (CO) e Região Norte/Nordeste (N-NE). Os resultados dos impactos totais (efeitos diretos + indiretos) podem ser observados na Tabela 44.

Tabela 44: Impactos totais sobre produção, PIB e remuneração do fator trabalho, em São Paulo e restante do Brasil (RBR)

		Efeitos Diretos + Indiretos (R\$ Milhão)						Variação em relação ao cenário Base					
		Produção		PIB		Remuneração		Produção		PIB		Remuneração	
		SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR
Convencional	Base	396,2	21,5	164,0	9,5	25,8	5,4						
	Fardos 3,2 t/ha	437,1	25,8	191,2	11,3	29,2	6,5	10,3%	19,7%	16,6%	19,1%	13,0%	20,2%
	Fardos 7,5 t/ha	492,6	31,7	201,7	13,8	33,3	8,1	24,3%	47,2%	23,0%	45,8%	28,8%	48,5%
	Integral 7,5 t/ha	484,8	31,3	197,2	13,7	30,8	7,9	22,3%	45,1%	20,2%	44,0%	19,3%	46,5%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	552,6	32,3	259,0	14,1	31,6	8,2	39,5%	50,1%	57,9%	48,6%	22,3%	51,9%
ETC	Integral 3,2 t/ha	443,5	25,3	191,1	11,1	25,4	6,4	11,9%	17,5%	16,5%	17,2%	-1,6%	18,5%
	Fardos 7,5 t/ha	498,2	31,1	212,4	13,6	29,6	7,9	25,7%	44,6%	29,5%	43,4%	14,8%	46,3%
	Integral 7,5 t/ha	491,9	31,3	205,9	13,7	29,7	8,0	24,2%	45,3%	25,5%	44,3%	14,9%	46,9%
	Integral sem ponteiro	494,1	31,3	208,7	13,7	29,2	8,0	24,7%	45,1%	27,2%	44,2%	12,8%	46,8%
	Repicada 7,5 t/ha												
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	560,7	32,4	268,5	14,1	30,5	8,3	41,5%	50,4%	63,7%	49,0%	18,0%	52,4%

Verifica-se que os efeitos são muito mais expressivos em São Paulo, onde foi realizado o choque, em comparação ao restante do Brasil (RBR). Contudo, é importante destacar o efeito de transbordamento para o restante do Brasil, possível de ser analisado devido ao uso da análise de Insumo-Produto. Com relação ao PIB, o impacto sobre RBR está entre 5% a 7% do PIB gerado em SP; em relação à produção, o valor do RBR representa entre 5% e 6% da produção em SP e, em relação à remuneração, RBR representa de 21% a 27 % da remuneração verificada em SP.

Quando se compara os sistemas de recolhimento, os valores de produção dos cenários com fardos são maiores que os valores com colheita Integral, para as mesmas quantidades de palha recolhida por hectare (7,5 t/ha). O maior valor de produção para fardos pode ser explicado principalmente pelo valor do choque, que é um pouco superior que o choque aplicado nos cenários com colheita integral, de acordo com o valor de produção e quantidade de material processado²⁴ (Tabela 13 do item 3.2.1.), já que os setores que mais influenciam nos impactos totais de produção são Sucro e Cana (Tabela 45).

Comparando a colhedora Convencional com a ETC, verifica-se que os valores da produção com ETC são maiores, em São Paulo (SP). Isso se deve ao fato do setor Sucro apresentar o valor da produção ligeiramente maior, para os cenários com ETC, pois a quantidade de cana utilizada como insumo indireto (mudas) é menor, o que resulta em maior quantidade de cana disponível para processamento, elevando o impacto total na Produção dos cenários com ETC.

Da mesma forma, os valores do PIB tem comportamento semelhante aos do valor da produção, os cenários com ETC apresentam valores maiores quando comparados com a colhedora convencional. Comparando os sistemas de recolhimento, fardos apresentam valores ligeiramente maiores aos valores da colheita integral, para os cenários correspondentes. Em relação ao cenário de colheita integral com a palha repicada (ETC), os valores da produção e PIB, só não são maiores que os valores de fardos ETC, para tecnologia 1G.

Os setores de produção (Cana) e processamento (Sucro) de cana apresentam participação expressiva nos resultados no valor da produção e PIB, considerando Brasil, como mostra a Tabela 45.

²⁴ Quantidade de palha foi fixada por hectare, cenários com colheita integral apresentam menor área em função de menor perda na colheita.

Tabela 45: Participação dos setores Sucro e Cana no impacto total no valor da produção e do PIB

	Produção			PIB		
	Sucro	Cana	Sucro + Cana	Sucro	Cana	Sucro+Cana
Base	52,9%	29,5%	82,3%	42,1%	39,7%	81,9%
Convencional						
Fardos 3,2 t/ha	53,1%	28,2%	81,3%	44,7%	41,7%	86,4%
Fardos 7,5 t/ha	53,2%	26,8%	80,0%	48,5%	42,5%	91,0%
Integral 7,5 t/ha	52,8%	27,1%	79,8%	46,5%	43,7%	90,2%
Integral 7,5 t/ha 1G2G	57,5%	23,9%	81,4%	54,8%	33,8%	88,6%
ETC						
Integral 3,2 t/ha	54,0%	27,7%	81,7%	45,7%	45,0%	90,7%
Fardos 7,5 t/ha	54,0%	26,3%	80,3%	41,0%	38,8%	79,8%
Integral 7,5 t/ha	53,5%	26,5%	80,0%	39,7%	39,4%	79,1%
Integral sem ponteiro Repicada 7,5 t/ha	53,7%	26,4%	80,1%	39,9%	39,5%	79,4%
Integral 7,5 t/ha 1G2G	58,2%	23,4%	81,6%	52,3%	30,8%	83,1%

A remuneração do fator trabalho é maior para os cenários com colhedora Convencional, que demandam maior número de trabalhadores (Tabela 37), dado que o setor Cana tem maior participação nos impactos da remuneração (Tabela 46). O cenário de colheita Integral (3,2 t/ha) da ETC possui valor da remuneração menor que o cenário Base da colhedora Convencional, já que necessita de menos pessoas na fase agrícola - que tem maior participação na remuneração total.

Analisando-se a participação dos setores no impacto total da remuneração é possível verificar que o setor Comércio apresenta participação significativa na remuneração total, devido ao efeito indireto da margem de comércio de todos os insumos utilizados na cadeia produtiva (Tabela 46).

Tabela 46: Participação dos setores no impacto total da remuneração

		Cana	Sucro	Comércio	Transporte, armazenagem e correio	Intermediação financeira e seguros	Outros setores
Convencional	Base	26,6%	16,8%	8,4%	5,5%	5,1%	37,7%
	Fardos 3,2 t/ha	25,2%	15,7%	8,5%	5,8%	5,6%	39,3%
	Fardos 7,5 t/ha	22,4%	14,7%	8,7%	6,3%	6,2%	41,7%
	Integral 7,5 t/ha	17,8%	15,6%	9,2%	6,7%	6,6%	44,1%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	17,3%	15,2%	9,7%	6,6%	6,5%	44,7%
ETC	Integral 3,2 t/ha	18,3%	15,4%	9,5%	6,6%	6,4%	43,7%
	Fardos 7,5 t/ha	16,6%	14,6%	9,6%	6,9%	6,8%	45,4%
	Integral 7,5 t/ha	16,5%	14,6%	9,5%	6,9%	6,8%	45,6%
	Integral sem ponteiro Repicada 7,5 t/ha	16,8%	13,3%	9,7%	7,0%	6,9%	46,2%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	16,1%	14,2%	10,1%	6,8%	6,8%	46,1%

Para os cenários analisados, cana é insumo direto para o setor Sucro. Ocorre que o setor Cana, por sua vez, também utiliza cana como insumo no plantio (mudas – insumo indireto para o setor Sucro).

Quando se analisa os efeitos indiretos (Tabela 47), verifica-se que os cenários com a colhedora convencional apresentam valores da Produção e PIB superiores aos apresentados pelos cenários da ETC, ao contrário do que foi observado nos Impactos Totais. Isto acontece porque os efeitos indiretos são maiores com a colhedora convencional devido ao maior consumo de insumos indiretos (mudas, óleo diesel, agroquímicos, fertilizantes e maquinário), em comparação com a ETC. Em relação aos valores da remuneração média do fator trabalho, verifica-se comportamento semelhante ao dos Impactos Totais: os cenários com colhedora Convencional apresentam valores maiores, pois são mais intensivos em mão de obra.

Tabela 47: Efeitos indiretos sobre produção, PIB e remuneração média do fator trabalho, em São Paulo e restante do Brasil (RBR)

	Efeitos Indiretos (R\$ milhão)						Variação em relação ao cenário Base						
	Produção		PIB		Remuneração		Produção		PIB		Remuneração		
	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	
Base	51,1	17,9	21,1	8,3	8,8	4,6							
Convencional													
Fardos 3,2 t/ha	54,1	21,0	23,2	9,7	9,7	5,4	6,0%	17,1%	10,1%	17,1%	10,9%	18,0%	
Fardos 7,5 t/ha	60,4	25,2	25,2	11,6	11,1	6,6	18,2%	40,7%	19,3%	41,0%	26,9%	43,2%	
Integral 7,5 t/ha	59,4	24,8	24,8	11,5	10,9	6,4	16,3%	38,3%	17,5%	39,0%	24,0%	40,8%	
Integral 7,5 t/ha 1G2G	67,5	25,9	28,9	11,9	11,4	6,7	32,1%	44,6%	36,8%	44,4%	30,4%	47,3%	
ETC													
Integral 3,2 t/ha	47,5	20,3	19,4	9,4	9,0	5,3	-7,0%	13,1%	-8,2%	14,1%	3,0%	14,9%	
Fardos 7,5 t/ha	54,5	24,7	22,3	11,4	10,6	6,4	6,8%	37,5%	5,7%	38,2%	21,0%	40,3%	
Integral 7,5 t/ha	54,7	24,8	22,3	11,5	10,6	6,4	7,1%	38,0%	5,6%	38,9%	20,9%	40,8%	
Integral sem ponteiro Repicada 7,5 t/ha	54,7	24,7	22,3	11,5	10,6	6,4	7,1%	37,8%	5,8%	38,8%	20,7%	40,8%	
Integral 7,5 t/ha 1G2G	62,9	25,9	26,5	11,9	11,1	6,7	23,2%	44,4%	25,6%	44,4%	27,3%	47,3%	

Para os cenários com colhedora Convencional, verifica-se que o setor Cana tem maior participação nos efeitos indiretos para os cenários com colhedora Convencional (efeito da utilização maior de mudas) no valor da produção; para os cenários com ETC, o setor Cana tem participação menor devido à menor utilização de mudas de cana (insumo indireto para o setor Sucro). A Tabela 48 apresenta os setores com maior participação nos efeitos indiretos no valor da produção, onde o setor de Petróleo e gás natural pertence à região Restante do Sudeste (RSE), os demais setores são de São Paulo.

