UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

SIMONE PEREIRA DE SOUZA

**Produção Integrada de Biocombustíveis: Uma Proposta para Reduzir
o Uso de Combustível Fóssil no Ciclo de Vida do Etanol de Cana-De-
Açúcar**

São Carlos
2010

SIMONE PEREIRA DE SOUZA

**Produção Integrada de Biocombustíveis: Uma Proposta para Reduzir
o Uso de Combustível Fóssil no Ciclo de Vida do Etanol de Cana-De-
Açúcar**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de mestre
em Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Pacca

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S729p Souza, Simone Pereira de
Produção integrada de biocombustíveis : uma proposta
para reduzir o uso de combustível fóssil no ciclo de vida
do etanol de cana-de-açúcar / Simone Pereira de Souza ;
orientador Sérgio Pacca. — São Carlos, 2010.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) —
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2010.

1. Biocombustíveis - produção integrada. 2. Etanol.
3. Biodiesel. 4. Ciclo de vida - avaliação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **SIMONE PEREIRA DE SOUZA**

Dissertação defendida e julgada em 11.6.2010 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **SERGIO ALMEIDA PACCA (Orientador)**
(Escola de Artes, Ciências e Humanidades/USP)

aprovada

Prof. Dr. **ALDO ROBERTO OMETTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

Dr. **MARCIO TURRA DE ÁVILA**
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Aprovada

Prof. Associado **EVALDO LUIZ GAETA ESPÍNDOLA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio Marcos Pereira dos Santos e Nilza Ap. de Souza Santos, pelos anos de dedicação, por compreender minhas decisões, pelo cuidado, pelo carinho e pelo amor.

Ao meu irmão Marcos Vinícius pelos momentos de compreensão e companhia, pelo carinho e pelo amor.

Ao Hugo, pelo amor, pelo carinho, compreensão e por todo apoio e incentivo durante esses anos de estudo e dedicação.

Ao meu orientador Sérgio A. Pacca, pela paciência e sabedoria, pelas longas horas de dedicação e apoio, pela compreensão e por aceitar e acreditar no desenvolvimento deste trabalho.

Aos queridos amigos Claudinei Andreoli e Márcio T. Ávila, pelo incentivo a este estudo, pela motivação e por toda contribuição que trouxeram à formação de idéias, conceitos e conhecimento.

Aos professores que participaram e possibilitaram a conclusão de mais essa etapa em meus estudos.

Aos amigos que deixei para trás e que apesar da distância compreenderam e estiverem sempre ao meu lado, com palavras de apoio, incentivo e amizade.

Aos amigos que aqui fiz, pela recepção, pela dedicação, pelo carinho e amizade.

A todos os funcionários do Programa de pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, pelo apoio e dedicação.

Às empresas que me receberam e me orientaram na coleta de informações e dados para esta pesquisa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (Bioen).

“Feliz do povo que pode escolher entre alternativas, quando o restante do mundo se bate, desesperadamente, por uma solução para a crise energética – mesmo que a solução signifique o aprofundamento do problema”.

Décio Luiz Gazzoni - Membro do Painel Científico Internacional de Energia Renovável.

RESUMO

SOUZA, S. P. *Produção Integrada de Biocombustíveis: Uma Proposta para Reduzir o Uso de Combustível Fóssil no Ciclo de Vida do Etanol de Cana-De-Açúcar*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010. 142 p. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental.

A cana-de-açúcar e o dendê estão entre as culturas de maior produtividade, 6 a 7,5 mil litros de etanol/ha.ano e 4 a 6 toneladas de óleo/ha.ano, respectivamente. A produção integrada de biocombustíveis derivados dessas culturas é uma alternativa atraente para melhorar o ciclo de vida através da redução no consumo de combustível fóssil e emissão de gases de efeito estufa (GEE), bem como no aumento da eficiência energética. Nesse sentido, o objetivo desta dissertação é comparar, por meio de indicadores ambientais, o sistema produtivo brasileiro de etanol de cana-de-açúcar com uma proposta de sistema integrado de produção desse álcool com biodiesel de dendê, sendo os indicadores avaliados sob o enfoque do ciclo de vida, segundo norma ISO 14.044/2006. Considerou-se a produção dessas culturas sob bioma de Cerrado, Cerradão e pastagem degradada. Para tanto, foram avaliados o balanço de energia, balanço de carbono e mudança no uso do solo. O sistema integrado inclui a substituição de 100% do diesel, utilizado nas etapas agrícolas do ciclo de vida, por biodiesel de dendê. Foram avaliados os indicadores para diferentes frações de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar, considerando, nesse caso, a produção de etanol via mel final. Os dados foram levantados através de observação direta extensiva por meio de questionários e a partir de dados secundários já publicados. Foram selecionadas três usinas sucroenergéticas no interior de São Paulo e uma unidade industrial de óleo de palma localizada no Pará. Os resultados demonstraram um aumento de 164% no balanço de energia no sistema integrado de produção, quando comparado ao sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar. Além disso, o sistema integrado apresentou 24% de redução nas emissões de GEE. Na avaliação dos indicadores para a produção de etanol via mel final, o balanço de energia foi até 59% e 162% superior nos cenários 1 e 2, respectivamente, os quais se diferenciam pelo tipo de caldeira utilizada. Para as emissões de GEE, a redução pode chegar a 91%. A mudança no uso do solo identificou que o tempo de reposição do carbono liberado com a substituição dos biomas de Cerrado, Cerradão e Pastagem Degradada será, em média, 5, 10 e -5 anos, respectivamente. Por fim, verificou-se que a produção integrada das culturas de cana-de-açúcar e palma de dendê, para a produção de biocombustíveis, apresentou melhorias no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar sob os aspectos de balanço de energia, balanço de emissões de GEE e mudança no uso do solo.

Palavras-chave: Produção integrada de biocombustíveis. Etanol. Biodiesel. Avaliação do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

SOUZA, S. P. *Biofuel integrated production: a proposal for a fossil fuel reduction in sugarcane ethanol life cycle*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010. 142 p. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental.

Sugarcane and palm are amongst the crops with the highest yields, which can reach 6 to 7.5 thousand liters of ethanol per hectare year and 4 to 6 metric tons of oil per hectare year, respectively. A joint production of biofuels from these crops is an interesting alternative for life cycle assessment improvement through fossil fuel and greenhouse gas emissions reduction, besides energy efficiency gains. The objective of this work is comparing the Brazilian production system sugarcane ethanol with an integrated system proposal where the ethanol and palm biodiesel are produced together. This comparative study is based on a life cycle approach using the ISO 14.044/2006 and appropriate indicators. Production systems in Cerrado, Cerradão and grassland ecosystem were considered. The energy balance, carbon balance and land use change were evaluated. The integrated system includes a 100% substitution of biodiesel by diesel, which is used in life cycle agriculture stages. Distinct fractions of sugarcane used for sugar production were assessed. When all sugarcane is sent to sugar production, ethanol is produced by molasses. The data were collected by direct observation method by questionnaire and secondary sources. Three sugarcane mills situated in São Paulo state and a palm mill located in Para state were surveyed. Results showed a 164% increase in energy balance for the joint production system in comparison to the traditional system. Besides this, the joint production system demonstrated a 24% GHG emission reduction. For ethanol production by molasses, the energy balance was up to 59% and 162% higher in scenarios 1 and 2, respectively, which differ each other through of the boiler that was utilized. For GHG emission, the reduction can reach 91%. The land use change identify an average ecosystem carbon payback time for Cerrado, Cerradão and Degraded Grassland of 5, 10, and -5 years, respectively. In conclusion, the joint production system of sugarcane ethanol and palm biodiesel presents an improvement in energy balance, GHG emissions and land use change impacts in comparison to the traditional ethanol system.

Keyword: Biofuels joint production system. Ethanol. Biodiesel. Life cycle assessment.

LISTA DE SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto Ambiental do Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATR	Açúcar Total Recuperável
BEN	Balanço Energético Nacional
CARB	<i>California Air Resources Board</i>
CBV	Ciclo de Vida do Biodiesel de dendê
CFF	Cachos de Fruto Fresco
CFV	Cachos de Fruto Vazio
CPO	Óleo de palma cru (Crude Palm Oil, sigla em inglês)
CVE	Ciclo de Vida do Etanol de cana-de-açúcar
ECPT	<i>Ecosystem Carbon Payback Time</i>
EER	Eficiência em Energia Renovável
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUEF	Eficiência da Utilização de Energia Fóssil
FE	Fator de Emissão
GEE	Gases de Efeito Estufa
GREET	<i>Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation</i>
	Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential, sigla em inglês)
GWP	
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IE	Intensidade Energética
IEE	Indicador de Eficiência Energética
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LUC	<i>Land Use Change</i>
MUAI	Miniusinas de Alcool Integrada
NER	Razão de Energia Líquida (Net Energy Ratio, sigla em inglês)
PCI	Poder Calorífico Inferior
POME	<i>Palm Oil Mill Effluent</i>
SAC	Serviço de Atendimento ao Consumidor
SAPI	Sistema Agroindustrial de Produção Integrada
SIEB	Sistema Integrado Etanol-Biodiesel
STEC	Sistema Tradicional Etanol de cana-de-açúcar

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Evolução da produtividade de cachos de fruto fresco.....	33
Tabela 2. Estoque de carbono no solo para diferentes ecossistemas.	43
Tabela 3. Estoque de carbono na biomassa acima do solo para diferentes ecossistemas.	43
Tabela 4. Estoque de carbono no solo e na biomassa para a cultura do dendê.....	43
Tabela 5. Capacidade operacional e consumo específico dos equipamentos utilizados para a colheita da cana-de-açúcar.	54
Tabela 6. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas aos tratores.....	57
Tabela 7. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas às colhedoras e transbordo.	58
Tabela 8. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas à carregadora.....	59
Tabela 9. Considerações para cálculo de energia e emissões incorporadas ao reboque de Julieta.	59
Tabela 10. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões dos implementos.	60
Tabela 11. Considerações adotadas para a aplicação de vinhaça por aspersão (canal) e caminho.	60
Tabela 12. Demanda energética e emissões de gases de efeito estufa para a produção de equipamentos e construção civil de uma usina típica de etanol de cana-de-açúcar.....	63
Tabela 13. Fator de intensidade energética e emissões de GEE para o cimento, aço bruto e aço inoxidável.....	64
Tabela 14. Emissões de GEE para a geração de energia a partir de biomassa.	64
Tabela 15. Emissões de GEE atribuídas à queima do bagaço.	65
Tabela 16. Considerações para a geração de energia a partir da biomassa.....	66
Tabela 17. Produtividade média da palma de dendê.....	68
Tabela 18 - Composição em massa dos cachos de fruto fresco.	69

Tabela 19. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas ao caminhão.	72
Tabela 20. Considerações adotadas para cálculo da demanda energética e emissões de GEE para a indústria de biodiesel.....	75
Tabela 21. Valores e considerações adotados para cálculo de energia disponível nas cascas e fibras.....	77
Tabela 22. Parâmetro adotados para a alocação das emissões de GEE e entrada de energia ..	84
Tabela 23. Taxa de aplicação dos insumos agrícolas e vinhaça.	90
Tabela 24. Produtividade da cana-de-açúcar, etanol e coprodutos.	90
Tabela 25. Consumo de diesel e biodiesel na etapa de tratos culturais.	91
Tabela 26. Capacidade operacional e consumo específicos de diesel para a etapa de colheita.	92
Tabela 27. Consumo de diesel e biodiesel total para a etapa de colheita.	92
Tabela 28. Considerações e consumo de diesel e biodiesel para o transporte da cana-de-açúcar.	93
Tabela 29. Consumo total de diesel e biodiesel para a etapa de disposição dos coprodutos...	93
Tabela 30. Inventário da demanda energética e emissões de GEE dos implementos.....	94
Tabela 31. Inventário da demanda energética para os tratores	95
Tabela 32. Inventário das emissões de GEE para os tratores.....	95
Tabela 33. Inventário da demanda energética para a fabricação e manutenção dos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras.	96
Tabela 34. Inventário das emissões de GEE para a fabricação e manutenção dos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras.	97
Tabela 35. Taxa de consumo, IE e emissões de GEE dos insumos industriais.	97
Tabela 36. Demanda energética e inventário de emissões de GEE para os equipamentos e construção industrial.	98
Tabela 37. Energia de entrada para os sistemas tradicional e integrado de produção de etanol de cana-de-açúcar.....	102

Tabela 38. Energia de saída para os sistemas tradicional e integrado de etanol de cana-de-açúcar.	103
Tabela 39. Saída de energia do ciclo de vida do biodiesel de dendê.	104
Tabela 40. Resultado final de razão de energia líquida e eficiência em energia renovável... ..	105
Tabela 41. Emissões finais do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar para os sistemas tradicional e integrado.....	110
Tabela 42. Emissões de GEE devido à mudança no uso do solo.....	112
Tabela 43. Emissões evitadas devido ao excedente de energia elétrica do sistema de cogeração de biomassa.	119
Tabela 44. Comparativo de culturas energéticas quanto ao consumo de água de irrigação. .	121

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Demanda energética para os sistemas tradicional e integrado de etanol de cana-de-açúcar.	101
Gráfico 2. Razão de energia líquida.....	106
Gráfico 3. Emissões de GEE atribuídas ao consumo de combustível no ciclo de vida para os sistemas tradicional e integrado.	109
Gráfico 4. Tempo de retorno de carbono para o ecossistema, por bioma.....	113
Gráfico 5. Variação de NER para o cenário 1 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.	114
Gráfico 6. Variação de NER para o cenário 2 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.	115
Gráfico 7. Balanço de emissões de GEE para o cenário 1 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.	116
Gráfico 8. Balanço de emissões de GEE para o cenário 2 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.	116
Gráfico 9. Comparativo de emissões de GEE entre os biocombustíveis avaliados e os combustíveis fósseis.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma representativo do sistema integrado de produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê.....	19
Figura 2. Fluxograma da produção do açúcar e do etanol de cana-de-açúcar.	28
Figura 3. Palma de dendê.....	32
Figura 4. Fluxograma do processo de produção do biodiesel de dendê.	35
Figura 5. Fases de uma ACV e relações entre as etapas.	44
Figura 6. Subsistemas agrícolas considerados para a avaliação do ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar.....	47
Figura 7. Subsistemas industriais considerados para a avaliação do ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar.....	47
Figura 8. Subsistemas agrícolas considerados para a avaliação do ciclo de vida do biodiesel de dendê.	67
Figura 9. Subsistemas industriais considerados para a avaliação do ciclo de vida do biodiesel de dendê.	67
Figura 10. Relação de áreas de palma de dendê e de cana-de-açúcar para atender à demanda de biodiesel no ciclo de vida do sistema integrado de produção.	120