Tabela 48: Participação dos setores no efeito indireto no valor da produção

Convencional	Base	Cana 14,50%	Refino de petróleo ¹ 10,20%	Produtos químicos 9,00%	Petróleo ² (RSE) 6,20%	Comércio 6,10%	Outros setores 54,00%
	Fardos 3,2 t/ha	Cana 12,80%	Refino de petróleo ¹ 10,20%	Produtos químicos 8,80%	Petróleo ² (RSE) 6,50%	Comércio 6,10%	Outros setores 55,60%
	Fardos 7,5 t/ha	Cana 11,30%	Refino de petróleo ¹ 9,90%	Produtos químicos 8,40%	Petróleo ² (RSE) 6,60%	Comércio 6,00%	Outros setores 57,80%
	Integral 7,5 t/ha	Cana 10,70%	Refino de petróleo ¹ 10,00%	Produtos químicos 8,50%	Petróleo ² (RSE) 6,70%	Comércio 6,10%	Outros setores 58,00%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Cana 11,50%	Refino de petróleo ¹ 9,10%	Sucro 1G2G 7,90%	Produtos químicos 7,80%	Petróleo (RSE) 6,10%	Outros setores 57,60%
ETC	Integral 3,2 t/ha	Refino de petróleo ¹ 10,80%	Produtos químicos 9,80%	Petróleo ² (RSE) 7,00%	Comércio 6,60%	Cana 6,10%	Outros setores 59,70%
	Fardos 7,5 t/ha	Refino de petróleo ¹ 10,40%	Produtos químicos 9,20%	Petróleo ² (RSE) 7,00%	Comércio 6,60%	Cana 5,50%	Outros setores 61,30%
	Integral 7,5 t/ha	Refino de petróleo ¹ 10,50%	Produtos químicos 8,90%	Petróleo ² (RSE) 7,10%	Comércio 6,50%	Cana 5,50%	Outros setores 61,50%
	Integral Repicada 7,5 t/ha	Refino de petróleo ¹ 10,50%	Produtos químicos 8,90%	Petróleo ² (RSE) 7,10%	Comércio 6,50%	Cana 5,50%	Outros setores 61,50%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Refino de petróleo ¹ 9,50%	Sucro 1G2G 8,40%	Produtos químicos 8,20%	Cana 6,90%	Petróleo ² (RSE) 6,40%	Outros setores 60,60%

¹Refino de petróleo e coque; ²Petróleo e gás natural

Em relação aos efeitos indiretos sobre o PIB, o setor Cana apresenta participação importante para os cenários com a colhedora convencional, devido à utilização de mudas; a margem de comércio embutida nos insumos utilizados pela cadeia produtiva e a extração de petróleo também apresentam participação importante nos efeitos indiretos sobre o PIB (Tabela 49).

Tabela 49: Participação dos setores no efeito indireto no PIB

Convencional	Base	Cana	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
		19,1%	10,1%	7,8%	5,3%	5,0%	52,0%
	Fardos 3,2 t/ha	Cana	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
		18,8%	9,9%	7,9%	5,7%	5,2%	52,5%
	Fardos 7,5 t/ha	Cana	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
	14,9%	9,9%	8,2%	6,3%	5,6%	55,1%	
	Integral 7,5 t/ha	Cana	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
		14,60%	10,00%	8,30%	6,4%	5,7%	55,0%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Cana	Comércio	Sucro 1G2G	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Outros setores
		15,3%	9,2%	7,7%	7,4%	5,9%	54,5%
ETC	Integral 3,2 t/ha	Comércio	Cana	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
		11,0%	9,3%	8,8%	6,5%	6,0%	58,4%
	Fardos 7,5 t/ha	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Cana	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
		10,9%	8,8%	8,2%	6,9%	6,2%	59,0%
	Integral 7,5 t/ha	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Cana	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
	10,8%	8,9%	8,2%	6,9%	6,2%	59,0%	
	Integral Repicada 7,5 t/ha	Comércio	Petróleo ¹ (RSE)	Cana	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Outros setores
		10,7%	8,9%	8,2%	6,9%	6,2%	59,1%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Cana	Comércio	Sucro 1G2G	Petróleo ¹ (RSE)	Serviços prestados à empresa ²	Outros setores
		10,0%	9,8%	8,3%	7,9%	6,4%	57,6%

¹Petróleo e gás natural; ²Serviços prestados à empresa, de informação e alojamento; ³Intermediação financeira e seguros

Em relação aos valores da Remuneração do fator trabalho (Tabela 47), os cenários com colhedora Convencional apresentam valores maiores que os verificados nos cenários com ETC, já que são mais intensivos em mão de obra. A Tabela 50 apresenta os setores com maior

participação nos efeitos indiretos da remuneração onde novamente é possível verificar grande influência da margem de comércio embutida nos insumos usados na cadeia produtiva (setor de Petróleo e gás natural – RSE, demais setores – SP).

Tabela 50: Participação dos setores no efeito indireto da Remuneração

Convencional	Base	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo ¹ (RSE)	Transporte, armazenagem ⁴	Intermediação financeira ³	Outros Setores
		15,1%	7,4%	6,0%	5,5%	5,4%	60,6%
	Fardos 3,2 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo ¹ (RSE)	Intermediação financeira ³	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		14,6%	7,8%	6,0%	5,6%	5,5%	60,5%
	Fardos 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo ¹ (RSE)	Intermediação financeira ³	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
	14,0%	8,3%	5,9%	5,9%	5,6%	60,3%	
	Integral 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo ¹ (RSE)	Intermediação financeira ³	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		14,2%	8,5%	6,0%	5,9%	5,6%	59,8%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Petróleo ¹ (RSE)	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		14,0%	8,5%	6,0%	5,8%	5,7%	60,0%
ETC	Integral 3,2 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo ¹ (RSE)	Intermediação financeira ³	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		15,0%	8,4%	6,1%	6,0%	5,8%	58,7%
	Fardos 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Petróleo ¹ (RSE)	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		14,6%	8,6%	6,1%	6,0%	5,8%	58,9%
	Integral 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo	Intermediação financeira ³	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
	14,4%	8,7%	6,1%	6,1%	5,8%	58,9%	
	Integral Repicada 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Petróleo ¹ (RSE)	Intermediação financeira ³	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		14,4%	8,7%	6,1%	6,1%	5,8%	58,9%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Comércio	Serviços prestados à empresa ²	Intermediação financeira ³	Petróleo ¹ (RSE)	Transporte, armazenagem ⁴	Outros Setores
		14,2%	8,7%	6,1%	5,9%	5,8%	59,3%

¹Petróleo e gás natural; ²Serviços prestados à empresa, de informação e alojamento; ³Intermediação financeira e seguros; ⁴ Transporte, armazenagem e correios

Ao analisar o número de empregos gerados, é possível verificar aumento quando a quantidade de palha recolhida também aumenta, o que já era esperado em função do maior número de operações e máquinas necessárias para o recolhimento. Os cenários com colhedora Convencional geram número maior de empregos em São Paulo. Isso se deve ao fato que os cenários com ETC são mais eficientes na fase agrícola, demandando menor número de trabalhadores, assim como o sistema de recolhimento através da colheita integral (Tabela 51).

Tabela 51: Impactos Totais e Efeitos Indiretos sobre número de empregos

		Número de Empregos				Variação em relação ao cenário Base			
		Total		Indireto		Total		Indireto	
		SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR
Convencional	Base	1.161	228	414	192				
	Fardos 3,2 t/ha	1.297	278	457	230	11,6%	22,1%	10,4%	20,3%
	Fardos 7,5 t/ha	1.461	349	520	285	25,8%	53,3%	25,6%	48,8%
	Integral 7,5 t/ha	1.448	345	515	281	24,7%	51,4%	24,3%	46,6%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	1.491	362	541	298	28,4%	59,0%	30,6%	55,4%
ETC	Integral 3,2 t/ha	1.238	276	430	226	6,6%	21,3%	3,7%	18,1%
	Fardos 7,5 t/ha	1.403	345	499	281	20,8%	51,5%	20,5%	46,5%
	Integral 7,5 t/ha	1.411	346	498	281	21,5%	52,1%	20,1%	46,9%
	Integral sem ponteiro Repicada 7,5 t/ha	1.369	346	496	281	17,9%	52,1%	19,8%	46,9%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	1.454	364	524	298	25,2%	59,8%	26,4%	55,8%

Importante ressaltar o efeito transbordamento sobre o número de empregos gerados no impacto total e nos efeitos indiretos. A Tabela 52 mostra que a participação nos impactos totais dos empregos gerados no restante do Brasil representa mais de 20 % dos empregos gerados em São Paulo, para os cenários com recolhimento de palha. Para os efeitos indiretos, os empregos no restante do Brasil representam mais de 50 % dos empregos indiretos gerados.

Tabela 52: Efeito Transbordamento no número de empregos gerados

		Participação do RBR	
		Impacto Total	Efeito Indireto
Convencional	Cenário Base	19,6%	46,4%
	Fardos 3,2 t/ha	21,4%	50,3%
	Fardos 7,5 t/ha	23,9%	54,8%
	Integral 7,5 t/ha	23,8%	54,6%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	24,3%	55,1%
ETC	Integral 3,2 t/ha	22,3%	52,6%
	Fardos 7,5 t/ha	24,6%	56,3%
	Integral 7,5 t/ha	24,5%	56,4%
	Integral sem Ponteiro Repicada 7,5 t/ha	25,3%	56,7%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	25,0%	56,9%

Os setores com maior participação nos impactos totais sobre emprego são Cana (maior número de empregos diretos com maior demanda de mão de obra na fase agrícola), Comércio (margem de comércio dos insumos utilizados) e Sucro (participação nos efeitos diretos de emprego).

Para os efeitos indiretos (Tabela 53), Comércio é o setor com maior participação para todos os cenários analisados devido à margem de comércio inserida em todos os insumos da cadeia produtiva; o setor Cana aparece entre os cinco setores com maior participação nos cenários com colhedora convencional devido às mudas utilizadas (insumo indireto).

Tabela 53: Participação dos setores nos efeitos indiretos de emprego

Concepcional	Base	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Cana	Transporte, armazenagem ²	Outros setores
		21,1%	8,2%	8,1%	6,1%	4,7%	51,8%
	Fardos 3,2 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Cana	Transporte, armazenagem ²	Outros setores
		20,4%	8,7%	7,8%	5,1%	4,7%	53,3%
	Fardos 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Cana	Outros setores
	19,6%	9,2%	7,3%	4,7%	4,2%	55,0%	
	Integral 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Cana	Outros setores
		19,7%	9,3%	7,4%	4,7%	3,9%	55,0%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Cana	Outros setores
		19,3%	9,2%	7,0%	4,8%	4,4%	55,3%
ETC	Integral 3,2 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Outros da agricultura ³	Outros setores
		20,8%	9,2%	8,9%	4,8%	3,7%	52,6%
	Fardos 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Outros da agricultura ³	Outros setores
		20,4%	9,5%	7,7%	4,8%	4,0%	53,6%
	Integral 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Outros da agricultura ³	Outros setores
		20,1%	9,6%	7,5%	4,8%	4,0%	54,0%
	Integral Repicada 7,5 t/ha	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Outros da agricultura ³	Outros setores
		20,1%	9,6%	7,5%	4,8%	4,0%	54,0%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	Comércio	Serviços prestados à empresa ¹	Serviços de manutenção e reparação	Transporte, armazenagem ²	Outros da agricultura ³	Outros setores
		19,7%	9,5%	7,2%	4,9%	4,3%	54,4%

¹Serviços prestados à empresa, de informação e alojamento; ²Transporte, armazenagem e correios;

³Outros da agricultura, silvicultura, exploração florestal

A variação da remuneração média mensal, por emprego, pode ser explicada pelo fato de que o cenário Base adotado é mecanizado na fase agrícola, plantio e colheita, e na fase industrial mantém-se o mesmo número de empregos para o processamento de 2 milhões de toneladas de colmo, independente da quantidade de palha processada. Assim, o aumento de empregos diretos se deve à fase agrícola, onde a remuneração média é mais baixa que na fase industrial, o que acaba reduzindo a média da remuneração por emprego nos cenários com recolhimento de palha (Tabela 54).

Tabela 54: Efeito Total e Indireto sobre a remuneração média mensal do fator trabalho, por emprego

	Remuneração média mensal (R\$)				Variação em relação ao cenário Base				Variação em relação à média Brasil 2013			
	Indireto		Total		Indireto		Total		Indireto		Total	
	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR	SP	RBR
Base	1.761	1.992	1.853	1.985					0,5%	13,7%	5,8%	13,3%
Convencional Fardos 3,2 t/ha	1.769	1.955	1.877	1.954	0,5%	-1,9%	1,3%	-1,6%	1,0%	11,6%	7,2%	11,6%
Fardos 7,5 t/ha	1.778	1.917	1.897	1.923	1,0%	-3,8%	2,4%	-3,1%	1,5%	9,5%	8,3%	9,8%
Integral 7,5 t/ha	1.756	1.914	1.773	1.920	-0,2%	-3,9%	-4,3%	-3,2%	0,3%	9,3%	1,2%	9,7%
Integral 7,5 t/ha 1G2G	1.758	1.888	1.767	1.896	-0,1%	-5,2%	-4,7%	-4,4%	0,4%	7,8%	0,9%	8,3%
ETC Integral 3,2 t/ha	1.748	1.938	1.712	1.940	-0,7%	-2,7%	-7,6%	-2,3%	-0,2%	10,7%	-2,3%	10,8%
Fardos 7,5 t/ha	1.767	1.908	1.761	1.916	0,4%	-4,2%	-5,0%	-3,5%	0,9%	9,0%	0,6%	9,4%
Integral 7,5 t/ha	1.773	1.909	1.754	1.917	0,7%	-4,1%	-5,4%	-3,4%	1,2%	9,0%	0,1%	9,5%
Integral sem ponteiro Repicada 7,5 t/ha	1.775	1.909	1.774	1.916	0,8%	-4,2%	-4,3%	-3,4%	1,3%	9,0%	1,3%	9,4%
Integral 7,5 t/ha 1G2G	1.773	1.883	1.748	1.893	0,7%	-5,5%	-5,7%	-4,6%	1,3%	7,5%	-0,2%	8,1%

Outro fator a ser considerado é que, com a ETC, a redução da mão de obra nas operações mecanizadas é mais significativa do que na mão de obra manual, reduzindo a remuneração média, mesmo com aumento da mão de obra para o transporte (Tabela 37).

A produção de eletricidade do setor sucroenergético, nos cenários analisados, é suficiente para suprir o consumo intermediário de eletricidade de todos os setores em sua cadeia produtiva e apresenta, ainda, significativo excedente; o mesmo ocorre, como era de se esperar, para os produtos açúcar, etanol anidro e etanol hidratado. Estes excedentes são denominados como “excedentes econômicos”, ou seja, são as quantidades dos produtos disponíveis para serem consumidos na demanda final, uma vez que já foram subtraídas as parcelas necessárias para os respectivos consumos intermediários.

De todo açúcar produzido, menos de 0,5% é consumido na cadeia produtiva (basicamente setor de alimentos e bebidas). Para etanol anidro e hidratado, o excedente é maior nos cenários com a tecnologia 1G2G, já que a produção é maior por tonelada de cana processada. Para a eletricidade, o cenário Base, que tem produção menor de eletricidade excedente, tem 1,33% de sua produção consumida pela cadeia produtiva, os cenários com tecnologia 1G2G, que consomem mais vapor no processo produzem menor excedente de eletricidade, tem 2,19% e 2,16% do excedente de eletricidade consumido na cadeia produtiva, respectivamente para cenários com colhedora convencional e ETC (Tabela 55) .

Tabela 55: Excedente econômico dos produtos do setor sucroenergético

		Excedente econômico			
		Açúcar	Anidro	Hidratado	Eletricidade
Convencional	Base	99,98%	99,17%	99,62%	98,67%
	Fardos 3,2 t/ha	99,97%	99,13%	99,61%	99,09%
	Fardos 7,5 t/ha	99,97%	99,08%	99,60%	99,29%
	Integral 7,5 t/ha	99,97%	99,07%	99,59%	99,26%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	99,96%	99,43%	99,73%	97,81%
ETC	Integral 3,2 t/ha	99,97%	99,19%	99,63%	99,08%
	Fardos 7,5 t/ha	99,97%	99,13%	99,61%	99,30%
	Integral 7,5 t/ha	99,97%	99,11%	99,61%	99,29%
	Integral sem ponteiro Repicada 7,5 t/ha	99,97%	99,11%	99,61%	99,29%
	Integral 7,5 t/ha 1G2G	99,96%	99,44%	99,73%	97,84%

4.3.2. Cenários Socioeconômicos

Para a segunda etapa, foram analisados cenários socioeconômicos em função da eletricidade gerada através do setor sucroenergético, comparando o cenário Base aos cenários com recolhimento de palha. Foram escolhidos, além do cenário Base, os cenários Integral 3,2 t/ha (Convencional e ETC) que apresentam o menor produção de eletricidade excedente, e fardos 7,5 t/ha (Convencional e ETC), que apresentam maior produção de eletricidade excedente.

Tomou-se como base a moagem de cana no estado de São Paulo na safra 2008/2009, de acordo com dados da UNICA (2014), de 346,3 milhões de toneladas de cana. Sendo assim, foram avaliados os impactos do processamento como se toda a produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo fosse moída com as tecnologias dos cenários analisados.

A Tabela 56 evidencia a importância socioeconômica do setor sucroenergético paulista. Assumindo-se que todo o setor, no estado de São Paulo, utilizasse a tecnologia dos cenários analisados, a produção de eletricidade excedente do setor seria capaz de suprir de 32,5 % a 84,8% da demanda final de São Paulo, de acordo com o cenário adotado.

Tabela 56: Impactos socioeconômicos de cenários de produção de cana de São Paulo

		Choque na produção de cana em SP (R\$ bilhão)	Parcela atendida da Demanda Final de SP*	Número de Empregos (Impacto Total)			Participação no total de empregos gerados	
				SP	RBR	Total (Brasil)	SP	RBR
Convencional	Base	16,15	32,5%	201.098	39.429	240.527	83,6%	16,4%
	Integral 3,2 t/ha	17,14	52,2%	222.663	48.483	271.146	82,1%	17,9%
	Fardos 7,5 t/ha	18,46	84,6%	252.970	60.443	313.413	80,7%	19,3%
ETC	Integral 3,2 t/ha	17,11	53,6%	214.272	47.808	262.080	81,8%	18,2%
	Fardos 7,5 t/ha	18,29	84,8%	242.916	59.742	302.658	80,3%	19,7%
	Integral sem ponteiro Repicada	18,23	84,5%	237.052	59.960	297.012	79,8%	20,2%

* Esta participação diz respeito à parcela da demanda final de SP cuja demanda intermediária de eletricidade é totalmente suprida pelo respectivo setor sucroenergético

Isso mostra que o setor, no período da safra, tem potencial para reduzir significativamente a dependência de outras fontes de geração de eletricidade, como a hídrica, já que a safra do setor na região Centro-Sul coincide com o período, usualmente, de estiagem.

Com relação aos empregos gerados, verifica-se que o setor seria responsável por mais de 200 mil empregos em São Paulo, chegando a superar 250 mil para cenário com recolhimento de palha através de enfardamento. Os cenários que utilizam a colhedora convencional apresentam acréscimo de 4 %, em média, no número de empregos em São Paulo, em virtude da fase agrícola que demanda maior número de trabalhadores. Quando analisamos o total de empregos no país, observamos que os cenários com a ETC apresentam discreta redução - o número de empregos é 3,5% maior para os cenários com colhedora convencional.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados os impactos socioeconômicos e ambientais do recolhimento e aproveitamento da palha de cana-de-açúcar no setor sucroenergético, considerando (i) a tecnologia de colheita existente (colhedora Convencional) e em desenvolvimento (Estrutura de Tráfego Controlado – ETC), (ii) a parcela de palha recolhida, (iii) a forma de recolhimento e transporte e (iv) seu uso. A seguir, são destacados os principais resultados obtidos, bem como as sugestões para a continuidade desta pesquisa.

5.1. Análise da viabilidade econômica

O recolhimento da palha através da colheita integral tem custos menores e a perda de densidade de carga é compensada pelo melhor aproveitamento dos colmos com a redução de perdas na colheita. O sistema de recolhimento com fardos tem custo elevado para pequenas quantidades de palha recolhida em função da menor capacidade operacional das máquinas necessárias para o enfardamento. Na medida em que se aumenta a quantidade recolhida, o enfardamento apresenta redução no custo por tonelada de palha recolhida.

A ETC mostrou custos menores em relação aos custos da colhedora convencional. A redução de custos é proveniente das mudanças em todo o processo produtivo, contudo a maior eficiência na colheita tem participação importante.

A proposta de repicar a palha mostrou-se bastante atrativa, pois tem potencial de reduzir os custos com transporte – preservando a densidade de carga –, melhorar a eficiência de separação da palha na usina – reduzindo as perdas no processo industrial.

O sistema de recolhimento de palha através de fardos apresenta melhores rendimentos na indústria (extração de sacarose por tonelada de colmo processado), uma vez que a quantidade de fibra na moenda não é alterada e não afeta a capacidade de extração da sacarose, em comparação ao cenário sem recolhimento de palha.

Na fase agrícola, as taxas internas de retorno (TIR) variam de 16,0% a.a. a 41,1% a.a., dependendo do cenário considerado. Os cenários com recolhimento de palha apresentam valores para TIR maior que o apresentado pelo cenário Base sem recolhimento (17,1% a.a.), exceto para

o cenário fardos 3,2 t/ha da colhedora convencional (16,0% a.a.), uma vez que o custo do recolhimento é superior ao preço da palha estimado neste trabalho. Quando se comparam os sistemas de recolhimento de palha, a colheita integral apresenta valores de TIR superiores aos estimados para os cenários com fardos, tanto para os cenários com colhedora Convencional como para os cenários com ETC. Quando se analisam os sistemas de colheita, os cenários com ETC apresentam maiores valores para TIR na fase agrícola, onde se destaca o cenário com colheita integral sem ponteiro com palha repicada que apresentou TIR igual a 41,1% a.a..

Os resultados de análise de viabilidade econômica evidenciam a importância de reduzir perdas na fase agrícola, aumentar a densidade de carga na colheita integral e aumentar a eficiência de separação da palha na usina. Porém, cabe lembrar que, considerando a “Lei da Balança”, Resolução Nº 211 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), a redução da densidade de carga na colheita integral perde relevância.

Considerando o modelo verticalizado de produção, os cenários com recolhimento de palha também apresentaram valores para TIR acima do valor do cenário Base. Este fato evidencia que o modelo verticalizado de produção (agrícola e industrial) viabiliza o cenário de recolhimento de palha fardos 3,2 t/ha. Para a tecnologia 1G, os cenários com colhedora convencional fardos 7,5 t/ha e colheita integral 7,5 t/ha apresentam valores bem próximos para a TIR, 12,0% a.a. e 11,8% a.a., respectivamente. Importante ressaltar que os custos de manutenção industrial com os desgastes causados pela impureza mineral não foi considerado neste estudo, assim como a provável perda de produtividade nos canaviais causada pelo pisoteio das soqueiras e maior compactação do solo com as operações do enfardamento. Também não foi considerado neste trabalho o possível ganho de produtividade com a ETC pela redução dos danos à soqueira, devido ao corte de base flutuante e pela não compactação do solo. Destaque para a proposta de colheita integral sem ponteiro com a palha repicada, com a ETC, que apresentou valor para a TIR de 14,2% para a tecnologia 1G e 15,4% para tecnologia 1G2G.