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
3. PROPOSTA DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE BIOCOMBUSTÍVEIS	18
3.1. JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	19
4. BIOCOMBUSTÍVEIS.....	20
4.1. ROTAS DE PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS	20
4.2. BIOCOMBUSTÍVEIS E A SUSTENTABILIDADE.....	21
4.3. ETANOL	22
4.4. BIODIESEL.....	23
5. ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	25
5.1. CADEIA PRODUTIVA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR	26
5.1.1. Etapas agrícolas da cana-de-açúcar.....	26
5.1.2. Etapas industriais	28
6. BIODIESEL DE DENDÊ.....	32
6.1. CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DE DENDÊ	33
6.1.1. Etapas agrícolas da palma de dendê.....	33
6.1.2. Etapas industriais	35
7. BALANÇO DE ENERGIA	38
8. EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE).....	40
8.1. EMISSÃO DE N ₂ O	41
8.2. MUDANÇA NO USO DO SOLO.....	41
9. METODOLOGIA.....	44
9.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	44
a. Definição do objetivo e do escopo	44
b. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)	45
c. Avaliação de impacto ambiental do ciclo de vida (AICV)	45
d. Interpretação dos resultados.....	45
9.2. BALANÇO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE DO CICLO DE VIDA	46
9.2.1. Sistema etanol de cana-de-açúcar	46
9.2.2. Sistema biodiesel de dendê	66

9.3.	INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	77
9.3.1.	Razão de energia líquida (NER)	77
9.3.2.	Eficiência em energia renovável (EER).....	78
9.4.	EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	78
9.5.	EMISSIONES DE GEE DEVIDO À MUDANÇA NO USO DO SOLO	79
9.5.1.	Tempo de retorno de carbono para o ecossistema (ECPT).....	80
9.6.	SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS	81
9.7.	ÁREA DE PALMA REQUERIDA PARA SUPRIR A DEMANDA DE COMBUSTÍVEL	82
9.8.	ALOCÇÃO	82
9.9.	LOCAL DE ESTUDO	85
9.10.	FATORES DE EMISSÃO DE GEE E FATORES DE INTENSIDADE ENERGÉTICA.....	85
10.	RESULTADOS.....	86
10.1.	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DO ESTUDO DE ACV.....	86
10.2.	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO ESTUDO DE ACV	86
10.3.	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO ETANOL HIDRATADO DE CANA-DE-AÇÚCAR	89
10.3.1.	Insumos agrícolas.....	90
10.3.2.	Consumo de combustível	91
10.3.3.	Máquinas e implementos agrícolas	93
10.3.4.	Insumos industriais	97
10.3.5.	Equipamentos e construção industrial.....	97
10.4.	AVLIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA	98
10.4.1.	Balanço de energia	98
10.4.2.	Emissiones de gases de efeito estufa.....	106
10.4.3.	Emissiones de GEE devido à mudança no uso do solo.....	111
10.4.4.	Aplicação da metodologia de alocação	113
10.4.5.	Emissiones evitadas com a substituição do combustível fóssil pelos biocombustíveis em estudo.....	117
10.4.6.	Emissiones evitadas com a geração de energia elétrica a partir do coproduto	118
10.5.	ÁREA DE PALMA REQUERIDA PARA SUPRIR A DEMANDA DE COMBUSTÍVEL	119
10.6.	CAPACIDADE INDUSTRIAL DA PLANTA DE BIODIESEL DE DENDÊ.....	120
10.7.	DEMANDA DE ÁGUA DE IRRIGAÇÃO PARA O DENDÊ.....	120
11.	CONCLUSÃO	122
12.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124

1. INTRODUÇÃO

O incentivo ao uso de fontes renováveis de energia tem sido destaque em diversas políticas públicas, fundamentadas na diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e na redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE).

O Proálcool (Programa Nacional do Alcool), criado em 1975 no Brasil, foi o marco da energia renovável no país. O incentivo para produção desse combustível teve como objetivo reduzir a importação de petróleo e, consequentemente, a dependência externa. Hoje, o país está entre os maiores produtores de etanol do mundo, atrás somente dos EUA. Juntos, detêm 72% de toda a produção mundial de etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar e do milho, respectivamente (EIA, 2009a; UNICA, 2009).

Em 2002, surgiu o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) com o objetivo de diversificação da matriz energética brasileira. Coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estabelece a contratação de 3.300 MW de energia, distribuída igualmente entre as fontes eólica, de biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (MME, 2002).

De acordo com o Balanço Energético Nacional - BEN (Brasil, 2010), as fontes renováveis foram responsáveis por 47,3% da oferta energética no país, em 2009. A maior contribuição foi atribuída aos produtos da cana-de-açúcar que representaram 18,1% da matriz energética nacional, superior à energia hidráulica (15,3%).

Em 2004, foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), que objetiva a implementação de forma sustentável, tanto técnica quanto econômica, da produção e uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda (Brasil, 2004).

Para Hoekman (2009), existem muitos benefícios que podem surgir com o uso de biocombustíveis, tal como segurança energética, econômica e ambiental. No entanto, enfatiza que muitos desafios são necessários para alcançar esses benefícios, tal como suprimento da demanda doméstica, distribuição de recursos, preços estáveis, aumento do desenvolvimento rural, criação de políticas de uso de solo e água, critérios para reduzir a emissão de GEE, redução no uso do petróleo, dentre outros.

Para Sheehan et al. (1998), quando o uso de energia fóssil para produzir um determinado combustível for superior à energia disponibilizada pelo mesmo, indica que o combustível é totalmente não renovável, o que implica que as entradas de energia fóssil associadas ao seu ciclo de

vida são superiores ao conteúdo energético a ser fornecido. Dessa forma, um combustível completamente renovável não requereria energia fóssil.

Nesse sentido, a análise energética e ambiental é importante para quantificar a renovabilidade de um combustível; identificar os locais de maior impacto ambiental, tal como a emissão de poluentes para a atmosfera; identificar as etapas do processo que possuem o maior consumo de energia e materiais e, através disso, propor soluções para melhorar a sustentabilidade da cadeia de produção.

Com esse enfoque, surgiram, na década de 60, estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), motivados pela crise do petróleo que levou ao questionamento sobre os limites da extração de recursos naturais. Os estudos se iniciaram com o objetivo de calcular o consumo de energia (*energy analysis*). A partir de 1990, os estudos de ACV se intensificaram, com maior ênfase em relação ao meio ambiente, e se impulsionaram com o surgimento da série de normas ISO 14.040 (Coltro, 2007).

Além disso, a diversificação e otimização dos sistemas agropecuários são importantes para aprimorar a sustentabilidade na produção de energia e alimentos. Em 2008, foi lançado o Programa Nacional "Sistema Agropecuário de Produção Integrada –SAPI". O Programa, com enfoque somente na integração de alimentos, tem por objetivo transformar os modelos tradicionais de produção em modelos sustentáveis (econômico, ambiental e social), bem como garantir a rastreabilidade de todo o processo produtivo e a segurança dos alimentos (Brasil, 2008).

Ometto et al. (2002), através de uma análise emergética, estudaram um sistema integrado agroindustrial com a produção de álcool, energia elétrica e alimento, denominado Miniúsinas de Álcool Integrada (MUAI). As atividades do MUAI incluem a produção de cana-de-açúcar, sorgo sacarino, criação de gado, para corte e leite, e produtos frutícolas. Identificaram que esse sistema agroindustrial tem potencial de proporcionar o desenvolvimento rural regional por possuir, entre outras vantagens, alta renovabilidade e sustentabilidade.

Ortega et al. (2009), também a partir da análise emergética, identificaram que a produção integrada de alimentos (gado, hortaliças e frutas), energia (etanol de cana-de-açúcar) e serviços ambientais (mata ciliar e plantio florestal) oferece um melhor desempenho energético e ambiental quando comparado à produção tradicional de etanol de cana-de-açúcar.

Por fim, verifica-se a necessidade de estudos que procurem demonstrar e comparar alternativas de produção agroindustrial, bem como propor melhorias para o sistema produtivo de forma a aprimorar as condições sociais, reduzir impactos ambientais, otimizar o uso de subprodutos e identificar as perdas no sistema, contribuindo para a promoção da eficiência energética.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é comparar, por meio de indicadores ambientais, o sistema tradicional brasileiro de etanol de cana-de-açúcar com um sistema integrado de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê.

Como objetivos específicos para a comparação desses dois modelos de produção, têm-se:

- ✓ Avaliar a redução do uso de combustível fóssil com a implantação do sistema integrado;
- ✓ Estimar o balanço energético a partir da aplicação de indicadores de eficiência energética (IEE);
- ✓ Estimar a redução das emissões de gases de efeito estufa;
- ✓ Avaliar o tempo necessário para o re-equilíbrio do estoque de carbono devido ao uso de biocombustíveis e à substituição dos biomas de Cerrado, Cerradão e Pastagem Degradada pelas culturas energéticas.

3. PROPOSTA DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE BIOCOMBUSTÍVEIS

A integração proposta neste trabalho consiste na produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê¹. A Figura 1 apresenta o escopo dessa produção integrada, que envolve:

1. Utilização dos coprodutos vinhaça e torta de filtro, resultantes do processamento da cana-de-açúcar, para irrigação e adubação orgânica da lavoura.
2. Utilização dos coprodutos POME e cachos vazios, resultantes do processamento dos frutos de dendê (CFF), para irrigação e adubação orgânica da lavoura. Devido às necessidades hídricas da cultura de dendê, o cultivo em região de Cerrado necessita de irrigação complementar.
 - ✓ Seu desenvolvimento em bioma de Cerrado é objetivo de um experimento conduzido pela Embrapa através da utilização de técnicas de irrigação (Azevedo et al., 2008), cujos resultados têm sido motivadores (informação pessoal²).
3. Utilização dos coprodutos bagaço de cana-de-açúcar e cascas e fibras do CFF na geração de energia elétrica e vapor, em sistema de cogeração, para suprir a demanda por energia das etapas industriais e agrícolas (irrigação).
4. Integração através do uso do etanol de cana-de-açúcar, produzido no próprio sistema, para a transesterificação do óleo de dendê (rota etílica) para a produção de biodiesel.
5. Integração através da substituição total do diesel empregado nas etapas de transporte, colheita e tratos culturais, para ambas as culturas, pelo biodiesel de dendê produzido dentro do próprio sistema. Não há a necessidade de substituir o motor dos veículos.

Os produtos resultantes do sistema integrado envolvem o etanol de cana-de-açúcar, a eletricidade excedente e os coprodutos glicerina, óleo de palmiste e torta de palmiste.

- ✓ *Observação 1:* o biodiesel de dendê é totalmente consumido dentro do sistema.
- ✓ *Observação 2:* o conhecimento dos produtos de saída é importante para identificar a alocação das emissões de GEE e consumo de energia no sistema.

¹ Uma tentativa inicial, ainda em aprimoramento, de produção integrada de biocombustíveis pode ser encontrada na Usina Barralcool (Barra do Bugres, MT), que passou a produzir etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de soja de forma semi-integrada.

² Informação cedida pelo Dr. Juscelino Antônio de Azevedo, pesquisador Embrapa Cerrados (por telefone em setembro, 2008).

4. BIOCOMBUSTÍVEIS

O termo biocombustíveis se refere aos combustíveis líquidos ou gasosos produzidos a partir de biomassa, destinados, principalmente, ao setor de transportes. Os biocombustíveis líquidos incluem o metanol, etanol, butanol e biodiesel, os quais podem ser usados em veículos, locomotivas ou geração elétrica em motores, turbinas ou células a combustível. Os biocombustíveis gasosos compreendem o hidrogênio e o metano (Demirbas, 2008).

4.1. Rotas de produção de biocombustíveis

Existem diferentes fontes de biomassa para a obtenção de biocombustíveis, tais como plantas oleaginosas (macaúba, girassol, colza, soja, dendê, pinhão-manso, algas, buriti); cereais (milho, trigo, cevada); produtos agrícolas com presença de açúcar (beterraba doce, cana-de-açúcar, batata-doce); resíduos agrícolas e florestais; resíduos orgânicos industriais e domésticos; gordura animal e óleo de fritura usado (Hoekman, 2009; Malça & Freire, 2006; Malça et al., 2003).

A conversão da biomassa em biocombustíveis pode ser realizada através de diferentes rotas tecnológicas. Dentre elas, as seguintes rotas têm sido foco de pesquisas científicas:

a) Conversão termoquímica:

- i. Gaseificação: conversão da biomassa em gás de síntese através de altas temperaturas e em ambientes livre de oxigênio. O gás combustível gerado pode ser queimado em *boilers* convencionais ou em turbinas a gás para geração de eletricidade. Além do gás de síntese, a tecnologia pode produzir combustível para transporte como hidrogênio, metanol, diesel pelo processo de *Fischer-Tropsch* e DiMetilEter (DME) (Faaij, 2008; Smeets et al., 2008).
- ii. Pirólise: consiste na conversão da biomassa, sob ausência de oxigênio e a altas temperaturas, em frações de combustível líquido, gasoso e sólido. A fração de óleo, denominada bio-óleo, pode ser utilizada em motores e turbinas a combustível (Smeets, 2008).

b) Conversão bioquímica:

- i. Transesterificação: através da utilização de um álcool e catalisador é possível transformar óleos vegetais ou gorduras animais em biodiesel. Para os óleos vegetais, é necessária a conversão mecânica, que se caracteriza pela extração do óleo, antes da transesterificação (Smeets, 2008).

- ii. Fermentação: refere-se à conversão de amido ou açúcares em etanol, precedido por uma etapa de destilação (Smeets, 2008). O etanol também pode ser produzido por processo de hidrólise onde a biomassa lignocelulósica é convertida em açúcar, seguida pela fermentação (Faaij, 2008).

4.2. Biocombustíveis e a sustentabilidade

Estatísticas da *Energy Information Administration* (EIA) revelaram que, em 2007, a demanda mundial por combustível líquido derivado do petróleo foi de 84 milhões de barris por dia³. Projeções para 2030 apontam para um aumento de 100% no consumo de energia renovável e uma redução de 39% no uso de derivados fósseis (EIA, 2009c).

Em 2008, a produção mundial de biodiesel foi de 288 mil barris por dia, um incremento de 52% em relação a 2007. Os maiores produtores do mundo e da América Latina foram a Alemanha e Brasil, respectivamente (EIA, 2009c).

A produção mundial de etanol, em 2008, foi de 1,2 milhões de barris por dia, o que representa um incremento de 31% em relação a 2007, com participação atual da América Latina de aproximadamente 41% (EIA, 2009b).

Embora cenários desse tipo estejam relacionados com fatores como independência energética, estratégia política, desenvolvimento regional, relações econômicas, dentre outros, ele também é reflexo do incentivo ao uso de alternativas de energia que sejam mais sustentáveis.

No entanto, essa sustentabilidade está vinculada a diversos fatores amplamente discutidos na literatura (Nassar et al., 2008; Searchinger et al., 2008; Gerbens-Leenes et al., 2009; Souza et al., 2010). Aspectos como emissões de gases de efeito estufa, uso do solo e da água, biodiversidade, balanço de energia, geração de emprego, dentre outros, fazem parte dessas pesquisas cujo objetivo é tentar alcançar um equilíbrio ou, ao menos, identificar fatores chaves que necessitem de aprimoramento.

Para essa avaliação, diversos estudos têm desenvolvido indicadores de sustentabilidade que permitam um diagnóstico conjunto de aspectos (Gibbs et al. 2008; Malça & Freire 2006; Amaral et al., 2008). No entanto, é importante que estudos desse tipo sejam sempre comparativos, a fim de permitir identificar a alternativa mais adequada de produção de energia (Wang et al., 2007; CARB, 2009; EPA, 2010; Souza et al., 2010).

³ 1 bep (barril equivalente de petróleo) = 6119, 32 MJ

Disponível em http://tonto.eia.doe.gov/kids/energy.cfm?page=about_energy_conversion_calculator-basics.
<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>

4.3. Etanol

O etanol, ou álcool etílico, consiste em um composto orgânico oxigenado de fórmula química C_2H_5OH . Sua produção é dada a partir da fermentação de produtos agrícolas como cana-de-açúcar, milho, trigo, beterraba, dentre outros (Andreoli & Souza, 2006; Goldemberg et al., 2008).

Em 1975, foi instituído, através do Decreto Federal n.º 76.593, o Programa Nacional do Álcool – Proálcool (Brasil, 1975). O incentivo para o uso de uma fonte de energia derivada da biomassa foi motivado com o primeiro choque do petróleo em 1973, que abriu espaço para a produção de álcool a partir da cana-de-açúcar. Em um primeiro momento, o Proálcool teve por base implantar o etanol como aditivo à gasolina e, em sua segunda fase, iniciada em 1979, deu-se início à utilização de etanol puro nos motores (E100) (Goldemberg et al., 2008; Silva & Sakatsume, 1974; Vieira Junior et al., 2008).

No Brasil, o álcool como combustível é utilizado na forma hidratada para carros a álcool ou *flex fuel*, e como álcool anidro adicionado à gasolina na proporção de até 25% (Brasil, 2007). De acordo com o regulamento técnico n.º 7 da ANP, com base na ABNT/NBR 5992, o teor alcoólico no álcool anidro deve ser, no mínimo, 99,3º INPM (% de álcool em peso ou grau alcoólico), e para o hidratado, entre 92,6 a 93,8º INPM (ANP, 2005).

Efeitos importantes do uso do álcool (hidratado ou anidro) como combustível foram a eliminação do chumbo na gasolina; redução das emissões de monóxido de carbono (gás de efeito estufa; eliminação do enxofre e material particulado com carbono e sulfato; redução na emissão e toxicidade de compostos orgânicos voláteis (Macedo & Carvalho, 2005; BNDES, 2008).

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, responsável por 37% (24 milhões de m^3) de toda a produção mundial (65,6 milhões de m^3) (UNICA, 2009; RFA, 2008). Em 2008, exportou cerca de 5,1 milhões de m^3 de etanol, 35% da produção nacional, sendo quase 60% dessa exportação foi destinada aos Estados Unidos e Países Baixos. O preço médio de exportação foi de US\$ 470,00 por m^3 de etanol (SECEX, 2009).

Segundo dados do CEPEA e ESALQ (2009), o preço líquido médio por litro, em 2009, do etanol anidro combustível recebido pelos produtores, sem considerar frete e impostos, foi de R\$ 0,87, sendo o menor valor R\$ 0,65, e o maior valor R\$ 1,21. Para o litro do etanol hidratado combustível, a média, para 2009, foi de R\$ 0,76, sendo o menor preço R\$ 0,56, e o maior R\$ 1,10.

Em relação ao preço médio do etanol hidratado, pago pelos consumidores brasileiros foi de R\$ 1,78, em 2009. O menor preço foi encontrado no estado de São Paulo, R\$ 1,16, e o maior preço no estado de Roraima, R\$ 2,16 (ANP, 2009).

Com o surgimento do motor *flex* em 2003, a venda de carros com essa tecnologia tem crescimento expressivamente, ano após ano. Em 2009, a venda de carros *flex* foi de 2,5 milhões de veículos, contra 2 e 2,3 milhões em 2007 e 2008, respectivamente (ANFAVEA, 2009).

4.4. Biodiesel

O biodiesel é produzido a partir da reação de um óleo vegetal, ou gordura animal, com álcool metílico ou álcool etílico na presença de um catalisador. Em geral, o catalisador utilizado é o hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH). Esse processo é denominado de transesterificação e possui, como produtos finais, o biodiesel e a glicerina (Hoekman, 2009; Knothe et al., 2006).

A escolha pelo tipo de álcool a ser utilizado no processo de transesterificação tem sido realizada com base em razões econômicas e de processo. A reação por rota metílica é mais barata em função da cadeia mais curta e maior polaridade do metanol em relação ao etanol. Quanto maior a polaridade, maior a facilidade na separação entre os ésteres e a glicerina. No entanto, o uso do etanol (rota etílica) apresenta menor toxicidade, além de ser um combustível renovável (Demirbas, 2008).

Por se tratar de um combustível renovável, adicionado ao potencial brasileiro de diversidades de matérias-primas, em 2004, foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), que objetiva a implementação de forma sustentável, tanto técnica quanto econômica, da produção e uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda (Brasil, 2004).

Com a Lei Federal n.º 11.097/05, o uso de 2% de biodiesel adicionado ao diesel (B2) tornou-se obrigatório desde janeiro de 2008. Hoje, essa adição é de 5% (B5) e representou, no último leilão (fevereiro de 2010), 565 mil metros cúbicos de biodiesel para abastecer o mercado (ANP, 2010a).

O preço médio de comercialização do biodiesel de dendê, no Brasil, de acordo com o último leilão da ANP (março, 2010), ficou em torno de R\$ 2,24/l (ANP, 2010a).

São mais de 60 plantas industriais autorizadas pela ANP para a produção de biodiesel, que juntas somam uma capacidade diária de produção de 13.220 m³. Hoje, essa produção é praticamente toda proveniente da soja, 83%; o sebo bovino e o algodão respondem por 12% e por 2,4%, respectivamente. O óleo de palma representa somente 0,28% da produção total de biodiesel (ANP, 2010b).

A Empresa Vale possui um projeto em implantação, juntamente com a Biopalma da Amazônia S.A., para a produção de biodiesel a partir de dendê, com o objetivo de alimentar, até

2014, todas as suas locomotivas (total de 216) do sistema Carajás, além de máquinas e equipamentos de grande porte das minas, com B20 (20% de biodiesel adicionado ao diesel). A estimativa de consumo é de 160 mil toneladas de biodiesel anuais ⁴.

⁴ Informações disponíveis em: <http://www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=702>

5. ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma planta semiperene, da família das *poaceas*, de metabolismo C4. Sua produção é crescente com o aumento da radiação e é muito eficiente na fixação de CO₂, podendo armazenar cerca de 6% da radiação solar incidente em biomassa (Zhu et al., 2008).

Souza et al. (2008) realizaram experimento com cana-de-açúcar sob condições de alta concentração de CO₂ e observaram que há um aumento nas taxas fotossintéticas com consequente aumento de biomassa, em até 60%, adicionado a um aumento no teor de açúcares. Além disso, as plantas apresentaram um acréscimo no teor de fibras, um pequeno aumento de celulose, colmos mais longos e um maior número de folhas. No entanto, os autores alertam que esses resultados não tiveram por objetivo estimular a supressão de florestas, uma vez que esse carbono sequestrado pela cana-de-açúcar retorna novamente para a atmosfera com a transformação da matéria-prima em combustível.

A parte aérea da cana-de-açúcar é composta pelo colmo, onde se concentra a sacarose, e pelas folhas e pontas, que também podem ser parcialmente retiradas do campo para queima em caldeiras. O colmo é composto por 65 a 75% de água, 8 a 14% de fibra, 10 a 18% de açúcares. As folhas e pontas e o bagaço somam 35 toneladas (matéria seca) por hectare (BNDES; CGEE, 2008).

Cada hectare tem capacidade de produzir de 50 a 100 t de cana-de-açúcar, 6 a 7,5 mil litros de etanol, 12 t de bagaço (220 GJ – base seca) e 72 a 90 mil litros de vinhaça. Através de sistemas de cogeração, a queima do bagaço alimenta a demanda de energia das usinas sucroalcooleiras, fazendo com que os custos energéticos da etapa industrial sejam praticamente todos assumidos por esse coproduto (Hassuani et al., 2005; Macedo & Carvalho, 2005).

A cana-de-açúcar, para um adequado desenvolvimento, exige um clima que possua duas estações bem diferentes: uma quente e úmida, que favoreça a germinação, a formação dos brotos e o desenvolvimento vegetativo, seguida de uma estação fria e seca, a fim de permitir a maturação e acúmulo de sacarose (BNDES & CGEE; 2008).

A unidade de medida para a venda da cana-de-açúcar é a ATR (açúcar total recuperável) contida em cada tonelada de cana. A safra 2009/2010, no Estado de São Paulo, fechou o ATR a um valor médio mensal de R\$ 0,35/ kg ATR (Unica & Orplana, 2010).

5.1. Cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar

Nesta seção, serão apresentadas todas as etapas necessárias para a produção de etanol, desde as etapas agrícolas para a produção da cana-de-açúcar até a produção industrial do etanol.

5.1.1. Etapas agrícolas da cana-de-açúcar

Nesta subseção serão apresentadas as etapas agrícolas para a produção da cana-de-açúcar no Brasil.

5.1.1.1. Ciclo da cana-de-açúcar

Em geral, o ciclo da cana-de-açúcar tem a duração de seis anos, sendo o primeiro estágio denominado cana-planta, com duração entre 12 a 18 meses, seguido de quatro anos de cana-soca, resultantes da rebrota, e finalizado com uma reforma de canavial a fim de retomar boas produtividades. Na área de reforma, o solo pode ficar em descanso ou receber uma cultura de ciclo curto, para então receber novamente a cana-planta (Macedo et al., 2008). Hoje, devido a novas variedades de cana-de-açúcar, muitos produtores chegam a realizar até 10 cortes consecutivos (informação pessoal)⁵.

5.1.1.2. Plantio

O plantio da cana-de-açúcar pode ocorrer de forma manual ou mecanizada, através de plantio direto ou convencional. No plantio direto, não há necessidade da retirada das palhas e a inserção das mudas de cana-de-açúcar é realizada através de uma operação de sulcagem. No convencional, as palhas são retiradas para realização da aração e da gradagem, seguida por sulcagem (Ometto, 2000). Em média, são utilizadas, para cada hectare, 12 toneladas de cana-de-açúcar em plantios manuais e 16 toneladas de cana-de-açúcar em plantios mecanizados (informação pessoal)⁵.

5.1.1.3. Demanda por fertilizantes

Segundo BNDES e CGEE (2008), a demanda por fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar é pequena quando comparada a outras culturas. Justifica-se pelo uso dos coprodutos, tais como vinhaça e torta de filtro, como adubo orgânico. Em locais onde há a fertirrigação da vinhaça, todo o potássio é suprido pelo uso desse coproduto.

⁵ Informação cedida em visita a campo (fevereiro de 2010).

A aplicação da vinhaça e torta de filtro, para as condições médias brasileiras, é capaz de reduzir a demanda por fósforo e potássio em 77% e 53%, respectivamente, sem trazer alterações à produtividade da cana-de-açúcar (CGEE, 2005).

Além das vantagens relacionadas às reduções de fertilizantes minerais, o uso desses coprodutos aumenta a capacidade de troca iônica no solo, melhora a estrutura e aumenta a capacidade de retenção de água no solo. No entanto, produz efeitos negativos como o aumento do risco de salinização e lixiviação de nutrientes (Smeets, 2008).

De forma a evitar danos ao meio ambiente devido à aplicação da vinhaça no solo, em 2005, a Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo divulgou uma norma técnica (norma P4.231/05) sobre os critérios e procedimentos para aplicação, movimentação e disposição da vinhaça em solo agrícola. Essa norma estabelece os locais passíveis de aplicação e a dose máxima de 185 kg de K₂O por hectare (BNDES & CGEE, 2008).

5.1.1.4. Colheita

A etapa de colheita da cana-de-açúcar pode ser realizada de forma manual ou mecânica. Em geral, em práticas manuais a cana-de-açúcar é previamente queimada para facilitar o manuseio dos cortadores e repelir animais peçonhentos. No entanto, a queimada destrói a matéria orgânica, danifica a estrutura do solo, favorece a erosão, e emite gases danosos como CO, CH₄, outros compostos orgânicos e material particulado, causando um aumento da concentração de ozônio troposférico nas proximidades (Goldemberg et al., 2008).

A colheita da cana-de-açúcar crua, realizada mecanicamente, evita a danificação dos tecidos celulares do colmo da planta. Esse tipo de colheita vem aumentando em função da proibição gradativa da queimada da palha da cana-de-açúcar (Lei n. 11.241/02), cujo objetivo é eliminar 100% da queimada, até 2021, em áreas mecanizáveis, e até 2031 em áreas não mecanizáveis (São Paulo, 2002).

5.1.1.5. Etapa de transporte

Após o corte da cana-de-açúcar, essa deve ser encaminhada prontamente à unidade industrial para evitar a perda de sacarose. No Brasil, a cana é transportada, em geral, por caminhões (simples, duplo, treminhão, rodotrem) com capacidade de carga que varia entre 15 e 60 toneladas (BNDES & CGEE, 2008). Essa etapa se caracteriza por uma elevada demanda energética, devido ao alto consumo de diesel. De acordo com os dados levantados neste trabalho, esse consumo situa-se em torno de 50 litros de diesel por hectare ou 0,6 litro por tonelada de cana-de-açúcar.