5.2. Análise Ambiental

Nesta etapa do trabalho, os resultados foram obtidos com o uso da Análise de Ciclo de Vida (ACV). Ambientalmente, verificou-se que o peso maior dos impactos está na fase agrícola

e, portanto, os cenários com a tecnologia ETC, que possuem menor uso de máquinas e melhor aproveitamento de colmos, apresentam impactos menores nas categorias analisadas. Em relação aos sistemas de recolhimento, a colheita integral apresenta menores impactos quando comparada ao recolhimento com fardos. No modelo verticalizado, para os cenários com ETC, devido à importante influência dos resultados da fase agrícola e à perda de extração na fase industrial, o sistema de recolhimento com fardos apresenta impactos ambientais ligeiramente menores que a colheita integral. A proposta de recolhimento com colheita integral sem ponteiro e palha repicada apresentou os menores impactos ambientais no modelo verticalizado (agrícola + industrial).

5.3. Análise Socioeconômica

Nesta fase da pesquisa, usou-se a Análise de Insumo-Produto para captar os efeitos diretos e indiretos ao longo das cadeias produtivas associadas às rotas tecnológicas investigadas, bem como os efeitos de transbordamento para as regiões onde não foram feitos os choques na produção de cana e seu processamento na biorrefinaria (usina com destilaria anexa).

Os resultados socioeconômicos mostram que os cenários com a colheita integral apresentam maior valor de produção e PIB (menor perda na colheita), enquanto que os cenários com fardos apresentam maior remuneração e empregos gerados (utilização de maior número de máquinas).

Quando se compara colhedora convencional e ETC, é possível verificar que a ETC tem maior valor de produção e PIB (maior eficiência na fase agrícola com menor uso de insumos – mudas e maquinário – e menor perda na colheita), entretanto os cenários com colhedora convencional demandam maior número de trabalhadores e, portanto, apresentam maior número de empregos gerados.

Em relação à remuneração média mensal por emprego, os menores valores foram obtidos nos cenários com colheita integral com a ETC, uma vez que apresentam, proporcionalmente, maior número de trabalhadores na fase agrícola, onde a remuneração média é mais baixa.

Assim, verifica-se que os cenários com colheita integral possuem maior eficiência econômica, pois apresentam aumento nos valores da produção e do PIB com menor demanda de mão de obra, com resultados mais acentuados para os cenários com a ETC.

O efeito de transbordamento é relevante e só foi possível de ser analisado devido ao uso da análise de Insumo-Produto. Com relação ao PIB, o impacto sobre o restante do Brasil corresponde de 5% a 7% do PIB gerado em São Paulo. Em relação ao número de empregos gerados, o transbordamento representa cerca de 20 % dos empregos gerados em São Paulo, para os cenários com recolhimento de palha e, para os efeitos indiretos, os empregos no restante do Brasil representam mais de 50 % dos empregos indiretos gerados em São Paulo.

Cunha (2011) comparou indicadores socioeconômicos da produção de etanol e gasolina, por unidade energética – em 2004. O etanol apresentou remuneração média mensal por trabalhador 51% menor. Contudo, o valor da produção, o PIB e o número de empregos gerados são, respectivamente, 66%, 156% e 396% maiores que os da gasolina. De acordo com Moraes et al. (2010), o setor de produção de cana e etanol – sem considerar a produção de açúcar – em 2007, apresentava número de empregos mais de 6 vezes superior ao do setor de produção de petróleo.

5.4. Considerações sobre os sistemas de recolhimento de palha

Os resultados observados (viabilidade econômica e aspectos ambientais) com a colheita integral são muito próximos ou superiores aos do recolhimento de palha através do enfardamento, ainda que não tenham sido levados em consideração os prováveis ganhos de produtividade da colheita integral devido à redução de compactação do solo e os danos causados às soqueiras. Entretanto, verifica-se que boa parte do setor efetua o recolhimento de palha através do enfardamento, que podem ser explicados pelos seguintes aspectos:

- Alto investimento necessário para a implantação da estação de limpeza a seco, quando se usa a colheita integral, e baixa eficiência de separação da palha;

- Inexistência de um sistema de pagamento para a cana e palha com colheita integral, quando o sistema não é verticalizado, ou seja, quando a palha é recolhida por produtores independentes;
- Falta de dados consolidados relacionados à perda de produtividade em função do pisoteamento da soqueira e compactação do solo com o enfardamento;
- Ausência de uma avaliação que compare o aumento dos custos de transporte (em função da perda de densidade de carga) com os ganhos obtidos devido à redução de perda de colmos na colheita integral.

O sistema de colheita mecanizada tem sido apontado como um dos fatores de queda da produtividade observada nos canaviais nas últimas safras, em função da compactação do solo e dos danos causados às soqueiras. Os resultados obtidos neste estudo apontam que o desenvolvimento de tecnologias como a ETC apresentam uma boa oportunidade econômica, além de representar menores impactos ambientais.

Importante ressaltar que o desenvolvimento da ETC tem sido possível através da iniciativa de pesquisadores do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), com apoio de linhas de financiamento público (BNDES) e apoio do setor privado (empresa Jacto S/A).

5.4. Sugestões para trabalhos futuros e considerações finais

Os resultados deste estudo indicam a viabilidade econômica do recolhimento de palha e a importância de se analisar o modelo verticalizado de produção do setor sucroenergético (fase agrícola e fase industrial integradas). Alguns pontos importantes ainda necessitam estudos mais aprofundados, tais como:

- A quantificação das perdas de produtividade em função da compactação do solo e danos às soqueiras pelo sistema de recolhimento com os fardos é um fator importante para avaliar a viabilidade econômica e ambiental deste sistema de recolhimento de palha;
- Identificação dos desgastes que as impurezas minerais causam nos equipamentos industriais e a quantificação dos custos com a manutenção;

- Estudos direcionados para aumentar a eficiência de separação da palha na estação de limpeza a seco.

O resultado principal deste estudo mostra que os cenários com ETC apresentam maior eficiência econômica e a proposta de recolhimento através de colheita integral com palha sem ponteiro e repicada apresentou maior viabilidade econômica com menores impactos ambientais. Esta pesquisa demonstra a importância de desenvolvimento de tecnologias que permitam melhor aproveitamento da biomassa.

Destaca-se a necessidade de políticas públicas direcionadas para promover o aproveitamento da biomassa de cana-de-açúcar (bagaço e palha) para cogeração de eletricidade em larga escala, aproveitando de forma mais eficiente o potencial existente, capaz de suprir parte significativa da demanda por eletricidade nos períodos de estiagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2006.
- ACKRILL, R.; KAY, A. Sweetness and Power – Public Policies and the ‘Biofuels Frenzy’. **EuroChoices**, vol. 11(3), p. 23-28, 2012.
- AGRICEF. **Avaliação em laboratório da densidade de carga com palha picada em diferentes comprimentos**. Relatório Interno. CTBE, 2011.
- ALBARELLI, J.Q.. **Produção de açúcar e álcool de primeira e segunda geração: simulação e otimização energética**. 2013. 216 p. Tese (Doutorado). Convênio de pesquisa UNICAMP-Shell Brasil. Faculdade de Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas. 2013
- AMBROSANO, E.J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMAS, E.A.; DIAS, F.L.F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P.C.O. ; MURAOKA, T.; SACHS, R.C.C.; AZCÓN, R.. **Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas**. *Bragantia* (São Paulo, SP. Impresso), v. 70, p. 810-818, 2011.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JR., J.; MARIN, F.R.; PELEGRINO, G.; EVANGELISTA, S.R.; OTAVIAN, A.F.. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Brasília: embaixada britânica, v.1, 82 p., 2008.
- BARBOSA JÚNIOR, A.F.; MORAIS, R.M. de; EMERENCIANO, S.V.; PIMENTA, H.C.D.; GOUVINHAS, R.P.. Conceitos e aplicações de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. **Revista Gerenciais**, São Paulo, v.7, n.1, p.39-44, 2008.
- BELL, M.J.; HALPIN, N.V.; ORANGE, D.N.; HAINES, M.. **Effect of compaction and trash blanketing on rainfall infiltration in sugarcane soils**. *Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists*, v. 23: p. 161-167. 2001.
- BENEDINI, M. S.; BROD, F. P. R.; PERTICARRARI, J. G.. **Perdas e impurezas vegetais e minerais na colheita mecanizada**. Boletim técnico. Guariba, 7p. 2009.
- BERNARDO-GIL, M. G.. **Breves noções introdutórias ao Aspen Plus - Simuladores de Processos I**. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa- Portugal . 61 p. 1998.
- BIZUTI, S.F.G. **Enleiramento e enfardamento cilíndrico de palhico de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.
- BNDES setorial, Rio de Janeiro, n.33, p. 421-476, **Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucroenergético: uma pesquisa de campo**. Rio de Janeiro, março de 2011.
- BONOMI, A.; DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CARDOSO, T.F.; CAVALETT, O.; FRANCO, H.C.J., et al.: **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) – 2011**. Report [Internet]. Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE), Technological Assessment Program (PAT), 128p. Campinas, SP. 2012. < <http://goo.gl/905Wcv>>.

BOVI, R.; SERRA, G. E.. Folhas verdes, folhas secas, fibra do colmo e a clarificação do caldo de cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, 2001.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário Estatístico da Agroenergia – 2012**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/agroenergia/publicacoes>. Acesso em 25 de abril de 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional – Resultados Preliminares, 2010**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em 03 de julho de 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional – Relatório Final**, 282 p. 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2012.aspx>. Acesso em 10 de novembro de 2013.

BRAUNACK, M. V.; HURNEY, A. P.. **The position of harvesting traffic does affect yield**. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Tech., v. 22, p. 126-132, 2000.

BRAUNACK, M.J.; GARSIDE, A.L.; AND BELL, M.J. **The effect of rotational breaks from continuous sugarcane on soil physical properties**. Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists, v. 25, p. 726 – 822, 2003.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; GARCIA, M. O.. **Colheita e recuperação de biomassa**. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; OLIVARES, E.G.. (Org.). Biomassa para energia. Campinas: Editora UNICAMP, v. 1, p. 63-92, 2008.

BRENE, P. R. A.; SESSO FILHO, U. A.; DALLA COSTA, A. J.; RANGEL, R. R. Estimativa da matriz de insumo-produto do município de São Bento do Sul no estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, p. 1-16, 2011.

CAMPOS, L.; CARVALHO, S.; CHRISTOFFOLETI, P.; FORTES, C.; SILVA, J.. **Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453) - DOI: 10.4025/actasciagron.v32i2.3703**. Acta Scientiarum. Agronomy, Brasil, 32 abr. 2010. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/3703>. Acesso em: 01 jul. 2010.

CARDOSO, T. de F.; OLIVEIRA, J. T. A.; BRAUNBECK, O.. Capacitação da mão de obra no setor sucroalcooleiro paulista: necessidades e motivações. **Informações Econômicas** (Impresso), v. 40, p. 24-32, 2010.

CARDOSO, T.F.; CAVALETT, O.; CHAGAS, M.F.; MORAIS, E.R.; CARVALHO, J.L.N.; FRANCO, H.C.J.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F.V.; BRAUNBECK, O.A.; CORTEZ, L.A.B.; BONOMI, A. Technical and economic assessment of straw recovery in the sugarcane bioenergy production system. **Scientia Agrícola**, p. 353-360, 2013.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P.. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 34, p. 277-289, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; BRAUNBECK, O. A.; CHAGAS, M. F.. **Implantação do plantio direto de cana-de-açúcar: base para sustentabilidade do canavial**. Projeto ABC Capacitação. CNA. Campinas, 2012. Disponível em:

<http://http://abccapacitacao.files.wordpress.com/2012/11/cana_de_acucar_estudo-de-viabilidade-economica-abc_31out2012.pdf>. Acesso em: 05 out. 2013.