5.1.2. Etapas industriais

Ao chegar à usina, a cana-de-açúcar é descarregada em esteiras onde sensores avaliam a concentração de açúcar (ATR – Açúcar Total Recuperável). Assim, inicia-se a etapa industrial, composta pelas fases a seguir. A Figura 2 ilustra a fluxograma das etapas para a produção do etanol, açúcar e eletricidade.

Figura 2. Fluxograma da produção do açúcar e do etanol de cana-de-açúcar.
Fonte: Seabra (2008).

5.1.2.1. Lavagem da cana-de-açúcar

A lavagem objetiva a retirada de possíveis materiais incorporados ao colmo da planta durante o corte e transporte, tais como terra, areia, palhas, dentre outros. Nessa etapa, é gerada a água de lavagem, que é re-encaminhada para outras fases da etapa industrial (Ometto, 2000).

Em função disso, essa etapa contribui expressivamente para o consumo de água no setor sucroenergético, que pode chegar a 5 m³ por tonelada de cana-de-açúcar processada. No entanto, através de medidas para a redução no consumo de água, levantamento realizado entre 1997 e 2005, é possível uma redução de 5 m³ para 1,83 m³ por tonelada de cana-de-açúcar processada (Carmo, 2008).

Essa etapa não é realizada em cana-de-açúcar picada para impedir perdas de açúcares. Além disso, a cana-de-açúcar colhida crua não retém tanta sujeira no colmo. Dessa forma, diante da tendência de mecanização do campo, haverá uma expressiva redução no uso de água na indústria, impulsionada, ainda, pela incorporação de tecnologias de limpeza a seco (BNDES & CGEE, 2008).

5.1.2.2. Preparo para moagem

Para a moagem, a cana-de-açúcar é encaminhada a um jogo de facas onde os colmos são cortados em pedaços menores a fim de aumentar a eficiência de extração de caldo. Em seguida, os colmos são enviados ao desfibrador. Para cana-de-açúcar picada, a mesma é encaminhada diretamente para o desfibrador. É o desfibrador responsável pelo rendimento na recuperação de açúcar.

5.1.2.3. Extração do caldo

As moendas podem ser alimentadas com o auxílio de um aparelho denominado “bicão” ou com o uso da calha de alimentação forçada, que consiste em sistemas mais modernos. A extração do caldo ocorre sob pressão e rotação de rolos, montados em conjunto de quatro a sete sucessivos ternos de moenda.

Outra tecnologia é a extração do caldo por difusão, onde a cana-de-açúcar picada e desfibrada passa por lavagens com água quente que auxiliam na retirada dos açúcares por lixiviação (BNDES & CGEE, 2008).

É nessa etapa que o caldo, que contém a sacarose, é separado da fibra (bagaço). Durante essa etapa, técnicas como a embebição é utilizada para diluir, com auxílio de água, o caldo remanescente do bagaço de forma a aumentar a extração de sacarose.

5.1.2.4. Tratamento do caldo para produção de etanol e açúcar

O caldo é peneirado e tratado quimicamente, permitindo a coagulação, floculação e a precipitação das impurezas através da decantação. Em tratamentos mais completos, o caldo passa por um processo de calagem, aquecimento e decantação. Após tratamento, o caldo é enviado à etapa

de evaporação para ajuste da concentração de açúcares, resultando no mosto (BNDES & CGEE, 2008).

O lodo resultante do decantador passa por um processo de recuperação de açúcares, através de filtros rotativos, cujo coproduto resultante é a torta de filtro, utilizado como adubo.

As usinas podem trabalhar em três escopos diferentes: a) produção somente de açúcar; b) produção somente de etanol; e c) produção de açúcar e etanol. Dessa forma, é nessa etapa que ocorre a divisão do processo em fluxos que destinam o caldo para a produção de etanol e/ou de açúcar.

Mesmo que a cana-de-açúcar seja totalmente destinada à produção de açúcar, é possível produzir etanol através do coproduto gerado, o melaço ou mel esgotado. Nesse caso, após a etapa de centrifugação do açúcar, o melaço é encaminhado para a etapa de fermentação e posterior produção de etanol. A produção de etanol via melaço rende aproximadamente quatro vezes menos álcool do que via caldo direto (BNDES & CGEE, 2008).

Para a produção de açúcar, o caldo é concentrado em evaporadores e cozedores para que a sacarose seja cristalizada. A sacarose não cristalizada retorna ao processo para recuperar mais açúcar.

5.1.2.5. Fermentação do caldo

A fermentação do caldo, que ocorre em um período de 8 a 12 horas, é realizada em dornas de fermentação através da utilização de leveduras, fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. Como resultado, é gerado o mosto fermentado que possui uma concentração de 7 a 12% de álcool.

No Brasil, predomina a utilização de um processo caracterizado pela recuperação da levedura através da centrifugação e posterior tratamento.

O vinho, resultante desse processo, é encaminhado para a coluna de destilação.

5.1.2.6. Destilação do vinho

Nas colunas de destilação, é recuperado o etanol hidratado com aproximadamente 94° INPM (porcentagem em massa), cerca de 6% de água, em massa. Como coproduto são gerados de 10 a 13 litros de vinhaça por litro de etanol hidratado produzido (BNDES & CGEE, 2008).

5.1.2.7. Desidratação: etanol anidro

A etapa de desidratação acontece quando se deseja a produção de etanol anidro. Nesse caso, o etanol hidratado passa por uma coluna de desidratação onde, com auxílio do ciclohexano, é formado o etanol anidro, 99,7° GL ou 0,4% de água, em volume.

6. BIODIESEL DE DENDÊ

A palma de dendê é uma cultura perene que pode alcançar 26 anos de vida útil média (Agropalma, 2009). O óleo de dendê, bem como os demais coprodutos, é extraído dos cachos de fruto fresco (CFF) (Figura 3).

No processamento dos CFF são gerados 20-21% de óleo de palma, 1,7% de óleo de palmiste, 3,5% de torta de palmiste, 22-23% de cachos de fruto vazio, 12-15% de fibras, 5-7% cascas e 50% de efluente líquido (POME) (Ngan et al., 1993; Embrapa/MAPA, 2000). O somatório da massa é superior a 100% pois, durante o processo industrial, há inserção de água, aumentando a massa de POME.

Os cachos e fibras podem ser queimados para a geração de vapor e eletricidade através de sistemas de cogeração. Cada tonelada de cacho tem capacidade de gerar cerca de 30 kWh de energia e 600 kg de vapor (Embrapa/MAPA, 2000). Esse potencial de geração de energia torna a produção de biodiesel de dendê auto-sustentável energeticamente (Agropalma, 2009).

Figura 3. Palma de dendê.

Fonte: fotografia cedida pela Embrapa Cerrados.

O melhor desenvolvimento do dendezeiro ocorre em regiões tropicais, de clima quente e úmido, com precipitação elevada e bem distribuída ao longo do ano (Embrapa/MAPA, 2000). No entanto, pesquisas da Embrapa Cerrados têm apontado a palma de dendê como opção promissora para o bioma de Cerrado devido sua elevada produtividade e sua característica de ciclo perene⁶. Todavia, em função da distribuição irregular de chuvas nessa região, seu cultivo carece de irrigação na época de seca para que a deficiência hídrica seja eliminada (Azevedo et al., 2008).

⁶ A região de Cerrado Brasileiro possui, aproximadamente, 54 milhões de ha em pastagem, de um total de 205 milhões de ha (Brasil/MMA, 2007).

6.1. Cadeia produtiva do biodiesel de dendê

Nesta seção, serão apresentadas todas as etapas necessárias para a produção do biodiesel de dendê, desde as etapas agrícolas para a produção da palma de dendê até a produção industrial do biodiesel.

6.1.1. Etapas agrícolas da palma de dendê

Nesta subseção, serão apresentadas as etapas agrícolas para a produção da palma de dendê no Brasil.

6.1.1.1. Ciclo do dendê

O dendê destaca-se pelo seu elevado rendimento. Considerada uma das mais produtivas oleaginosas do mundo, pode alcançar 30 toneladas de cachos de fruto fresco (CFF) por hectare.ano (décimo sexto ano) (Agropalma, 2009).

A Tabela 1 demonstra a evolução da produtividade de cachos de fruto fresco ao longo do ciclo de vida da palma de dendê, segundo dados da Agropalma.

Tabela 1. Evolução da produtividade de cachos de fruto fresco.

Idade	t CFF/ha	Idade	t CFF/ha
1º ano	0,00	14º ano	28,00
2º ano	0,00	15º ano	29,00
3º ano	3,00	16º ano	30,00
4º ano	5,00	17º ano	29,00
5º ano	10,00	18º ano	28,00
6º ano	15,00	19º ano	27,00
7º ano	20,00	20º ano	25,00
8º ano	25,00	21º ano	23,00
9º ano	25,00	22º ano	23,00
10º ano	25,00	23º ano	22,00
11º ano	25,00	24º ano	21,00
12º ano	26,00	25º ano	20,00
13º ano	27,00	26º ano	19,00

Fonte: Agropalma (2009).

Durante o período de vida mais produtivo, produz até seis toneladas de óleo/ha.ano, uma produtividade 1,5 vezes superior à do coco e 10 vezes à da soja (Furlan Junior et al., 2006; Lima et al., 2000).

6.1.1.2. Plantio

A produção do dendê inicia-se na etapa de aquisição de sementes, podendo ser pré-aquecidas ou germinadas. Essas são, então, encaminhadas para o pré-viveiro onde ficam de 4 a 6 meses para um adequado desenvolvimento das plântulas. Em seguida, são levadas ao viveiro onde ficam por 6 a 8 meses (Embrapa/MAPA, 2000).

Antes do plantio, o terreno deve ser preparado, bem como a infraestrutura de estradas e drenos. No Brasil, é realizada uma cobertura através da semeadura de uma leguminosa, geralmente a *Pueraria phaseoloides*, cujas vantagens são: controle de erosão, combate às invasoras e às pragas, redução da compactação do solo e melhorias na fertilização nitrogenada (Embrapa/MAPA, 2000; Lima et al., 2000).

Após preparo das mudas e das condições necessárias, essas são plantadas em covas a uma densidade de 136 a 148 plantas/ha. O plantio jovem merece cuidados de vigilância fitossanitária e proteção contra roedores. Além disso, a aplicação dos cachos vazios ao redor do pé da palmeira impede a invasão de outras plantas (Schmidt, 2007).

6.1.1.3. Demanda por fertilizantes

Devido a grandes variações que podem ocorrer para diferentes condições do complexo sistema solo x planta x atmosfera, não é possível determinar com exatidão as exigências nutricionais da planta (Embrapa/MAPA, 2000).

Estudo desenvolvido na Malásia aponta que a utilização dos cachos vazios como fertilizante orgânico pode substituir, em média, 15% do uso de fertilizantes inorgânicos, sendo 14%, 11%, 18% e 12% correspondente ao N, P₂O₅, K₂O e MgO, respectivamente (Wood & Corley, 1991). O mesmo estudo identificou que a aplicação de POME pode substituir 12%, 9%, 10% e 16% dos fertilizantes N, P₂O₅, K₂O e MgO, respectivamente.

6.1.1.4. Colheita

Os primeiros frutos da palmeira se desenvolvem entre o 2º e 3º ano e seguem seu ciclo produtivo por mais 20 a 25 anos (Wicke et al., 2007).

A colheita é realizada manualmente com o uso de ferramentas adequadas e ocorre durante todo o ano. No entanto, a produção é concentrada entre os meses de outubro e janeiro. Os cachos devem ser beneficiados em até 24 horas após a colheita devido à rápida acidificação dos frutos. Por esse motivo, a usina deve ser instalada próximo ao plantio (Lima et al., 2000).

6.1.1.5. Etapa de transporte

Os cachos são transportados até a unidade de processamento com o uso de tratores basculantes, que descarregam os frutos em *containers* acoplados a um caminhão (Embrapa/MAPA, 2000; Lima et al., 2000). A distância média da área de plantio até a unidade é de 40 km (Agropalma, 2009).

6.1.2. Etapas industriais

Nesta subseção serão apresentadas as etapas industriais para a produção do biodiesel de dendê. A Figura 4 ilustra o fluxograma das etapas, onde a destinação apresentada aos coprodutos segue o escopo deste trabalho.

Figura 4. Fluxograma do processo de produção do biodiesel de dendê.

6.1.2.1. Esterilização

A primeira etapa de beneficiamento dos cachos consiste na esterilização, onde esses são submetidos ao aquecimento por contato direto com vapor que permite a inativação das enzimas do fruto, a paralisação do processo de degradação e a facilitação da separação dos frutos em relação aos cachos (Vianna, 2006).

6.1.2.2. Debulhador e digestor

O debulhador separa os frutos do cacho. Os cachos são encaminhados ao campo para serem utilizados como adubo. Os frutos seguem para o digestor onde, com o uso de vapor indireto e braços agitadores, o mesocarpo é rompido e as células oleosas são quebradas para facilitar a extração (Marzullo, 2007). Como resultado, tem-se uma massa de volume reduzido, que segue para a prensa contínua onde o óleo de dendê cru é extraído e encaminhado para o desaerador para a retirada das partículas pesadas e filtragem (Embrapa/MAPA, 2000). Além do óleo cru, a prensagem dá origem a uma torta que contém fibras e nozes. Essa torta segue para a um desfibrador que, por ventilação, separa as fibras das nozes (Embrapa/MAPA, 1995).

As fibras são utilizadas como combustível em caldeiras para a geração de vapor. Parte desse vapor é destinada para a produção de energia elétrica e parte para a etapa de esterilização (Vianna, 2006).

6.1.2.3. Extração do óleo de palmiste

As nozes são encaminhadas ao polidor de cilindros, cuja finalidade é retirar o restante das fibras. As nozes seguem para um secador, para o desprendimento das amêndoas, e depois para uma descascadora centrífuga onde são quebradas, dando origem às cascas, também utilizadas nas caldeiras (Embrapa/MAPA, 1995). As amêndoas seguem para extração do óleo de palmiste, onde são trituradas e prensadas. Da extração de óleo de palmiste é gerada uma torta de alto valor nutricional para alimentação animal (Marzullo, 2007), contendo de 14 a 18% de proteína (Embrapa/MAPA, 1995).

6.1.2.4. Beneficiamento do óleo cru

O beneficiamento do óleo cru é composto pela clarificação, depuração e secagem. Antes da clarificação, o óleo é peneirado e encaminhado a um ciclone para eliminação de impurezas. No

clarificador, há a decantação e separação entre o óleo limpo e a borra (Marzullo, 2007). Na Agropalma, o biodiesel de dendê é produzido somente a partir dessa borra (Agropalma, 2009).

A depuração e secagem consistem em retirar a umidade contida no óleo. Desse processo resulta um efluente líquido denominado POME. O óleo segue para tanques de armazenagem com sistema de aquecimento para impedir a solidificação (Embrapa/MAPA, 1995).

6.1.2.5. Refino e transesterificação

Antes da produção do biodiesel, o óleo precisa passar pela etapa de refino para que a acidez do óleo bruto seja reduzida, ou seja, são eliminados os ácidos graxos livres, resultando em um óleo composto somente de glicerídeos (Marzullo, 2007; Vianna, 2006).

O biodiesel é produzido a partir da reação do óleo cru com álcool metílico ou álcool etílico, na presença de um catalisador. Em geral, o catalisador utilizado é o hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH). Esse processo é denominado de transesterificação e apresenta como produto final o biodiesel e a glicerina (Knothe et al., 2006; Hofman, 2003).

7. BALANÇO DE ENERGIA

O balanço de energia de combustíveis tem sido discutido amplamente em diversos estudos científicos. No geral, o objetivo é demonstrar a quantidade de energia adquirida com o combustível frente ao consumo energético em seu ciclo de vida.

Malça et al. (2003) avaliaram a produção de etanol de beterraba e de trigo na França. Calcularam a eficiência da utilização de energia fóssil (EUEF)⁷ e observaram que o etanol proveniente do trigo é o que apresenta maior renovabilidade, disponibilizando aproximadamente o dobro da energia utilizada no ciclo de vida. Os valores encontrados de EUEF foram 1,84 e 2,05 para o etanol de beterraba e trigo, respectivamente. Para a gasolina, a EUEF é de 0,87.

Malça et al. (2003) também calcularam a relação entre a energia de origem fóssil consumida no ciclo de vida e a energia final disponibilizada pelos biocombustíveis e concluíram que o etanol de trigo é o mais atrativo em termos energético, 0,488 MJ fóssil/MJ disponível, contra 0,543 e 1,15 do etanol de beterraba e gasolina, respectivamente.

Pereira (2008) calculou o balanço energético da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil e obteve 8,2, ou seja, para cada unidade de energia consumida para a produção do etanol, são obtidas 8,2 unidades de energia.

Macedo et al. (2008) calcularam um balanço energético para o etanol brasileiro de 9,3 e 11,6. Este último corresponde a um cenário para 2020, considerando que, além do bagaço, serão utilizadas, também, 40% das pontas e palhas da cana-de-açúcar para a geração de energia.

Em contrapartida, valores menores de balanço energético para o etanol foram encontrados por Andreoli e Souza (2006) e Oliveira et al. (2005), correspondentes a 3,24 e 3,67, respectivamente.

Dois estudos americanos reportaram balanço de energia negativo para o etanol de milho, o que implica em alta emissão de gases de efeito estufa (GEE) e uso de petróleo (Pimentel & Patzek, 2005).

Souza et al. (2010) estimaram o balanço de energia do biodiesel de palma no Brasil e compararam com outros três estudos realizados na Malásia e na Colômbia. O balanço energético encontrado foi de 1:4,8. Concluíram que a maior demanda de energia no ciclo de vida está na fase industrial e que a maior divergência entre os estudos foi encontrada na etapa agrícola. No Brasil, a

⁷ EUEF: quantidade de energia final disponibilizada pelo combustível por unidade de energia de origem fóssil consumida no ciclo de vida.

leguminosa *Pueraria Phaseoloides* é utilizada como cobertura de solo, o que reduz o uso de nitrogênio no solo e favorece o balanço energético.

Yu e Tao (2009) avaliaram o balanço energético da produção de etanol de mandioca no sudeste da China. O estudo avaliou o balanço para três diferentes tipos de alocação: conteúdo de energia, valor de mercado e método de substituição. O balanço energético médio entre esses escopos foi de 1:3,3 MJ_{in}/MJ_{out}. Os autores apontam que melhorias na tecnologia de produção podem favorecer o balanço de energia através do uso de alternativas energéticas como energia solar, eólica, hidráulica ou produção própria de biogás para geração de vapor.

Janulis (2004) avaliou diferentes cenários para a produção de biodiesel de canola com o objetivo de identificar tecnologias que reduzam o *input* energético no ciclo de vida desse biocombustível. Dentre os fatores identificados, apontou para a substituição do metanol pelo etanol no processo de transesterificação do óleo. O autor assinalou que a diferença encontra-se no balanço energético desses álcoois, 0,76 e 1,34 para o metanol e etanol de milho, respectivamente. Além disso, a eficiência de conversão do óleo em biodiesel é maior na rota etílica. Para os diferentes cenários avaliados, o balanço energético do éster etílico variou de 1:1,62 a 1:9,35, e para o éster metílico, a variação foi de 1:1,43 a 1:8,89.

8. EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são medidas em termos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Essa medida permite comparar diferentes GEE com base em seu potencial de contribuição para o efeito estufa, tendo como referência o CO₂. O fator que define essa contribuição é chamado de Potencial de Aquecimento Global (GWP, sigla em inglês) (IPCC, 2006a).

Embora esforços como a 15ª Conferência do Clima das Nações Unidas (COP-15) (dezembro, 2009) não obtiveram os resultados desejados, diversos programas, planos, diretrizes e regulamentos têm sido lançados com o objetivo de reduzir as emissões de carbono, principalmente em relação ao setor de transportes. É possível citar alguns, tais como: *California Low Carbon Fuels Standard*, EUA, Califórnia; *Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program*, EUA, EPA; Plano Nacional sobre Mudança do Clima, Brasil; Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, Brasil; Proálcool, Brasil; Diretiva 2003/87/EC do Parlamento Europeu e do Conselho, Europa, dentre outros.

No Brasil, 75% das emissões de carbono são resultantes do desmatamento (queimadas) (Brasil, 2008). A meta brasileira é reduzir em 25% a área de queimadas até 2010 e em 75% até 2013 (MMA, 2009). A diminuição das queimadas procedentes do desmatamento faz parte do Programa Nacional de Redução e Substituição do Fogo nas Áreas Rurais e Florestais (Pronafogo).

O aumento dos efeitos ocasionados por esses GEE tem tido grande destaque mundial, principalmente focado na redução do uso de combustíveis fósseis. A análise do ciclo de vida de todas as matérias-primas utilizadas no processo produtivo, com base nas emissões equivalentes de carbono, é uma medida essencial para avaliar a sustentabilidade dos biocombustíveis (Nassar et al., 2008).

Gnansounou et al. (2009) avaliaram as influências de fatores como tipo de alocação dos coprodutos, definição dos limites do sistema, unidade funcional, sistema de referência, mudança do uso do solo, dentre outros, sobre as emissões de GEE no ciclo de vida de biocombustíveis. Como caso ilustrativo, utilizaram o etanol de trigo produzido na Suíça. Os resultados demonstraram que, dependendo das combinações de metodologias empregadas e considerações para a mudança no uso do solo, as variações de GEE no ciclo de vida do etanol podem se situar entre -112% a 112%, em comparação com a gasolina, para o mesmo escopo de produção de etanol.

Pacca e Moreira (2009) modelaram a capacidade de neutralização de carbono com a implantação do Proálcool no Brasil, iniciado em 1975. Avaliaram diferentes estoques e fluxos de carbono, incluindo os efeitos da mudança no uso do solo, para uma condição realística e outra

otimista. Esta última inclui as emissões evitadas com a substituição do etanol por gasolina e de combustível fóssil pela eletricidade excedente, bem como a captação do CO₂ emitido durante a fermentação. Para o cenário realístico, as emissões foram neutralizadas em 1995, sendo 2006 o ano de maior mitigação de CO₂, total de 128 t CO₂e/ha. No cenário otimista, as emissões evitadas em 2007 seriam de 390 t CO₂e/ha e a neutralização de carbono ocorreria em 1988.

Reijnders e Huijbregts (2008) avaliaram as emissões de carbono para a produção de óleo de palma no sul da Ásia. Dependendo das práticas de plantio, uso de combustível fóssil no ciclo de vida e conversão anaeróbica do efluente POME, as emissões desse óleo podem variar de 2,6 a 18,2 t CO₂e por tonelada de óleo de palma.

8.1. Emissão de N₂O

Estudos têm avaliado os impactos ocasionados pelo uso de fertilizantes nitrogenados. Seu uso causa consequências para o aumento da concentração de N₂O na atmosfera, uma vez que, durante sua decomposição, o nitrogênio aplicado é volatizado para o ambiente.

Para Crutzen et al. (2008), 3 a 5 % do fertilizante nitrogenado aplicado em plantios bioenergéticos são emitidos para atmosfera em forma de N₂O. Por outro lado, estudos do IPCC (2006b) apontam para um valor de 1,325%, para a mesma atividade.

Crutzen et al. (2008) relacionaram o potencial de aquecimento global, em função da aplicação de nitrogênio nas culturas de milho, cana-de-açúcar e colza, com o potencial de “resfriamento” global devido a substituição do combustível fóssil pelo biocombustível dessas culturas, sem considerar o ciclo de vida do produto. Concluíram que, para uma eficiência de 40% na absorção de nitrogênio pela planta, as emissões de CO₂ devido à utilização de nitrogênio são superiores à taxa de carbono fixada ao biodiesel de colza e ao etanol de milho.

Por outro lado, os mesmos autores identificaram que o etanol de cana-de-açúcar é eficiente na redução do aquecimento global. Além disso, destacaram que culturas como o dendê, por exigirem menor aplicação de nitrogênio por matéria seca, podem ter efeitos positivos.

8.2. Mudança no uso do solo

A mudança no uso do solo pode ser definida como direta ou indireta. Em se tratando de biocombustíveis, a mudança direta é resultado da expansão da área de cultivo de uma determinada cultura energética, dentro dos limites de um país, para atender à demanda crescente daquela cultura

devido à produção de biocombustível dentro do mesmo país (Liska & Cassman, 2008). A expansão pode ser exemplificada pela substituição de floresta por uma cultura de soja.

A mudança indireta no uso do solo é consequência da pressão que a agricultura exerce sobre outras atividades, seja agrícola ou não, fazendo com que essas se desloquem para outras áreas. Ou seja, os efeitos diretos ocasionam os efeitos indiretos em função do deslocamento de fronteiras agrícolas e/ou pecuárias (Panichelli et al., 2008).

Em 2008, 53% da expansão da cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil ocorreu sobre áreas de outras culturas agrícolas e 45% em área de pastagem (Nassar et al., 2008).

Dada a importância, os efeitos no estoque de carbono devido às mudanças no uso do solo têm sido estudados com o objetivo de avaliar o real potencial dos biocombustíveis em reduzir as emissões de GEE (Searchinger et al., 2008; Gallagher, 2008; Fargione, et al., 2008; Gibbs et al. 2008; Panichelli et al., 2008).

Um fator importante e de grande influência sobre o estoque de carbono é a produtividade de biomassa da cultura a ser implantada na área substituída, uma vez que altera a quantidade de carbono acima do solo. Além disso, o tipo de solo e o clima influenciam o armazenamento e a decomposição da matéria orgânica (Amaral et al., 2008).

A mudança no uso do solo repercute na variação do estoque de carbono, que se caracteriza pela substituição da vegetação local por agricultura, pecuária, construções, áreas urbanas, rodovias, entre outros. Dessa forma, para se avaliarem as emissões de carbono devido à mudança no uso do solo é necessário o conhecimento dos estoques de carbono, tanto aquele incorporado à biomassa acima do solo quanto o carbono agregado ao solo.

Razafimbelo et al. (2006) estudaram, no período de 50 anos, a concentração de carbono no solo para a cultura de cana-de-açúcar no sudeste brasileiro nas condições de colheita crua e colheita precedida de queima da palha. Concluíram que, para a profundidade de 0-10 cm, o carbono no solo foi de 23,7 e 20,7 g C/kg solo para cana-de-açúcar crua e cana-de-açúcar queimada, respectivamente. Ou seja, um estoque de carbono no solo de 30,8 e 26,9 Mg de carbono por hectare (Mg C/ha) para cana-de-açúcar crua e queimada, respectivamente.

Outro estudo, realizado por Galdos (2007), citado por Amaral et al. (2008), identificou um estoque de 44 Mg e 35 Mg de carbono por hectare para cana-de-açúcar crua e queimada, respectivamente. Esse mesmo levantamento, realizado por Amaral et al. (2008), apresentou o estoque de carbono, no solo e na biomassa, para os biomas de Cerrado, Cerradão e Pastagem Degradada, entre outros, para as condições brasileiras (Tabela 2 e Tabela 3).

Tabela 2. Estoque de carbono no solo para diferentes ecossistemas.

Ecossistema	Estoque de carbono no solo (Mg C/ha)	Fonte (citado por Amaral et al., 2008)
Cerradão	53	Lardy et al. (2001)
Cerrado	46	Lardy et al. (2001)
Pastagem degradada	41	d'Andréa et al. (2004)
Cana-de-açúcar queimada	35	Galdos (2007)
Cana-de-açúcar sem queima	44	Galdos (2007)

Tabela 3. Estoque de carbono na biomassa acima do solo para diferentes ecossistemas.

Ecossistema	Estoque de carbono na biomassa (Mg C/ha)	Fonte (citado por Amaral et al., 2008)
Cerradão	33,5	Ottmar et al. (2001)
Cerrado	25,5	Ottmar et al. (2001)
Pastagem degradada	1,3	Szakács et al. (2003)
Cana-de-açúcar queimada	17,0	Estimativa VPB (2008)
Cana-de-açúcar sem queima	17,5	Estimativa VPB (2008)

Henson (2004), citado por Schmidt (2007), estimou o carbono no solo e na biomassa para a cultura de dendê na Malásia, para um ciclo de 25 anos, tendo encontrado o valor de 82 toneladas de C/ha. Para Gibbs et al. (2008) o estoque total de carbono foi estimado em 77 toneladas de C/ha (Tabela 4).

Tabela 4. Estoque de carbono no solo e na biomassa para a cultura do dendê.

	Gibbs et al. (2008)	Henson (2004)
Palma de dendê		
Carbono orgânico no solo	-	50 t C/ha
Carbono na biomassa	-	26 t C/ha
Carbono na serrapilheira	-	3,4 t C/ha
Carbono em partes não queimadas do dendê	-	2,5 t C/ha
Total de carbono no solo e biomassa	77 t C/ha	82 t C/ha

9. METODOLOGIA

9.1. Avaliação do ciclo de vida

Este estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) seguiu as diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040:1997 e ISO 14044:2006, que substituiu as normas ISO 14041:1998; ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000. Segundo essa norma, um estudo de ACV é composto por quatro fases (Figura 5), abaixo descritas.