CAVALETT, O.; CUNHA, M.P.; JUNQUEIRA, T.L.; DIAS, M.O.S.; JESUS, C.D.F.; MANTELATTO, P.E.; CARDOSO, T.F.; FRANCO, H.C.J.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.. Environmental and economic assessment of bioethanol, sugar and bioelectricity production from sugarcane. **Chemical Engineering Transactions**. 25:1007-1012, 2011.

CAVALETT, O.; JUNQUEIRA, T. L.; DIAS, M.O.S.; JESUS, C.D.F.; MANTELATTO, P.E.; CUNHA, M.P.; FRANCO, H.C.J.; CARDOSO, T.F.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C.E.V.; BONOMI, A.. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy** (Internet). 14(3):399-410, 2012.

CERRI, C. C.; FEIGL, B.J.; GALDOS, M.V.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.. **Estoques de carbono no solo e fluxo de gases do efeito estufa no agrossistema cana-de-açúcar**. In: L. A. B. Cortez. (Org.). Bioetanol de Cana-de-Açúcar. 1 ed. São Paulo: Blucher, p. 203-215, 2010.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil** - Brasília, DF, 2009. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/publicacoes/bietanol.php>>. Acesso julho 2010.

CHAGAS, M. F.; CVALETT, O.; SILVA, C. R. U.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. **Adaptação de Inventários de Ciclo de Vida da cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar no Brasil**. In: Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços: “Novos desafios para um planeta sustentável”: Proceedings of the 3rd CBGCV; 2012 Sep 3-6; Maringá, PR, Brazil, 2012.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. 104 p., Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

CIAMBRONE, D. F. **Environmental Life Cycle Analysis**. Boca Raton, Florida. CRC Press LLC. ISBN 1-56670-214-3, 1997.

COLTRO, L. (Org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 72 p. 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar: safra 2010/2011, primeiro levantamento, abril/2014**. CONAB/MAPA: Brasília, 17 p. 2014.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil Safra 2008/2009**. Organizadores: Ângelo Bressan Filho e Roberto Alves de Andrade. – 80 p., Brasília. Conab, 2010. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: setembro/2012

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar – 3º levantamento – Janeiro de 2011**, disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>, acesso abril /2011.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar** – 4º levantamento – abril de 2013a, disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>, acesso em abril/2013.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries históricas**. 2013b. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=titulo>, acesso em março/2013.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil Safra 2010/2011**. Responsáveis técnicos: Ângelo Bressan Filho e Roberto Alves de Andrade. – 64 p., Brasília. Conab, 2013c. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: setembro/2013

COSENTINO, J.A.S.; SOUZA, J.L.G.de.. **Forragem produzida a partir da palha da cana-de-açúcar - A humanização da produção de cana**. 2007. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2007_3/humanizacao/index.htm>. Acesso em: julho/2010.

COSTA, C.C.; GUILHOTO, J. J. M.; MORAES, M. A. F. D.. Impactos Sociais do Aumento de Demanda de Etanol Hidratado versus Gasolina C na Economia Brasileira. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 44, p. 45-57, 2013.

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, Osmar Figueiredo Filho - **Os Desafios da Mecanização em Cana-de-Açúcar**, II Simpósio Paulista de Mecanização em Cana-de-açúcar, –SPMEC 2011, UNESP –Jaboticabal, 22 de fevereiro de 2011.

CUNHA, M. P.. **Inserção do setor sucroalcooleiro na matriz energética do Brasil: uma análise de insumo-produto**. 2005. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas. 2005.

CUNHA, M. P.. **Avaliação de impactos e indicadores socioeconômicos e ambientais de rota de produção de biodiesel no Brasil, baseada em análise insumo-produto**. 264 p. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Mecânica. Unicamp, Campinas. 2011.

DANTAS, G.A. **A importância e a competitividade da bioeletricidade para o SEB**. Seminário "Etanol e Bioeletricidade: a contribuição da cana para o desenvolvimento sustentável", Piracicaba, 04 de dezembro de 2009.

DE MARIA, I.C.. IAC, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais-Plantio direto, 2005. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/>. Acesso em maio de 2011.

DEMIRBAS, A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. **Applied Energy**, vol. 86, Supplement 1, p.108–117, 2009.

DIAS, M. O.S.; MODESTO, M.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; Rosell, C. E.V. . Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. **Energy** (Oxford), v. 36, p. 3691-3703, 2011.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**. 103: 152-161, 2012a.

DIAS, M.O.S.; JUNQUEIRA, T.L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M.P.; JESUS, C.D.F.; MANTELATTO, P. E.; ROSSELL, C.E.V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.. Evaluation of different cogeneration systems in first and second generation ethanol production from sugarcane. **Computer-Aided Chemical Engineering**. 1:172-176. 2012b.

- DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; PAVANELLO, L. G.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, v. 109, p. 72-78, 2013.
- DUARTE JUNIOR, J.B.; COELHO, F.C.. Adubos verdes e seus efeitos no rendimento da cana-de-açúcar em sistema de plantio direto. **Bragantia**, v.67, p. 723-732, 2008.
- DUER, H.; CHRISTENSEN, P. O.. Socioeconomic aspects of different bio-fuel development pathways. **Biomass Bioenergy**. Vol. 34(2) p. 237- 243, 2010.
- EC-JRC, ILCD Handbook. **Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**. 2010, p115. Disponível em: <http://lct.jrc.ec.europa.eu>. Acesso em outubro 2013.
- EHRlich, P. J.; MORAES, E. A. **Engenharia econômica: avaliação e seleção de projetos de investimento**. 6. ed., São Paulo: Atlas, 2005.
- FEIJÓ, C. A. et al. **Contabilidade Social: a nova referência das contas nacionais**. 3. Ed. Revisada e Atualizada. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- FELÍCIO, M.. CANAOESTE, Plantio direto de soja sobre palha de cana-de-açúcar. **Revista Canavieiros**, março 2007.
- FELIPE, M. G. A. **A qualidade da matéria-prima na produção de etanol de cana-de-açúcar**. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, p. 553-560, 2010.
- FERNANDES, C.; CORA, J. E.; MARCELO, A. V.. Soil uses in the sugarcane fallow period to improve chemical and physical properties of two latosols (oxisols). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 283-294, 2012.
- FRANCO, F.N.. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhico de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) a granel**. 2003. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.
- FRANCO, H. C. J.. **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. 2008. 127 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.
- FRANCO, H. C.J.; MAGALHÃES, P. S. G.; CAVALETT, O. ; CARDOSO, T. F.; BRAUNBECK, O. A.; BONOMI, A.; TRIVELIN, P. C. O.. **How much trash to removal from sugarcane field to produce bioenergy?**. In: Brazilian BioEnergy Science and Technology Conference BBEST, Campos de Jordão. Proceedings, v. 1. 2011.
- FRANCO, H.C.J. ; PIMENTA, M. T. B.; CARVALHO, J. L. N.; MAGALHAES, P. S. G.; ROSSELL, C. E. V.; BRAUNBECK, O. A.; VITTI, A. C.; KOLLN, O. T.; ROSSI NETO, J. . Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Scientia Agrícola** (USP. Impresso), v. 70, p. 305-312, 2013.
- FUKUROZAKI , S. H.. **Avaliação do Ciclo de Vida de Potenciais Rotas de Produção de Hidrogênio: Estudo dos Sistemas de Gaseificação e de Energia Solar Fotovoltaica**. 2011.Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, São Paulo – SP, 2011 .

FURLANI NETO, V.L.. **Colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) avaliação em canaviais com e sem queima prévia.** 1995. Tese (Doutorado em Agronomia) – ESALQ, USP, Piracicaba. 1995.

GALBE, M.; ZACCHI, G. **Produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos.** In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, p. 697-716, 2010.

GALDOS, M. V.. **Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar.** 2007. 101 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, ESALQ, Piracicaba, 2007.

GARSDIE, A.L.; BELL, M.J.. **Fallow legumes in the Australian sugar industry: Review of recent research findings and implications for the sugarcane cropping system.** Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists., v. 23, p. 230-5, 2001.

GARSDIE, A.L.; BERTHELSEN, J.E.; PANKHURST, C.E.; BLAIR, B.L.; MAGAREY, R.C.; D'AMATO, C.; BULL, J.I. **Effect of breaks from sugarcane monoculture and biocides on the growth and yield of a subsequent sugarcane crop.** Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists., v.24, p. 82 – 91, 2002.

GERMEK, H. A.; RIPOLI, T. C. C.; SIMON, E. J.; VILLANOVA, N. A. ; RIPOLI, M. L. C. . **Análise de decisão sobre o aproveitamento do palhico de cana-de-açúcar para cogeração..** In: 7º Seminário de mecanização agrícola e produção de cana-de-açúcar, 2005, Ribeirão Preto. Seminário de mecanização agrícola e produção de cana-de-açúcar. Ribeirão Preto: IDEA-Instituto de desenvolvimento industrial, 2005.

GONÇALVES, D.B.; ALVES, F.J.C.. **A legislação ambiental e o desenvolvimento sustentável no complexo agroindustrial canavieiro da bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu.** In: SEMINÁRIO ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE: regulação estatal e auto-regulação empresarial para o desenvolvimento sustentável, 3., Campinas. Anais... Campinas: Unicamp, 24 p., 2003. Disponível em: <http://www.freewebs.com/danielbertoli/textos/texto08.pdf>. Acesso em 02 de jul, de 2010.

GONÇALVES, D. B.. **Sob as cinzas dos canaviais: o perigoso impasse das queimadas no estado de São Paulo.** Informações Econômicas, São Paulo, v. 35, n. 8, p.32-44, ago. 2005. Mensal. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/publicacoes/ieant.php>>. Acesso em: 03 setembro 2009.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; SCHRYVE, A.; Vieira, M.. **Simapro 7 Database Manual – Methods Library.** Pré Consultants. Amersfoort, Holanda. 2008.

GOULART, A. C. P.. **Sistema de plantio direto: sinônimo de sustentabilidade.** A Lavoura, Rio de Janeiro, v. 674, n. 112, p.34-35, out. 2009. Bimestral. Disponível em: <<http://www.sna.agr.br/artigos/674/ALAV674-plantidir.pdf>>. Acesso em: 15 agosto 2011.

GUILHOTO, J. J. M. ; BARROS, A. M. B. ; MAISTRO, M. C. M. ; ISTAKE, M.. **Mechanization process of the sugar cane harvest and its direct and indirect impact over the employment in Brazil and in its 5 Macro Regions.** Texto de Seminários Ipe Usp, São Paulo, v. 09, 2002.