Figura 5. Fases de uma ACV e relações entre as etapas.
Fonte: adaptado de ISO 14044:2006.

Para atender aos objetivos deste trabalho, foi necessária a realização de dois estudos de avaliação do ciclo de vida, um para o etanol de cana-de-açúcar e outro para o biodiesel de dendê, ambos para as condições brasileiras.

a. Definição do objetivo e do escopo

Precisam estar bem claros e consistentes com a aplicação pretendida. O objetivo deve expor as razões para conduzir o estudo e o público-alvo. A definição do escopo envolveu a descrição dos seguintes itens: 1) funções do sistema de produto; 2) unidade funcional; 3) sistema de produto; 4) fronteiras do sistema de produto; 5) procedimento de alocação; 6) tipos de impacto, o método de

avaliação de impacto e a interpretação subsequente a ser usada; 7) requisito dos dados; 8) as considerações; 9) as limitações; 10) requisitos da qualidade dos dados iniciais; e 11) tipo de análise crítica.

b. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Essa fase envolveu a coleta de dados de entrada (*input*) e saída (*output*) do sistema de produto estudado. Tais dados envolveram o uso e disposição de recursos relacionados ao processo do sistema.

c. Avaliação de impacto ambiental do ciclo de vida (AICV)

Na etapa de avaliação de impacto ambiental no ciclo de vida, as seguintes categorias de impacto foram consideradas: 1) Balanço de energia; 2) Emissões de Gases de Efeito Estufa; e 3) Mudança no Uso do Solo.

d. Interpretação dos resultados

Consiste na interpretação dos resultados obtidos nas etapas de análise de inventário e avaliação de impacto, em consonância com os objetivos e escopo estabelecidos na primeira etapa. A interpretação deve apresentar a conclusão e as recomendações do estudo de forma consistente. Nessa fase, também devem ser levantadas as limitações do estudo.

Para este estudo, seguindo os requisitos da norma ISO 14044:2006, a avaliação do ciclo de vida incluiu:

- a) Aquisição de matéria-prima: atividades e processos para a obtenção de recursos materiais e energéticos do meio ambiente, que se inicia na extração da matéria-prima;
- b) Processamento e manufatura: atividades e processos requeridos para a transformação dos recursos naturais em produto;
- d) Uso, manutenção e reparo: fase de uso do produto, incluindo as tipologias de operações de serviços.

Quando todas as fases requeridas pela ISO 14.044/2006 forem consideradas, a avaliação do ciclo de vida é do tipo “*from cradle to grave*” (do berço ao túmulo). No entanto, dependendo do objetivo proposto, uma avaliação parcial é aplicável, podendo ser dos tipos “*from cradle to gate*”

(do berço ao portão de fábrica), “*from gate to grave*” (do portão de fábrica ao túmulo) e “*from gate to gate*” (entre dois portões de fábrica) (Todd & Curran, 1999).

Outras definições, mais utilizadas para estudos que tratam de combustíveis, caracterizam a análise em: a) “Well-to-Tank”, para abordagens que incluem a produção do combustível desde a utilização de recursos para sua fabricação até sua chegada ao tanque do veículo; ou seja, incluem as etapas de extração de matéria-prima, transporte, estoque, processamento, distribuição; b) “Tank-to-Wheel”, para escopo que abrange desde o tanque do veículo até a roda, ou seja, envolve a abastecimento, consumo e evaporação; c) “Well-to-Wheel”, integra as duas últimas abordagens, ou seja, analisa todo o ciclo do combustível (CARB, 2009; GM et al., 2001; Gnansounou et al., 2009).

Este estudo trata-se de uma avaliação do tipo “Well-to-Tank”. Não inclui a etapa de distribuição do etanol até o posto de combustível (ponto de uso), uma vez que o objetivo é comparar a produção tradicional de etanol hidratado de cana-de-açúcar ao sistema integrado de produção proposto, ou seja, a distribuição é anulada devido à semelhança.

Embora a Norma ISO 14.044:2006 seja usada para analisar sistemas de biocombustíveis, existem complicações se diferentes escalas temporais e espaciais forem utilizadas. Para que haja uma padronização, é fundamental que a unidade funcional escolhida para a avaliação seja apropriada e que a estrutura de análise seja adequada para a unidade selecionada (Liska & Cassman, 2008).

9.2. Balanço de energia e emissões de GEE do ciclo de vida

O balanço de energia e as emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar foram calculados para uma produção tradicional desse biocombustível e para o sistema integrado de produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê.

A metodologia adotada para cada subsistema considerado está detalhada a seguir.

9.2.1. Sistema etanol de cana-de-açúcar

Nesta seção serão apresentadas as metodologias para cálculo do balanço de energia e emissões de gases de efeito estufa, tanto para a etapa agrícola quanto para a etapa industrial, e a metodologia para o cálculo da produtividade média da cultura de cana-de-açúcar.

O sistema da produção tradicional de etanol de cana-de-açúcar foi dividido em nove subsistemas: E.I - mudas; E.II – produção e uso de insumos agrícolas; E.III – tratos culturais; E.IV – colheita e transporte; E.V – fabricação e manutenção de máquinas e implementos agrícolas; E.VI

– transporte e disposição de coprodutos; E.VII – fabricação e uso de insumos industriais; E.VIII – fabricação e manutenção de equipamentos e construção industrial; E.IX – geração de energia a partir da biomassa.

Os subsistemas E.I a E.IV correspondem à fase agrícola Figura 6. Os subsistemas E.V a E.IX compreende as fases industriais Figura 7.

Figura 6. Subsistemas agrícolas considerados para a avaliação do ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar.

Figura 7. Subsistemas industriais considerados para a avaliação do ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar.

Produtividade média

A produtividade considerada para a cana-de-açúcar refere-se à média de três usinas sucroenergéticas localizadas no Estado de São Paulo, sob o bioma de Cerrado. Embora muitos produtores de cana-de-açúcar realizem acima de cinco cortes, adotou-se o perfil da maioria das usinas sucroenergéticas do Estado de São Paulo. Dessa forma, foram coletados dados da evolução de produtividade ao longo de um ciclo (6 anos) de cana-de-açúcar, que somam 5 cortes e, portanto, 5 produtividades, sendo 4 cortes de soqueira e uma reforma. A soma dessas foi dividida por seis para resultar em uma produtividade média para o ciclo, apresentada na equação (1).

$$P_c \left(\frac{tc}{ha.ano} \right) = \frac{\sum_1^n p_j}{(n + 1)} \quad (1)$$

Onde, P_c é a produtividade média anual da cana, tc/ha.ano; n , o número de cortes referentes aos anos de produção, anos; p , a produtividade para cada ano de referência j , tc/ha.

E.I: MUDAS

a) Energia

Para o cálculo do consumo de energia para a produção de mudas, foi estimada uma relação do consumo energético para produzir as toneladas de cana-de-açúcar necessárias ao plantio. Depois de contabilizada a energia total demanda no ciclo de vida da cana-de-açúcar, foi realizada uma iteração para identificar a energia para a produção das mudas. Vale salientar que as mudas tratam-se dos próprios colmos da cana-de-açúcar.

A partir de dados de campo, identificou-se que são necessárias 12 toneladas de cana por hectare para o plantio. Para o ciclo médio adotado de seis anos, tem-se 2 toneladas de cana por hectare por ano. Assim, a contribuição da muda é dada por:

$$E_l \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \frac{12 tc/ha}{6 anos} \cdot \frac{1}{P_c} \left(\frac{ha.ano}{tc} \right) \cdot E_{a_{t1}} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) \quad (2)$$

Onde, P_c é a produtividade média da cana-de-açúcar, tc/ha.ano; E_a é o consumo total de energia do sistema agrícola (insumos agrícolas, tratos culturais, colheita e transporte, máquinas e

implementos agrícolas e disposição de coprodutos) para o tempo tI , antes de contabilizar a energia das mudas, MJ/ha.ano.

b) Emissões de GEE

Para as emissões de GEE, dada em kg CO₂e/ha.ano, considera-se o resultado final de emissões de GEE equivalente à produção de 2 toneladas de cana-de-açúcar.

E.II: PRODUÇÃO E USO DE INSUMOS AGRÍCOLAS E COPRODUTOS

Este subsistema inclui a etapa de produção e uso dos insumos agrícolas e coprodutos.

a) Energia

A quantidade de insumos agrícolas aplicada foi coletada em campo e a média de seus valores serviu de entrada para o modelo, lembrando que essas taxas variam em função do estágio de desenvolvimento da planta (cana planta ou cana soca) e taxa de aplicação dos coprodutos, torta de filtro e vinhaça.

Segundo dados de campo, a torta de filtro é aplicada em 100% da área. Dessa forma, o consumo de fertilizantes levantados nas usinas incluem o uso desse coproduto na cultura canavieira.

O uso da vinhaça ocorre do segundo ao quinto corte da cana-de-açúcar. A quantidade disponível para a aplicação de vinhaça, por hectare, é dada por:

$$P_v \left(\frac{m^3}{ha.ano} \right) = \frac{R_{ve} \cdot P_e}{1000} \quad (3)$$

Onde, P_v é a produtividade média de vinhaça, m³/ha.ano; R_{ve} o rendimento de litros de vinhaça por litros de etanol; e P_e a produtividade média de etanol, l/ha.

Considera-se que a vinhaça é aplicada somente na cana-soca, a uma taxa de 140 m³ de vinhaça por hectare.

Assim, a porcentagem da área atendida com vinhaça, C_v , é dada por:

$$C_v (\%) = \frac{P_v}{140} \quad (4)$$

Dessa forma, o consumo energético para os fertilizantes, em termos de MJ por hectare por ano, é dado por:

$$E_{II,f} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \left\{ \left(A_{f,cp} \cdot \frac{1}{6} \right) + \left[(A_{f,cs} \cdot C_v) + (A_{f,cs} \cdot (1 - C_v)) \right] \cdot \frac{4}{6} \right\} \cdot IE_f \quad (5)$$

Onde f , é cada um dos fertilizantes; cp e cs correspondem à cana-planta e à cana-soca, respectivamente; A é taxa de aplicação do fertilizante f , kg/ha.ano; e IE é a intensidade energética do fertilizante f , (MJ/kg_f). O primeiro termo entre parênteses se refere à cana-planta, ou seja, ela ocorre uma vez no ciclo de seis anos. O segundo termo, entre colchetes, se refere à cana-soca, ou seja, ela ocorre quatro vezes no ciclo de seis anos.

Os insumos agrícolas utilizados para a cultura de cana-de-açúcar são o potássio (K), fósforo (P), nitrogênio (N), calcário (CaCO₃), glifosato e carbofuran. Seus fatores de intensidade energética foram referenciados do software Simapro (Simapro, 2008).

A demanda energética atribuída aos pesticidas é dada por:

$$E_{II,p} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = A_p \cdot IE_p \quad (6)$$

Sendo A , a taxa de aplicação dos pesticidas p , kg_p/ha.ano; e IE a intensidade energética do pesticida p , (MJ/kg_p).

b) Emissões de GEE

As emissões de GEE para a utilização dos insumos agrícolas (GEE_i), em termos de CO₂e por hectare por ano, é dada por:

$$GEE_i \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = [(FE_{i,p} + FE_{i,u}) \cdot (A_i)] \quad (7)$$

Onde, FE , é o fator de emissão do insumo i , kg CO₂e/kg; p e u indica que FE refere-se à produção e uso, respectivamente; A é taxa de aplicação do insumo i , kg_i/ha.ano.

O segundo termo entre colchetes da equação (7) ($FE_{i,u}$) é válido somente para o caso do nitrogênio e do calcário, uma vez que o uso desses insumos químicos liberam, por volatilização, nitrogênio e carbono na forma gasosa, respectivamente.

A vinhaça gerada nas usinas sucroalcooleiras chega até a lavoura através de canais abertos. As emissões desse coproduto foram calculadas com base em Soares et al. (2009). A temperatura da vinhaça alcança 100 °C e, à medida que ocorre o resfriamento desse coproduto, há a produção de gás metano. A produção desse gás ocorre nas fases termofílicas, próximo dos 60 °C, e mesofílica, próximo dos 40 °C. Soares et al. (2009) consideraram que 0,2% do carbono contido na vinhaça é emitido na forma de CH₄, sendo que o conteúdo de carbono solúvel na vinhaça é de 1 a 2%. Após a aplicação da vinhaça na lavoura considera-se que não há emissão de metano.

Dessa forma, para o cálculo das emissões provenientes dos canais de irrigação da vinhaça, a seguinte equação se aplica:

$$GEE_{v,CH_4} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = A_v \cdot c_v \cdot \beta_{CH_4,v} \cdot GWP_{CH_4} \quad (8)$$

Onde, A_v , é a taxa de aplicação da vinhaça v , l/ha.ano; c_v , o conteúdo de carbono na vinhaça, kg C/l; β , a porcentagem de carbono da vinhaça emitido na forma de CH₄, %; e GWP_{CH_4} , o potencial de aquecimento global do CH₄.

Além das emissões de CH₄, há as emissões relacionadas ao nitrogênio contido na vinhaça. Depois de aplicada na lavoura, ocorre a volatilização de 1% do nitrogênio contido (IPCC, 2006b). Segundo dados de Soares et al. (2009), o conteúdo de nitrogênio na vinhaça é de 0,28 kg N/m³. Considerando que a massa molecular do N₂O é 44 e do N₂, 28, as emissões totais de N₂O são dadas por:

$$GEE_{v,N_2O} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = A_v \cdot n_v \cdot \alpha_{N,v} \cdot \frac{44}{28} \cdot GWP_{N_2O} \quad (9)$$

Onde, A_v , é a taxa de aplicação da vinhaça, l/ha.ano; n_v , o conteúdo de nitrogênio na vinhaça, kg N/l; α , a porcentagem de nitrogênio volatilizado, %; e GWP_{N_2O} , o potencial de aquecimento global do N₂O.

Além da vinhaça, o nitrogênio contido na torta de filtro também emite GEE. Segundo dados de Soares et al. (2009), o conteúdo de nitrogênio na torta de filtro é de 5,5 kg N/kg torta. Considerando que a massa molecular do N₂O é 44 e do N₂, 28, as emissões totais de N₂O são dadas por:

$$GEE_{tf,N_2O} \left(\frac{kg CO_2e}{ha. ano} \right) = A_{tf} \cdot n_{tf} \cdot \alpha_{N,tf} \cdot \frac{44}{28} \cdot GWP_{N_2O} \quad (10)$$

Onde, A , é a taxa de aplicação da torta de filtro, kg/ha.ano; n_{tf} , o conteúdo de nitrogênio na torta de filtro, kg N/kg torta; α , a porcentagem de nitrogênio volatilizado, %; e GWP_{N_2O} , o potencial de aquecimento global do N_2O .