- GUILHOTO, J.J.M. **Análise de insumo-produto: Teoria, fundamentos e aplicações**. Livro em Elaboração. Departamento de Economia. FEA - USP. Versão Revisada. 2011. Disponível em: <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/32566/2/MPRA_paper_32566.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2012.
- GUINÉE, J. B.; GORÉE, M.; HUPPES, R. H. G.; KLEIJN. R.; KONING, A.; SLEESWIJK, L. O. A. W.; SUH, S.; HAES, H. A. U. **Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards**. Publisher: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.de C.. (Eds.); **“Biomass power generation. Sugar cane bagasse and trash.”** Published by UNDP-UN and Centro de Tecnologia Canavieira-CTC, Piracicaba, Brazil, 2005 (ISBN 85-99371-01-0). Disponível em: http://www.sucree-thique.org/IMG/pdf/CTC_energy_-_biomass_1_.pdf. Acesso em: 25 abril 2011.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Matriz de insumo produto: Brasil - 2000/2005**. (Contas Nacionais, n.º. 23). Rio de Janeiro (RJ): IBGE, 60p., 2008.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contas Nacionais. **Tabelas de Recursos e Usos**. Disponível em: <http://www.ibge.com.br/home/estatistica/economia/contasnacionais/2008/defaulttabzip.shtm>. Acesso em: 03 dezembro 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Mensal de Emprego (PME)**. 2014. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/trabalhoerendimento/pme_nova/default.shtm. Acesso em junho de 2014.
- IDEANews – Os gigantes que economizam tempo e dinheiro. **Revista IDEANews**, ano 11, número 143, p. 18-22, Ribeirão Preto – SP, 2012.
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Biocombustíveis no Brasil: etanol e biodiesel**. Comunicado 53. Série eixos do desenvolvimento brasileiro. 62p., 2010.
- ISO. International Organization for Standardization. **Environmental management – Life Cycle assessment – Principles and framework – ISO 14.040**. ISO, Genebra, 2006a.
- ISO. International Organization for Standardization. **Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. ISO 14044. ISO, Genebra, 2006b.
- JARDIM, A.. Bioeletricidade a energia que vem da nossa terra. **Revista Brasileira de Energia**, vol. 13, n. 2, p. 9-18, 2007.
- KENT, G.A. The effect of trash on the operation and performance of a raw sugar factory. **International Sugar Journal**, vol. 110, n. 1312: 232- 235, 2008.
- KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. **Agricultural Systems**, v.104, p.513-521, 2011.
- LEAL, M.R. L.V.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E.A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O.F.. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, Volume 53, June 2013, p. 11–19, 2013.
- LEITE, R. C. de C.; LEAL, M. R. L. V.. O biocombustível no Brasil. **Novos estud. - CEBRAP**, São Paulo, n. 78, jul. 2007. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 28 out. 2009.

LEONTIEF, W.. **A Economia do Insumo-Produto**. 3. ed. São Paulo: Nova Cultural, 226 p., 1988.

LOPES, A. S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A.. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: Editora Gráfica Nagy Ltda., 110 p., 2004 apud OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B. e BARROS, N.F. **Fertilidade do solo no sistema Plantio Direto**. Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa, v. 2, p.393-486, 2002.

LUO, L.; VOET, E.; HUPPES, G.. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, n. 6-7, p. 1613 - 1619, 2009.

LUZ, L. M.; PIEKARSKI, C. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C.. **Desenvolvimento acadêmico brasileiro em Análise do Ciclo de Vida: tendências e perspectivas**. In: ALTEC - 2013 - XV Congresso Latino-Iberoamericano de Gestão de Tecnologia, 2013, Porto - Portugal. Anais do ALTEC - 2013 - XV Congresso Latino-Iberoamericano de Gestão de Tecnologia. Porto - Portugal. v. 1. p. 1-12, 2013.

MACEDO, I.C.. **As fontes de energia para Geração Distribuída - Gerando energia elétrica com biomassa da cana: início de um ciclo virtuoso**, Seminário de Geração Distribuída, INEE, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MACEDO, I.C. (org). **A energia da cana-de-açúcar- doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. 2ª ed. São Paulo: Berlinds& Vertecchia: Unica, 2007.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. . Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugar cane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass & Bioenergy**, v. 32, p. 4, 2008.

MAGALHÃES, P. S. G.; MILAN, M.; MOLIN, J. P.; SOUZA, Z. M.; VOLPATO, C. E.; SIMÕES, J. **Colheita de cana-de-açúcar e palha para a produção de Etanol**. In: WORKSHOP - COLHEITA, TRANSPORTE E RECUPERAÇÃO DE PALHA, 2., 2006. Anais... Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 19 p, 2006.

MANTOVANI, V. A.. **Avaliação de Ciclo de Vida**. UNESP Sorocaba, 2012. Disponível em: <http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbienta/SandroD.Mancini/acv-vanessa.pdf>. Acesso em novembro de 2013.

MARTINEZ, S.H.; EIJK, J.V; CUNHA, M. P.; WALTER, A. C. da S.; GUILHOTO, J. J.M.; FAAIJ, A.; Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane-ethanol production by means of inter-regional Input-Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil, 12/2013, **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Vol. 28, p.290-316, Oxford, Reino Unido, 2013.

MELLO, R. C.; HARRIS, H.. Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, DEag/UFCG, v.7, n.2, p.355-358, 2003.

MELLO, A. M.. **Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento do palhiço.** 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MICHELAZZO, M. B.. **Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp, Campinas, 2005.

MIERNYK, W. H.. **Elementos de Análise do Insumo-Produto.** 1ª ed. São Paulo: Atlas. 164 p, 1974.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. **Input-output analysis: foundations and extensions.** New Jersey, Prentice Hall, 2009.

MORAES, M. A. F. D.. **Perspectivas do setor sucroalcooleiro: desafios e oportunidades do mercado de trabalho.** Evento Empregabilidade no setor sucroalcooleiro Piracicaba. Esalq/USP, 2007. Disponível em: <http://www.petgaea.esalq.usp.br/wp-content/uploads/2007/10/empregabilidade29_09_07-marcia.pdf>. Acesso em: 20 set. 2009

MORAES, M. A. F. D.; COSTA, C.C.; GUILHOTO, J. J. M.; SOUZA, L. G. A.; OLIVEIRA, F. C. R.. **Externalidades sociais dos combustíveis.** In: Isaias deCarvalho Macedo; Eduardo Leão de Sousa. (Org.). Etanol e Bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. 1 ed. São Paulo: UNICA, v. 1, p.44-75, 2010.

MUIR, B.; EGGLESTON, G.. **Factory trials to determine how sugarcane trash impacts downstream processing including affinated sugar production.** Proc. 2009 Sugar Industry Technol. Mtg. Vol. LXVIII, no. 960. p. 24-48, 2009.

MUIR, B.; EGGLESTON, G.; BARKER, B.. The effect of green sugarcane on downstream factory processing. Sugar Milling Research Institute (SMRI) **Technical Report.** n. 2051. p. 24-48, 2009.

NEVES, J.L.M. et al. Avaliação de perdas invisíveis de cana-de-açúcar nos sistemas da colhedora de cana picada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.539-46, 2003.

NEVES, J.L.M.; MAGALHÃES, P.S.G.; OTA, W.M. Sistema de monitoramento de perdas visíveis de cana-de-açúcar em colhedora de cana picada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.764-770, 2004.

NEVES, J.L.M. et al. Avaliação de perdas invisíveis na colheita mecanizada em dois fluxos de massa de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.3, p.787-94, 2006.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. (coord. e org.) **A dimensão do setor Sucoenergético: mapeamento e quantificação da safra 2013/14.** Ribeirão Preto: Marketstrat, Fundace, FEA – RP/USP, 46 p., 2014.

PAES, L. A. D.. **Emissões nas queimadas de cana, controle.** In: Macedo, I.C. (org). A energia da cana-de-açúcar. Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade. 2ª ed. São Paulo: Berlinds & Vertecchia:Unica, p. 85-89, 2007.

PEREA, L. A.. **Avaliação de sistemas de manejo do palhiço de cana-de-açúcar no campo e na indústria.** 2009.93 f. Tese (Doutorado) Pós-Graduação em Agronomia-Energia na Agricultura - Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP-Botucatu, 2009.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M. ; ZOCHE, L. ; FRANCISCO, A. C. . Métodos de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, p. 222-240, 2012.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD), **Tratado pretende reduzir poluição em 5,2%**, 2005. Disponível em: http://www.pnud.org.br/meio_ambiente/reportagens/index.php?id01=989&lay=mam . Acesso em: 10 mar. 2008.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.. **Plantio de cana-de-açúcar: Estado da arte**. 2. ed. Piracicaba: edição dos autores, . v. 1. 198 p., 2007.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 333p., 2009.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, T. C.. **Palhico como fonte de energia**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; de VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A.. (Org.). **Cana-de-açúcar**. 1a ed. Campinas: Instituto Agrônômico, v. 1, p. 791-806, 2008.

RIPOLI, M. L. C.. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) para fins energéticos**. 2004. 213 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências, Botucatu, 2004.

RODRIGUES, M. S.; BERARDO, A. L.; SAVASTANO JR, H. ; SANTOS, S. F. . Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 17, p. 1347, 2013.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S.. **Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.45, p.744-750, 2010.

ROSA, E. J.; JOSE, J. V.; GAVA, R.; SALVESTRO, A. C . **Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colheita mecanizada**. VI EPCC ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR, 2009, MARINGÁ. VI EPCC ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR, 2009.

ROSSETTO, R. **Cana-de-açúcar – Implicações da queimada**, Agência de Informação Embrapa, 2009. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>, acesso em: 02/03/2012.

ROSSINI, R. E.. **Contrata-se pessoal técnico especializado para conduzir máquinas na área canavieira de Ribeirão Preto (São Paulo - Brasil)**. XVI Encontro Nacional de Estudos Populacionais - As Desigualdades Sócio-Demográficas e os Direitos Humanos no Brasil, Caxambu - MG, setembro/outubro, 2008. Disponível em: <http://www.abep.nepo.unicamp.br/encontro2008/docsPDF/ABEP2008_1056.pdf >. Acesso em: 06 jan. 2009.

SANTOS, F.A.; QUEIRÓZ, J. H. DE; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T.. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. Química Nova, São Paulo, v. 35, n. 5, 2012 .

SCHOGOR, A. L. B.; NUSSIO, L. G.; MOURÃO, G. B.; MURARO, G. B.; SARTURI, J. O.; MATOS, B. C.. **Perdas das frações de cana-de-açúcar submetida a diversos métodos de**

colheita. Revista Brasileira de Zootecnia, Ago 2009, vol.38, no.8, p.1443-1450. ISSN 1516-3598, 2009.

SCOTT, R.P. **The limitations imposed on crushing rate by tops and trash**. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. SASTA. Proc. 51: 164-166. June. 1977.

SCOTT, R.P.; FALCONER, D.; LIONNET, G.R.E.. **A laboratory investigation of the effects of tops and trash on extraction, juice quality and clarification**. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. SASTA. Proc. 52: 51-53. June. 1978.

SEABRA, J.E.A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. Tese (Doutorado), Planejamento de Sistemas Energéticos-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C.; CHUM, H. L.; FARONI, C. E.; SARTO, C. A. . Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**. v. 5, p. 519-532, 2011.

SILVA, R.D. **Setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo: mensurando impactos socioeconômicos**. Observatório do Setor Sucroalcooleiro. Ribeirão Preto, p. 1-16, 2008.

SIAMIG – Bioenergia – Etanol – Açúcar – **Protocolo Agroambiental de Minas Gerais para eliminação da queima da cana-de-açúcar em 2014**. Disponível em: <http://www.siamig.org.br/>. Acesso em 04 de abril de 2011.

SLADE, R.; BAUEN, A.; SHAH, N.. The commercial performance of cellulosic ethanol supply-chains in Europe. **Biotechnology for Biofuels**. doi:10.1186/1754-6834-2-3, 2009.

SMA - Secretaria do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo (Org.). **21 Projetos Ambientais Estratégicos**. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/21projetos/default.asp#topo>>. Acesso em: 05 mar. 2009.

SMA - Secretaria do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo. **Resultado das Safras**. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/resultadoSafras.php>. Acesso em 06 de novembro de 2013.

SOARES, L.H.B. ; ALVES, B. J. R. ; URQUIAGA, S. ; BODDEY, R. M. . Brazilian ethanol and the mitigation of greenhouse gases emission. **Revista Brasileira de Bioenergia**, v. 3, p. 48-53, 2009.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. **Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 40, n. 3, p. 271-278, 2005.

STIRLING, G.R.; BLAIR, B.L.; PATTEMORE, J.A.; GARSIDE, A.L.; BELL, M.J. Changes in nematode populations on sugarcane following fallow, fumigation and crop rotation, and implications for the role of nematodes in yield decline. **Australian Plant Pathology**, v. 30, p. 323-335, 2001.

TORREZAN, H.F.. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FERREIRA, D. A. ; VITTI, A. CÉSAR; FORTES, C.; FARONI, C. E. ; OLIVEIRA, E. C. A.; CANTARELLA, H.. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agrícola** (USP. Impresso), v. 70, p. 345-352, 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Dados, cotações e estatísticas**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 15 outubro 2009.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. SOUSA, E. L; MACEDO, I. C (coord.). São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010a.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **As tendências dos biocombustíveis no Brasil**. JANK, M. S.. Diálogos Capitais 2010: o Brasil e a energia do amanhã, FAAP, São Paulo, SP. 2010b.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Histórico de produção e moagem**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em: fevereiro de 2014.

VILELA, F. S. V.. **Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A**. Dissertação (Mestrado). Publicação ENM.DM-184A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p. 2013.

VOLPATO, J. L. M. **Otimização de um cortador de base flutuante para seguimento do perfil de solo em colhedoras de cana-de-açúcar**. 2001.204p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

VOLPATO, C. E. S.; BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, C. A. A. Desenvolvimento e avaliação de um protótipo de cortador base para colhedoras de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande,v.6,n.2,p.345-348, 2002.

ZULLO JR, J. ; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.. **As mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, v. 1, p. 195-202, 2010.

APÊNDICES

Apêndice 1: Participação na categoria Depleção Abiótica - Fase Agrícola

			Fertilizantes e corretivos (produção)	Diesel (produção)	Transporte (colmos e palha)	Equipamentos agrícolas	Aplicação de vinhaça	Transporte de insumos	Agroquímicos (produção)	
Convencional	Base	Base	41,4%	30,6%	13,8%	7,9%	2,8%	2,4%	1,0%	
		Fardos	3,2t/ha	40,6%	31,7%	13,7%	8,3%	2,6%	2,2%	1,0%
			5,4t/ha	41,0%	31,1%	13,9%	8,3%	2,5%	2,2%	0,9%
	7,5t/ha		41,4%	30,7%	14,1%	8,3%	2,4%	2,2%	0,9%	
	Integral	3,2t/ha	41,1%	28,6%	16,3%	8,0%	2,7%	2,3%	1,0%	
		5,4t/ha	40,3%	27,7%	18,2%	8,1%	2,6%	2,2%	0,9%	
7,5t/ha		39,6%	27,0%	19,8%	8,1%	2,5%	2,1%	0,9%		
ETC	Fardos	3,2t/ha	42,3%	29,2%	14,9%	7,5%	2,9%	2,2%	1,0%	
		5,4t/ha	42,5%	28,8%	15,1%	7,6%	2,8%	2,2%	1,0%	
		7,5t/ha	42,6%	28,5%	15,3%	7,7%	2,8%	2,1%	1,0%	
	Integral	3,2t/ha	42,6%	27,1%	17,1%	7,1%	2,9%	2,2%	1,0%	
		5,4t/ha	41,3%	26,8%	18,8%	7,2%	2,8%	2,1%	1,0%	
		7,5t/ha	40,3%	26,6%	20,3%	7,2%	2,7%	2,0%	0,9%	
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	40,5%	27,4%	19,1%	7,3%	2,7%	2,1%	0,9%	
	Integral sem ponteiro repicada	7,5t/ha	43,6%	28,2%	14,9%	7,1%	2,9%	2,2%	1,0%	

Apêndice 2: Participação na categoria Acidificação - Fase Agrícola

			Fertilizantes (uso)	Fertilizantes e corretivos (produção)	Diesel (uso)	Transporte (colmos e palha)	Diesel (produção)	Equipamentos agrícolas	Aplicação de vinhaça	Transporte de insumos	Agroquímicos (produção)	
Convencional	Base	Base	87,1%	5,7%	4,2%	0,9%	0,7%	0,6%	0,4%	0,2%	0,1%	
		Fardos	3,2t/ha	87,0%	5,6%	4,5%	0,9%	0,8%	0,6%	0,4%	0,2%	0,1%
			5,4t/ha	87,2%	5,5%	4,3%	0,9%	0,8%	0,6%	0,4%	0,2%	0,1%
	7,5t/ha		87,3%	5,5%	4,3%	0,9%	0,7%	0,6%	0,4%	0,1%	0,1%	
	Integral	3,2t/ha	87,3%	5,6%	4,0%	1,1%	0,7%	0,6%	0,4%	0,2%	0,1%	
		5,4t/ha	87,3%	5,6%	3,9%	1,3%	0,7%	0,6%	0,4%	0,2%	0,1%	
7,5t/ha		87,2%	5,5%	3,9%	1,5%	0,7%	0,6%	0,4%	0,1%	0,1%		
ETC	Fardos	3,2t/ha	87,8%	5,4%	3,9%	1,0%	0,7%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	
		5,4t/ha	87,9%	5,3%	3,9%	1,0%	0,7%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	
		7,5t/ha	88,0%	5,3%	3,8%	1,0%	0,7%	0,6%	0,4%	0,1%	0,1%	
	Integral	3,2t/ha	88,0%	5,4%	3,7%	1,2%	0,6%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	
		5,4t/ha	87,8%	5,4%	3,7%	1,3%	0,6%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	
		7,5t/ha	87,7%	5,3%	3,8%	1,5%	0,7%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	
	Integral sem ponteiro	7,5 t/ha	87,7%	5,3%	3,8%	1,4%	0,7%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	
	Integral sem ponteiro repicada	7,5t/ha	88,3%	5,3%	3,7%	1,0%	0,6%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	

Apêndice 3: Participação na categoria Eutrofização - Fase Agrícola

			Fertilizantes e corretivos (produção)	Diesel (produção)	Transporte (colmos e palha)	Equipamentos agrícolas	Aplicação de vinhaça	Transporte de insumos	Agroquímicos (produção)	
Convencional		Base	41,4%	30,6%	13,8%	7,9%	2,8%	2,4%	1,0%	
	Fardos	3,2t/ha	40,6%	31,7%	13,7%	8,3%	2,6%	2,2%	1,0%	
		5,4t/ha	41,0%	31,1%	13,9%	8,3%	2,5%	2,2%	0,9%	
		7,5t/ha	41,4%	30,7%	14,1%	8,3%	2,4%	2,2%	0,9%	
	Integral	3,2t/ha	41,1%	28,6%	16,3%	8,0%	2,7%	2,3%	1,0%	
		5,4t/ha	40,3%	27,7%	18,2%	8,1%	2,6%	2,2%	0,9%	
		7,5t/ha	39,6%	27,0%	19,8%	8,1%	2,5%	2,1%	0,9%	
	ETC	Fardos	3,2t/ha	42,3%	29,2%	14,9%	7,5%	2,9%	2,2%	1,0%
			5,4t/ha	42,5%	28,8%	15,1%	7,6%	2,8%	2,2%	1,0%
7,5t/ha			42,6%	28,5%	15,3%	7,7%	2,8%	2,1%	1,0%	
Integral		3,2t/ha	42,6%	27,1%	17,1%	7,1%	2,9%	2,2%	1,0%	
		5,4t/ha	41,3%	26,8%	18,8%	7,2%	2,8%	2,1%	1,0%	
		7,5t/ha	40,3%	26,6%	20,3%	7,2%	2,7%	2,0%	0,9%	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	40,5%	27,4%	19,1%	7,3%	2,7%	2,1%	0,9%	
Integral sem ponteiro repicada		7,5t/ha	43,6%	28,2%	14,9%	7,1%	2,9%	2,2%	1,0%	

Apêndice 4: Participação na categoria Aquecimento Global - Fase Agrícola

			Fertilizantes (uso)	Fertilizantes e corretivos (produção)	Diesel (uso)	Transporte (colmos e palha)	Equipamentos agrícolas	Diesel (produção)	Aplicação de vinhaça	Transporte de insumos	Agroquímicos (produção)	
Convencional		Base	56,5%	15,3%	13,4%	6,6%	3,3%	1,8%	1,5%	1,2%	0,4%	
	Fardos	3,2t/ha	53,9%	15,8%	14,7%	6,9%	3,6%	2,0%	1,5%	1,1%	0,4%	
		5,4t/ha	52,8%	16,4%	14,8%	7,2%	3,8%	2,0%	1,5%	1,2%	0,4%	
		7,5t/ha	51,8%	16,9%	14,9%	7,5%	3,9%	2,0%	1,5%	1,2%	0,4%	
	Integral	3,2t/ha	54,3%	16,0%	13,2%	8,2%	3,5%	1,8%	1,5%	1,2%	0,4%	
		5,4t/ha	52,6%	16,2%	13,2%	9,5%	3,6%	1,8%	1,5%	1,2%	0,4%	
		7,5t/ha	51,0%	16,4%	13,3%	10,6%	3,8%	1,8%	1,5%	1,1%	0,4%	
	ETC	Fardos	3,2t/ha	55,6%	15,9%	13,1%	7,3%	3,2%	1,8%	1,6%	1,1%	0,4%
			5,4t/ha	54,5%	16,4%	13,2%	7,6%	3,3%	1,8%	1,6%	1,1%	0,4%
7,5t/ha			53,4%	16,8%	13,5%	7,9%	3,4%	1,8%	1,6%	1,1%	0,4%	
Integral		3,2t/ha	55,6%	16,1%	12,2%	8,4%	3,0%	1,6%	1,6%	1,1%	0,4%	
		5,4t/ha	53,6%	16,2%	12,6%	9,6%	3,1%	1,7%	1,6%	1,1%	0,4%	
		7,5t/ha	51,8%	16,4%	12,9%	10,7%	3,3%	1,7%	1,6%	1,1%	0,4%	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	52,3%	16,3%	13,2%	10,0%	3,3%	1,8%	1,7%	1,1%	0,4%	
Integral sem ponteiro repicada		7,5t/ha	54,3%	16,9%	13,1%	7,5%	3,1%	1,8%	1,7%	1,1%	0,4%	

Apêndice 5: Participação na categoria Toxicidade Humana - Fase Agrícola

			Agroquímicos (uso)	Fertilizantes e corretivos (produção)	Diesel (uso)	Equipamentos agrícolas	Fertilizantes (uso)	Agroquímicos (produção)	Transporte (colmos e palha)	Diesel (produção)	Transporte de insumos	Aplicação de vinhaça	
Convenção		Base	36,1%	17,4%	12,4%	11,6%	9,6%	6,3%	2,1%	2,1%	0,3%	2,0%	
	Fardos	3,2t/ha	34,6%	17,7%	13,3%	12,2%	9,5%	6,1%	2,2%	2,2%	0,3%	1,9%	
		5,4t/ha	34,2%	18,1%	13,3%	12,2%	9,5%	6,0%	2,3%	2,2%	0,3%	1,9%	
		7,5t /ha	33,7%	18,5%	13,3%	12,3%	9,5%	5,9%	2,3%	2,2%	0,3%	1,9%	
	Integral	3,2t/ha	35,0%	18,0%	12,1%	12,0%	9,6%	6,2%	2,7%	2,0%	0,3%	2,0%	
		5,4t/ha	34,4%	18,1%	12,0%	12,5%	9,5%	6,0%	3,1%	2,0%	0,3%	2,0%	
		7,5t/ha	33,8%	18,2%	12,0%	12,8%	9,4%	6,0%	3,5%	2,0%	0,3%	2,0%	
	ETC	Fardos	3,2t/ha	36,8%	18,1%	12,2%	10,1%	9,6%	6,5%	2,3%	2,0%	0,3%	2,2%
			5,4t/ha	36,4%	18,4%	12,2%	10,2%	9,6%	6,4%	2,4%	2,0%	0,3%	2,2%
7,5t /ha			36,0%	18,6%	12,2%	10,3%	9,6%	6,3%	2,5%	2,0%	0,3%	2,1%	
Integral		3,2t/ha	36,8%	18,5%	11,4%	9,9%	9,8%	6,5%	2,8%	1,9%	0,3%	2,2%	
		5,4t/ha	35,9%	18,5%	11,7%	10,4%	9,6%	6,3%	3,2%	2,0%	0,3%	2,2%	
		7,5t /ha	35,2%	18,5%	11,9%	10,8%	9,5%	6,2%	3,6%	2,0%	0,3%	2,1%	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	35,6%	18,2%	12,0%	10,7%	9,4%	6,3%	3,3%	2,0%	0,3%	2,2%	
Integral sem ponteiro repicada		7,5t/ha	36,6%	18,7%	11,8%	9,9%	9,7%	6,4%	2,4%	2,0%	0,3%	2,2%	