E.III: TRATOS CULTURAIS

A etapa de tratos culturais envolve o consumo de diesel nas diversas atividades mecanizadas, tais com aplicação de calcário, incorporação dos restos culturais, aração pesada, subsolagem, gradagem pesada I, gradagem intermediária II, gradagem niveladora III, sulcamento, fechamento de sulcos e aplicação de inseticidas, aplicação de herbicida e quebra lombo.

Adotou-se o consumo médio de diesel das usinas visitadas. É importante salientar que o consumo de combustível sofre grande influência da configuração dos tratos culturais.

Dentro do ciclo de 6 anos de cana-de-açúcar, são realizados um trato cultural de cana-planta (1/6) e quatro tratos culturais de cana-soca (4/6).

a) Energia

A demanda energética para a etapa de tratos culturais é dada por:

$$E_{III\ tratos} \left(\frac{MJ}{ha. ano} \right) = \left(\frac{1}{6\ anos} \cdot C_{d,cp} + \frac{4}{6\ anos} \cdot C_{d,cs} \right) \cdot IE_d \quad (11)$$

Onde, C_d é o consumo de diesel nas etapas de cana-planta, cp , e cana-soca, cs , l/ha; e IE_d , a intensidade energética da produção do diesel, MJ/l.

b) Emissões de GEE

As emissões de gases de efeito estufa foram calculadas com base nas informações de consumo de diesel por hectare, dadas por:

$$GEE_{III\ tratos} \left(\frac{kg CO_2e}{ha. ano} \right) = \left(\frac{1}{6\ anos} \cdot C_{d,cp} + \frac{4}{6\ anos} \cdot C_{d,sc} \right) \cdot (FE_{d,ACV} + FE_{d,comb.}) \quad (12)$$

Onde, C_d é o consumo de diesel nas etapas de cana-planta, cp , e cana-soca, cs , l/ha; e $FE_{d,ACV}$ e $FE_{d,comb.}$, os fatores de emissão do ciclo de vida e combustão do diesel, respectivamente, kg CO₂e/l diesel.

E. IV:COLHEITA E TRANSPORTE

O subsistema E.IV inclui o consumo de diesel para a colheita e o transporte da cana-de-açúcar até a usina, bem como as emissões relacionadas à queima da palha da cana-de-açúcar.

a) Energia

A colheita da cana-de-açúcar pode ser manual ou mecânica. Quando realizada manualmente, é feito o enleiramento da cana colhida de 5 a 7 ruas para que a carregadora recolha essa matéria-prima e a transfira para caminhões tipo Romeu e Julieta.

Nos sistemas mecanizados, toda a cana-de-açúcar é colhida por colhedoras e lançada em veículos de transbordo, que irá transferi-la para caminhões que farão o transporte até a usina. O transbordo é tracionado geralmente por tratores.

A demanda energética para a etapa de colheita é dada por:

$$E_{IV_c} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \frac{5}{6} [f_{me} \cdot (C_{d,co} + C_{d,t}) + f_{ma} \cdot (C_{d,ca} + C_{d,rJ})] \cdot IE_d \quad (13)$$

e

$$C_d \left(\frac{l}{ha.ano} \right) = \frac{c_e}{c_o} \cdot P_c \quad (14)$$

Onde, 5/6 significa que, no ciclo de 6 anos, ocorreram 5 colheitas; f_{me} é a fração de colheita mecanizada; f_{ma} é a fração de colheita manual; $C_{d,co}$, $C_{d,t}$, $C_{d,ca}$, $C_{d,rJ}$ são o consumo de diesel da colhedora, transbordo, carregadora e reboque de Julieta, respectivamente, l/ha; e IE_d , a intensidade energética da produção do diesel d , MJ/l; c_e e c_o , respectivamente, o consumo específico e capacidade operacional dados na Tabela 5; e P_c , a produtividade média anual de cana-de-açúcar, tc/ha.ano.

A Tabela 5 apresenta a capacidade operacional e consumo específico para os equipamentos utilizados na etapa de colheita da cana-de-açúcar. Os dados representam a média das usinas visitadas.

Tabela 5. Capacidade operacional e consumo específico dos equipamentos utilizados para a colheita da cana-de-açúcar.

Equipamentos	Capacidade Operacional	Consumo Específico
	(t/h)	(litros diesel/h)
Colhedora Case A 7000	45,00	38,00
Carregadora Santal	60,00	10,00
Transbordo/Reboque de Julieta	40,00	9,00

A demanda energética para o transporte da cana-de-açúcar é dada por:

$$E_{IVt} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \left\{ \left[f_t \cdot \left(\frac{P_c}{c_c} \cdot d \cdot \left(\frac{1}{\mu_{ch}} + \frac{1}{\mu_v} \right) \right) \right] + \left[f_r \cdot \left(\frac{P_c}{c_c} \cdot d \cdot \left(\frac{1}{\mu_{ch}} + \frac{1}{\mu_v} \right) \right) \right] + \left[f_{rJ} \cdot \left(\frac{P_c}{c_c} \cdot d \cdot \left(\frac{1}{\mu_{ch}} + \frac{1}{\mu_v} \right) \right) \right] \right\} \cdot \frac{5}{6} \cdot IE_d \quad (15)$$

Onde, P_c é a produtividade média anual de cana-de-açúcar, t/ha.ano; c_c corresponde à capacidade de carga do caminhão, toneladas; f_t , f_r e f_{rJ} são as contribuições do treminhão, rodotrem e Romeu e Julieta no transporte da cana-de-açúcar, respectivamente, %; d , a distância média entre o campo e a usina, km; μ_{ch} e μ_v , o rendimento do caminhão cheio e vazio, respectivamente, km/l; e IE_d , a intensidade energética para produção do diesel, MJ/l. O termo 5/6 significa que, no ciclo de 6 anos, ocorreram 5 colheitas, portanto, 5 transportes.

Para o cálculo do número de viagens, $\frac{P_c}{c_c}$, o número resultante é arredondado para o número inteiro superior.

b) Emissões de GEE

As emissões de GEE para nas etapas de colheita e de transporte são resultantes da queima da palha da cana-de-açúcar, antes da colheita, e do consumo de diesel.

b.1) Proveniente do consumo de diesel

As emissões da colheita e transporte da cana-de-açúcar foram calculadas através do consumo de diesel, dadas por:

$$GEE_{IVc,t} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = C_d \cdot (FE_{d,ACV} + FE_{d,comb.}) \quad (16)$$

Onde, C_d é o consumo de diesel total para ambas as etapas (apresentado nas equações de (13) a (15)), l/ha.ano; e $FE_{d,ACV}$ e $FE_{d,comb.}$, o fator de emissão do ciclo de vida e combustão do diesel, respectivamente, kg CO₂e/l diesel.

b.2) Proveniente da queima da palha da cana-de-açúcar

Para o cálculo das emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), provenientes da queimada da palha de cana-de-açúcar, foram utilizados dados do IPCC (2006b) referente às emissões de queima de resíduos agrícolas.

Segundo esse documento, o coeficiente de emissão do CH₄ e N₂O nos resíduos agrícolas é de 2,7 e 0,07 kg para cada tonelada de resíduo (base seca), respectivamente. A eficiência de queima da palha de cana é de 90% (Macedo et al., 2004). Dessa forma, a emissão atribuída à queima da biomassa (palha da cana-de-açúcar) é dada por:

$$GEE_{IX_{pc}} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = \left[(P_p \cdot \gamma_{CH_4,pc} \cdot GWP_{CH_4}) + (P_p \cdot \gamma_{N_2O,pc} \cdot GWP_{N_2O}) \right] \cdot \eta_q \cdot f_{cq} \cdot P_c \quad (17)$$

Onde, P_p é a produtividade média de palha por tonelada de cana, t/t.c., massa seca; $\gamma_{CH_4,pc}$ e $\gamma_{N_2O,pc}$ são as emissões de GEE dos resíduos/toneladas de palha de cana, kg CH₄ ou N₂O/t palha; η_q , a eficiência da queima da palha, %; f_{cq} , a porcentagem de cana queimada, %; GWP , o potencial de aquecimento global dos gases; e P_c , a produtividade média de cana, tc/ha.ano.

E.V: FABRICAÇÃO E MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS

Esse subsistema inclui a energia demandada e as emissões de GEE atribuídas à fabricação, manutenção e reparos de tratores, caminhão e implementos agrícolas. A metodologia foi adaptada de Boddey et al. (2008) e Macedo et al. (2004).

a) Energia e emissões de GEE

O cálculo de emissões e demanda energética referente à produção dos tratores, caminhão e implementos incluem o consumo total de aço e a manutenção. A proporção de aço inoxidável, em massa, considerada para cada um dos maquinários foi de 82% e 94%, para os tratores e caminhões,

respectivamente (Boddey et al., 2008). Para os implementos, considera-se que 100% é composto por aço inoxidável.

O peso total dos equipamentos foi retirado de catálogos de fabricantes: tratores – Massey Ferguson e Valtra; caminhões – Volkswagen e Ford; transbordo e carregadora – Santal; Colhedora – Case A 7.000; Reboque – Randon. Os catálogos estão disponíveis no site dos fornecedores ou através do serviço de atendimento ao consumidor (SAC).

A equação para a demanda energética, aplicável para os tratores, implementos, colhedoras, transbordo, carregadoras e reboque de Julieta, é dada por:

$$E_{v,y} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \frac{[dm_{u,y} \cdot (IE_a + IE_{fy}) \cdot c_{m_y}] + dm_{u,y} \cdot (IE_a + IE_{fy})}{t_{v_y}} \quad (18)$$

Onde, o índice y indica o tipo de maquinário; dm_u é a densidade média de utilização (Equação (20)), kg/ha; IE_a e IE_f , a intensidade energética do aço inoxidável e da fabricação do maquinário, respectivamente, MJ/kg; c_m , o custo de manutenção, %; e t_v , o tempo de vida, anos.

As emissões de GEE para os tratores, implementos, colhedoras, transbordo, carregadoras e reboque de Julieta, são dadas por:

$$GEE_{v,y} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = \frac{(dm_{u,y} \cdot FE_a \cdot c_{m_y}) + dm_{u,y} \cdot FE_a}{t_{v_y}} \quad (19)$$

Onde, FE_a é o fator de emissão do aço inoxidável.

A densidade média de utilização se diferencia entre os tipos de maquinários e sua metodologia foi desenvolvida para este trabalho, com exceção da densidade adotada para os implementos, cujo valor foi referenciado de Boddey et al. (2008).

A densidade média de utilização para os tratores é dada por:

$$dm_{u_t} \left(\frac{kg}{ha} \right) = \frac{m_{tt} \cdot f}{As} \quad (20)$$

Onde, m_{tt} é a massa total do trator, kg/trator; f , a proporção de aço que compõe o trator, %; e As , a área atendida por unidade de trator, ha/trator.

As considerações adotadas para os tratores estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas aos tratores.

Modelo do trator	Massa total (kg)
MF 290 ¹⁾	3.200
Valtra/Valmet 1280 R ²⁾	6.609
Valtra/Valmet 880 ²⁾	3.550
Valmet/Valtra BH 180 ²⁾	7.500
MF 660 ¹⁾	8.175
MF 275 ¹⁾	3.960
Proporção em aço (%)	82 ³⁾
Massa total em aço (kg)	27.055
Área atendida por trator (ha/trator)	1.000
Custo de manutenção (%)	30 ³⁾
Vida útil dos tratores (anos)	5

^{1,2)} Especificações técnicas, acesso em: <http://www.valtra.com.br/>; www.massey.com.br/

³⁾ Boddey et al. (2008).

Para as colhedoras, a densidade de utilização é dada por:

$$dm_{uc} \left(\frac{kg}{ha} \right) = \frac{1}{tx_c \cdot t} \cdot \frac{P_c}{t_p} \cdot m_{tc} \cdot f \cdot f_{me} \quad (21)$$

Onde, tx_c é a taxa de colheita de cana por hora, tc/h; t é o tempo de colheita diário, horas/dia; P_c , a produtividade de cana-de-açúcar, tc/ha.ano; t_p é o tempo total de processamento de cana-de-açúcar no ano (safra), dias/ano; m_{tc} , a massa total da colhedora, kg/colhedora; f , a proporção de aço que compõe a colhedora, %; f_{me} é fração de cana-de-açúcar mecanizada, %.

Adotou-se que, para cada colhedora, são necessários dois transbordos para armazenagem da cana-de-açúcar colhida. Como o transbordo se locomove juntamente com a colhedora, a metodologia de cálculo para a densidade média de utilização dos transbordos é a mesma apresentada na equação (21), lembrando que a massa unitária do transbordo foi multiplicada por dois. As considerações adotadas para as colhedoras e o transbordo estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas às colhedoras e transbordo.

Modelo da colhedora	Santal Tandem ¹⁾
Massa total (kg)	16.000
Modelo do transbordo	Santal VT-8 Simples ¹⁾
Massa total (kg)	5.500
Proporção de aço (colhedora e transbordo) (%)	94 ²⁾
Massa total em aço da colhedora (kg)	14.495
Massa total em aço do transbordo (kg)	10.340
Taxa de colheita (toneladas/hora)	40
Tempo colhido diário (horas)	24
Tempo de processamento anual (dias/ano)	200
Custo de manutenção (%)	30
Vida útil das colhedoras e transbordo (anos)	5

¹⁾ Especificações técnicas, acesso em:

Colhedora: http://www.santal.com.br/Conteudo/Produtos/Especificacoes_TANDEM.htm

Transbordo: http://www.santal.com.br/Conteudo/Produtos/Especificacoes_TRANSBORDOS.htm

²⁾ Boddey et al. (2008)

Para as carregadoras e reboque de Julieta, a metodologia para cálculo da densidade média de utilização é a mesma apresentada pela equação (21). No entanto, o tempo t , horas trabalhadas diárias, e a tx_c , que corresponde ao total de cana-de-açúcar colhida por hora, variam para esses maquinários. Além disso, o parâmetro f_{me} é substituído por f_{ma} , que corresponde à porcentagem de cana-de-açúcar colhida manualmente.