Apêndice 6: Participação na categoria Depleção Abiótica – Modelo Verticalizado

		Colmos	Insumos industriais	Palha	Equipamentos industriais	Água	
Convencional	Base	90,1%	5,4%	1,3%	2,1%	1,1%	
	Fardos	3,2 t/ha	87,1%	6,2%	3,6%	2,1%	1,0%
		5,4 t/ha	85,0%	6,1%	5,9%	2,1%	1,0%
		7,5t /ha	83,0%	5,9%	8,0%	2,1%	1,0%
		2G 7,5t/ha	68,0%	22,2%	6,5%	2,1%	1,1%
	Integral	3,2 t/ha	85,6%	6,3%	4,8%	2,2%	1,1%
		5,4 t/ha	83,6%	6,2%	7,0%	2,2%	1,1%
		7,5t /ha	81,9%	6,0%	8,9%	2,2%	1,0%
		2G 7,5t/ha	64,9%	24,7%	7,1%	2,2%	1,1%
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	85,9%	7,1%	3,4%	2,4%
5,4 t/ha			83,9%	7,0%	5,6%	2,4%	1,2%
7,5t /ha			82,1%	6,8%	7,6%	2,4%	1,1%
2G 7,5t/ha			65,8%	24,5%	6,1%	2,4%	1,2%
Integral		3,2 t/ha	84,7%	7,0%	4,7%	2,5%	1,2%
		5,4 t/ha	82,9%	6,7%	6,9%	2,4%	1,1%
		7,5t /ha	81,3%	6,5%	8,8%	2,3%	1,1%
		2G 7,5t/ha	63,7%	25,9%	6,9%	2,3%	1,2%
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	82,6%	6,6%	7,3%	2,4%	1,1%
Integral sem ponteiro repicada		7,5t /ha	82,0%	7,0%	7,3%	2,6%	1,2%
	2G 7,5t/ha	63,2%	27,4%	5,6%	2,5%	1,3%	

Apêndice 7: Participação na categoria Acidificação – Modelo Verticalizado

		Colmos	Emissões diretas na biorrefinaria	Insumos industriais	Palha	Água	Equipamentos industriais	
Convencional	Base	89,5%	8,3%	1,6%	0,1%	0,4%	0,2%	
	Fardos	3,2 t/ha	84,5%	9,9%	1,6%	3,5%	0,3%	0,2%
		5,4 t/ha	81,4%	11,0%	1,5%	5,6%	0,3%	0,2%
		7,5t /ha	78,7%	11,9%	1,4%	7,6%	0,3%	0,2%
		2G 7,5t/ha	80,0%	7,4%	4,4%	7,7%	0,4%	0,2%
	Integral	3,2 t/ha	83,2%	10,1%	1,5%	4,6%	0,3%	0,2%
		5,4 t/ha	80,0%	11,3%	1,5%	6,7%	0,3%	0,2%
		7,5t /ha	77,2%	12,4%	1,5%	8,4%	0,3%	0,2%
		2G 7,5t/ha	78,6%	7,5%	4,7%	8,5%	0,4%	0,2%
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	83,6%	10,8%	1,7%	3,3%	0,4%
5,4 t/ha			80,5%	11,9%	1,6%	5,4%	0,3%	0,2%
7,5t /ha			77,8%	12,9%	1,6%	7,2%	0,3%	0,2%
2G 7,5t/ha			79,2%	8,0%	4,7%	7,3%	0,5%	0,2%
Integral		3,2 t/ha	82,5%	10,7%	1,6%	4,5%	0,4%	0,2%
		5,4 t/ha	79,4%	11,9%	1,6%	6,6%	0,3%	0,2%
		7,5t /ha	76,7%	12,9%	1,5%	8,3%	0,3%	0,2%
		2G 7,5t/ha	78,0%	7,9%	4,9%	8,5%	0,5%	0,2%
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	77,9%	13,1%	1,5%	6,9%	0,3%	0,2%
Integral sem ponteiro repicada		7,5t /ha	77,8%	13,2%	1,5%	6,9%	0,3%	0,2%
	2G 7,5t/ha	79,4%	7,9%	5,0%	7,0%	0,5%	0,2%	

Apêndice 8: Participação na categoria Eutrofização – Modelo Verticalizado

		Colmos	Emissões diretas na biorrefinaria	Palha	Insumos industriais	Água	Equipamentos industriais		
Convencional	Base	90,0%	7,6%	0,1%	1,8%	0,2%	0,4%		
	Fardos	3,2 t/ha	85,2%	9,1%	3,5%	1,7%	0,2%	0,4%	
		5,4 t/ha	82,2%	10,0%	5,7%	1,6%	0,2%	0,4%	
		7,5t /ha	79,5%	10,8%	7,6%	1,6%	0,2%	0,4%	
		2G 7,5t/ha	82,1%	6,8%	7,9%	2,5%	0,2%	0,5%	
	Integral	3,2 t/ha	83,9%	9,3%	4,7%	1,6%	0,2%	0,4%	
		5,4 t/ha	80,7%	10,4%	6,8%	1,6%	0,2%	0,4%	
		7,5t /ha	78,0%	11,3%	8,5%	1,6%	0,2%	0,4%	
		2G 7,5t/ha	80,8%	7,0%	8,8%	2,6%	0,3%	0,5%	
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	84,3%	9,8%	3,4%	1,9%	0,2%	0,4%
			5,4 t/ha	81,3%	10,9%	5,5%	1,8%	0,2%	0,4%
			7,5t /ha	78,6%	11,8%	7,3%	1,7%	0,2%	0,4%
2G 7,5t/ha			81,4%	7,5%	7,5%	2,7%	0,3%	0,5%	
Integral		3,2 t/ha	83,2%	9,8%	4,6%	1,7%	0,2%	0,4%	
		5,4 t/ha	80,1%	10,9%	6,7%	1,7%	0,2%	0,4%	
		7,5t /ha	77,5%	11,8%	8,4%	1,6%	0,2%	0,4%	
		2G 7,5t/ha	80,4%	7,4%	8,7%	2,7%	0,3%	0,5%	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	78,7%	12,0%	7,0%	1,6%	0,2%	0,4%	
Integral sem ponteiro repicada		7,5t /ha	78,7%	12,1%	7,0%	1,6%	0,2%	0,4%	
		2G 7,5t/ha	81,8%	7,4%	7,2%	2,7%	0,3%	0,6%	

Apêndice 9: Participação na categoria Aquecimento Global – Modelo Verticalizado

		Colmos	Emissões diretas na biorrefinaria	Insumos industriais	Palha	Equipamentos industriais	Água		
Convencional	Base	86,5%	7,9%	2,2%	1,9%	1,0%	0,5%		
	Fardos	3,2 t/ha	81,5%	9,8%	3,8%	3,3%	1,0%	0,5%	
		5,4 t/ha	78,2%	11,1%	3,8%	5,4%	1,1%	0,5%	
		7,5t /ha	75,2%	12,3%	3,7%	7,2%	1,1%	0,5%	
		2G 7,5t/ha	71,6%	7,2%	12,4%	6,9%	1,3%	0,7%	
	Integral	3,2 t/ha	80,0%	10,0%	3,9%	4,5%	1,1%	0,5%	
		5,4 t/ha	76,7%	11,3%	3,9%	6,4%	1,1%	0,5%	
		7,5t /ha	73,9%	12,6%	3,8%	8,0%	1,1%	0,5%	
		2G 7,5t/ha	69,5%	7,1%	13,9%	7,5%	1,3%	0,7%	
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	80,2%	10,6%	4,2%	3,2%	1,1%	0,6%
			5,4 t/ha	76,9%	12,1%	4,2%	5,2%	1,2%	0,6%
			7,5t /ha	73,9%	13,4%	4,1%	6,8%	1,2%	0,6%
2G 7,5t/ha			70,2%	7,8%	13,4%	6,5%	1,4%	0,7%	
Integral		3,2 t/ha	79,0%	10,6%	4,2%	4,3%	1,2%	0,6%	
		5,4 t/ha	75,9%	11,9%	4,1%	6,3%	1,2%	0,6%	
		7,5t /ha	73,1%	13,1%	4,1%	7,9%	1,2%	0,6%	
		2G 7,5t/ha	68,6%	7,4%	14,5%	7,5%	1,4%	0,7%	
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	74,2%	13,3%	4,1%	6,6%	1,2%	0,6%	
Integral sem ponteiro repicada		7,5t /ha	73,7%	13,8%	4,2%	6,5%	1,2%	0,6%	
		2G 7,5t/ha	69,2%	7,6%	14,9%	6,1%	1,5%	0,8%	

Apêndice 10: Participação na categoria Toxicidade Humana – Modelo Verticalizado

		Colmos	Palha	Insumos industriais	Equipamentos industriais	Emissões diretas na biorrefinaria	Água	
Convencional	Base	92,5%	0,1%	2,7%	2,6%	1,3%	0,8%	
	Fardos	3,2 t/ha	88,6%	3,6%	2,7%	2,6%	1,6%	0,8%
		5,4 t/ha	86,1%	5,9%	2,7%	2,6%	1,9%	0,8%
		7,5t /ha	83,8%	8,1%	2,7%	2,6%	2,1%	0,7%
		2G 7,5t/ha	78,3%	7,5%	8,9%	3,1%	1,2%	1,0%
	Integral	3,2 t/ha	87,2%	4,9%	2,7%	2,7%	1,7%	0,8%
		5,4 t/ha	84,7%	7,1%	2,7%	2,8%	1,9%	0,8%
		7,5t /ha	82,5%	9,0%	2,7%	2,8%	2,2%	0,8%
		2G 7,5t/ha	76,2%	8,3%	10,1%	3,3%	1,2%	1,0%
	ETC	Fardos	3,2 t/ha	87,8%	3,5%	3,1%	2,9%	1,8%
5,4 t/ha			85,3%	5,7%	3,1%	3,0%	2,1%	0,9%
7,5t /ha			83,1%	7,7%	3,0%	3,0%	2,3%	0,8%
2G 7,5t/ha			77,1%	7,1%	9,9%	3,5%	1,3%	1,1%
Integral		3,2 t/ha	86,4%	4,7%	3,0%	3,1%	1,9%	0,9%
		5,4 t/ha	84,0%	7,0%	3,0%	3,0%	2,1%	0,9%
		7,5t /ha	81,9%	8,9%	2,9%	3,1%	2,3%	0,9%
		2G 7,5t/ha	75,3%	8,2%	10,7%	3,5%	1,3%	1,1%
Integral sem ponteiro		7,5 t/ha	83,4%	7,4%	2,9%	3,1%	2,3%	0,9%
Integral sem ponteiro repicada		7,5t /ha	83,2%	7,4%	3,0%	3,2%	2,4%	0,9%
	2G 7,5t/ha	76,3%	6,8%	10,9%	3,7%	1,3%	1,1%	