Para a carregadora, o tempo t é de 8 horas diárias, por se tratar de colheita manual, e a tx_c é dada por:

$$tx_c \left(\frac{tc}{h} \right) = \frac{c_c}{t_c} \quad (22)$$

Onde, c_c é a capacidade de transporte de cana-de-açúcar por ciclo da colhedora, tc/ciclo; e t_c é o tempo demandado por ciclo, horas/ciclo.

Cada ciclo realizado pela carregadora transporta uma tonelada de cana-de-açúcar. Em uma hora são realizados 60 ciclos, ou seja, 1 minuto para cada ciclo.

Para o reboque de Julieta, o tempo t é de 24 horas diárias, pois ele atende tanto à colheita manual quanto à colheita mecanizada. A massa total de aço considerada corresponde a dois reboques mais a massa total do caminhão rebocador (Volkswagen modelo 24320).

A taxa tx_c para o reboque de Julieta é dada por:

$$tx_c \left(\frac{tc}{h} \right) = (tx_{co} \cdot f_{me}) + (tx_{ca} \cdot f_{ma}) \quad (23)$$

Onde, tx_{co} é a taxa de colheita da colhedora, tc/hora; tx_{ca} , a taxa de colheita da carregadora (Equação (22)), tc/hora; f_{me} é a fração de colheita mecanizada, %; f_{ma} é a fração de colheita manual, %. As considerações adotadas para a carregadora estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas à carregadora.

Modelo da carregadora	Santal CMP Master ¹⁾
Massa da carregadora (kg)	2.030
Proporção de aço (%)	94 ²⁾
Massa total em aço (kg)	1.908
Capacidade de carga por ciclo (kg)	1.000
Tempo demandado por ciclo (min.)	1
Horas trabalhadas	8
Custo de manutenção (%)	20 ²⁾
Vida útil das carregadoras (anos)	5

¹⁾ Especificações técnicas, acesso em: http://www.santal.com.br/Conteudo/Produtos/Especificacoes_CMP.htm

²⁾ Boddey et al. (2008)

A Tabela 9 apresenta as considerações adotadas para o conjunto reboque de Julieta.

Tabela 9. Considerações para cálculo de energia e emissões incorporadas ao reboque de Julieta.

Modelo do reboque	Randon ¹⁾
Massa do reboque (kg)	12.400
Proporção de aço (%)	94 ²⁾
Massa total em aço (kg)	23.312
Modelo do caminhão rebocador	Volkswagen 24320 ³⁾
Massa do caminhão (kg)	6.100
Proporção de aço (%)	82 ²⁾
Massa total em aço (kg)	5.002
Massa total do conjunto reboque de Julieta	28.314 ⁴⁾
Capacidade de carga total (kg)	70.000
Horas trabalhadas	24
Custo de manutenção (%)	20 ²⁾
Vida útil do conjunto reboque de Julieta (anos)	5

¹⁾ <http://www.randonimplementos.com.br/pt/products/v/implementos-rodoviaros/canavieiros>. Especificações técnicas pelo SAC.

²⁾ Boddey et al. (2008)

³⁾ Especificações técnicas: http://www.vwcaminhoeseonibus.com.br/site/bra/veiculos_constellation_detalhes.aspx?modelo=24320&line=1

⁴⁾ Soma da massa do caminhão mais dois reboques.

Para os implementos agrícolas (Tabela 10), os dados de massa total, densidade média de utilização, demanda energética para fabricação e demanda para a manutenção foram referenciados de Boddey et al. (2008) e Macedo et al. (2004).

Tabela 10. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões dos implementos.

Implementos agrícolas	
Massa total dos implementos (kg)	9114,00
Proporção de aço (%)	100%
Massa total em aço (kg)	9114,00
Custo de manutenção (%)	31%
Vida útil dos implementos (anos)	8 anos

E.VI: TRANSPORTE E DISPOSIÇÃO DE COPRODUTOS

O subsistema E.VI inclui o consumo de diesel para a disposição da torta de filtro e vinhaça até no campo.

A disposição de vinhaça no campo é realizada por gravidade e aspersão em área de soqueira. Para tanto, o efluente pode ser encaminhado até a lavoura por meio de um motor estacionário, que bombeia a vinhaça das lagoas de armazenamento até os canais de irrigação, ou por um caminhão que aplica diretamente a vinhaça.

A aplicação direta por caminhão é realizada em 35% da área, e a aplicação por aspersão em 65%. As demais considerações adotadas para cada modelo de aplicação estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Considerações adotadas para a aplicação de vinhaça por aspersão (canal) e caminhão.

Tipo de aplicação	Taxa de aplicação (m ³ /ha)	Distância (km)	Consumo diesel (l/h; km/l)		Capacidade do tanque (m ³)	Vazão de aspersão (m ³ /hora)
Aspersão (canal)	140	-	8		-	120
Caminhão	140	25	1,8 (cheio)	2,4 (vazio)	15	-

a) Energia

A demanda energética atribuída ao transporte da vinhaça é dada por:

$$E_{VI_{tv}} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \left[d \cdot \left(\frac{1}{\mu_{ch}} + \frac{1}{\mu_v} \right) \cdot \frac{1}{c_t} \cdot A_v \cdot f_c + C_d \cdot \frac{1}{Q} \cdot A_v \cdot f_a \right] \cdot IE_d \quad (24)$$

Onde, d é a distância entre o campo e a usina, km; μ_{ch} e μ_v , o rendimento do caminhão cheio e vazio, respectivamente, km/l; c_t corresponde à capacidade do tanque do caminhão, m³; A_v , a taxa de aplicação da vinhaça, m³/ha; f_c e f_a , a fração correspondente à aplicação por caminhão e aspersão, respectivamente, %; C_d , o consumo de diesel, l/h; Q , a vazão de aspersão, m³/hora; e IE_d , a intensidade energética para produção do diesel, MJ/l.

A torta de filtro é aplicada a uma taxa de 30 t úmidas/ha ou 15 t seca/ha. A distância média percorrida é de 25 km; o consumo médio do caminhão basculante, de carga média de 8 toneladas, é de 2 km/l, carregado, e 2,5 km, vazio.

Sendo assim, a demanda energética para o transporte da torta de filtro é dada por:

$$E_{VI_{ttf}} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = d \cdot \left(\frac{1}{\mu_{ch}} + \frac{1}{\mu_v} \right) \cdot \frac{1}{c_c} \cdot A_{tf} \cdot IE_d \quad (25)$$

Onde, d é a distância entre o campo e a usina, km; μ_{ch} e μ_v , o rendimento do caminhão cheio e vazio, respectivamente, km/l; c_c corresponde à capacidade de carga do caminhão, toneladas; A_{tf} , a taxa de aplicação da torta de filtro, t úmidas/ha.ano; e IE_d , a intensidade energética para produção do diesel, MJ/l.

b) Emissões de GEE

As emissões do transporte dos coprodutos foram calculadas através do consumo de diesel, dadas por:

$$GEE_{VI_{tv,ttf}} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = C_d \cdot (FE_{d,ACV} + FE_{d,comb.}) \quad (26)$$

Onde, C_d é o consumo de diesel total (apresentado nas equações (24) e (25)), l/ha.ano; e $FE_{d,ACV}$ e $FE_{d,comb.}$, o fator de emissão do ciclo de vida e combustão do diesel, respectivamente, kg CO₂e/l diesel.

E. VII: FABRICAÇÃO E USO DE INSUMOS INDUSTRIAIS

No processo industrial do etanol de cana-de-açúcar, os principais insumos químicos utilizados são cal virgem (CaO), antibiótico, ácido fosfórico, dispersante, antiespumante, ácido sulfúrico, bactericida, ciclo-hexano, dentre outros, além do óleo lubrificante.

No entanto, devido à indisponibilidade de fatores de intensidade energética e fator de emissão de GEE para todos os insumos, foi quantificada demanda energética e emissões de GEE somente para a cal virgem, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e lubrificante. Em massa, a cal virgem e o ácido sulfúrico correspondem a mais de 90% do total de insumo químico utilizados na etapa industrial (não inclui lubrificante), o que torna significativa a abordagem adotada.

a) Energia

A demanda energética para a produção dos insumos químicos e lubrificantes é dada por:

$$E_{VII_{q,l}} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \sum m_{q,l} \cdot P_c \cdot IE_{q,l} \quad (27)$$

Onde q e l são os químicos e lubrificantes, respectivamente; m , a massa de q e l , kg/t cana; P_c , a produtividade média anual de cana-de-açúcar, t/ha.ano; e $IE_{q,l}$, a intensidade energética dos químicos e lubrificantes, respectivamente, MJ/kg.

b) Emissões de GEE

As emissões de gases de efeito estufa para a produção dos insumos químicos e lubrificantes são dadas por:

$$GEE_{VII_{q,l}} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = \sum m_{q,l} \cdot P_c \cdot FE_{q,l} \quad (28)$$

Onde $FE_{q,l}$ é o fator de emissão dos químicos e lubrificantes, kg CO₂e/kg.

Os fatores adotados para a intensidade energética e emissões de GEE dos insumos químicos e lubrificantes estão apresentados no APÊNDICE A.

E. VIII: FABRICAÇÃO E MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS E CONSTRUÇÃO INDUSTRIAL

O subsistema E.VIII inclui a energia demandada e as emissões de GEE atribuídas à fabricação dos equipamentos industriais e construção. Foram utilizados dados de Boddey et al. (2008) para a quantidade de aço e cimento empregada em uma planta típica de etanol, bem como a energia para a manutenção e utilização dos equipamentos. A usina considerada possui capacidade de moagem de 2.000.000 toneladas por ano, o que corresponde a 10.000 toneladas por dia, em média.

Adotou-se vida útil de 50 anos para as construções e custo energético de manutenção de 4% ao ano (Macedo et al., 2004). Para os equipamentos, utilizando-se as mesmas condições adotadas por Macedo et al. (2004), assumiu-se que um terço da destilaria é composto por equipamentos leves, com vida útil de 10 anos, e dois terços correspondem à estrutura da usina, equipamentos (inclui caldeiras e turbinas) e destilarias, com vida útil de 25 anos (Tabela 12).

Tabela 12. Demanda energética e emissões de gases de efeito estufa para a produção de equipamentos e construção civil de uma usina típica de etanol de cana-de-açúcar.

Insumos	Massa base (t)	Vida útil (anos)	Massa de manutenção (t) ¹⁾	Massa de utilização (t) ²⁾	Total anual (t/ano)	Total anual por área (kg/ha.ano) ³⁾	MJ/ha. ano	KgCO ₂ e/ha.ano
Cimento	1.600	50	4800,00	200	100,00	4,44	13,43	2,85
Aço leve estrutural	2.873	25	5746,00	359	244,21	10,85	245,69	13,53
Aço leve em equipamentos	1437	10	2011,80	180	219,14	9,74	220,48	12,14
Aço inoxidável	410	25	820,00	51	34,85	1,55	83,80 ⁴⁾	1,93
Total							563,39	30,45

¹⁾ A quantidade de insumo para manutenção corresponde a 4% ao ano sobre a massa base, somado com a massa base (Macedo et al., 2004).

²⁾ Para a energia interna utilizada durante a construção é acrescido 12,5% sobre a massa base (Boddey et al., 2008).

³⁾ Para uma capacidade de moagem de 2 milhões de toneladas de cana por ano, a área demanda é 22.500 ha (considera-se a produtividade média de cana adotada por este trabalho, 88,9 tc/ha.ano).

⁴⁾ Segundo dados de Pimentel e Patzek (2005), a energia embutida no aço inoxidável é 2,39 vezes a energia do aço leve.

a) Energia e emissões de GEE

Os fatores de intensidade energética para o cimento e aço leve foram levantados a partir de dados do Balanço Energético Nacional (Brasil, 2009) calculados através do consumo de energia do setor (cimento e ferro gusa) e da produção total dos insumos, cimento e aço bruto, em 2008. Para o aço inoxidável, a energia embutida é 2,39 vezes a energia do aço leve (Pimentel & Patzek, 2005).

Para o cálculo das emissões foi utilizado o fator de emissão para o cimento, aço e aço inoxidável (Kim & Worrell, 2002; Worrell et al., 2001) (Tabela 13).

Tabela 13. Fator de intensidade energética e emissões de GEE para o cimento, aço bruto e aço inoxidável.

Insumo	Produção Total (Mt) ¹⁾	Consumo de energia do setor (PJ) ¹⁾	Fator de intensidade energética (GJ/kg)	Fator de emissão de GEE (kg CO ₂ e/kg)
Cimento	51,9	156,7	0,003	0,64
Aço bruto	33,7	763,25 ¹⁾	0,02	1,25
Aço inoxidável	-	-	0,05	7,12

¹⁾ Ano base 2008.

Dessa forma, a demanda energética e as emissões totais para equipamentos e construção são dadas por:

$$E_{VIII_{e,c}} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \frac{kg_m}{ha} \cdot IE_m \quad (29)$$

e

$$GEE_{VIII_{e,c}} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = \frac{kg_m}{ha} \cdot FE_m \quad (30)$$

Onde, o primeiro termo corresponde à quantidade de material m utilizado (Tabela 12); e IE e FE , a intensidade energética e fator de emissão, respectivamente, correspondente ao material m , MJ/kg e kg CO₂e/kg.

E. IX: GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS COPRODUTOS

O subsistema E.IX. está relacionado ao uso do bagaço para a geração de energia. Nessa seção, é exposta a metodologia para o cálculo das emissões provenientes da queima desse coproduto. Além disso, são apresentados os cenários considerados para este estudo, que se diferenciam quanto à eficiência das caldeiras de biomassa.

a) Queima do bagaço da cana-de-açúcar

Para as emissões de CO₂e da queima do bagaço nas caldeiras de geração de energia, foram considerados dados do IPCC (IPCC, 2006d). As emissões de CO₂, CH₄ e N₂O para indústrias de energia em geral estão apresentadas na Tabela 14. As estimativas do IPCC incluem a queima de bagaço para geração de energia.

Tabela 14. Emissões de GEE para a geração de energia a partir de biomassa.

100000,00	Kg CO ₂ /TJ
30,00	Kg CH ₄ /TJ
4,00	Kg N ₂ O/TJ

Fonte: IPCC (2006d).

No entanto, as emissões de CO₂ não são consideradas, pois essas são absorvidas pela cana-de-açúcar durante a fotossíntese.

Para um PCI do bagaço de 1716 kcal/kg⁸, temos:

Tabela 15. Emissões de GEE atribuídas à queima do bagaço.

0,215	Kg CH ₄ /t bagaço
0,029	Kg N ₂ O/t bagaço

Dessa forma, o cálculo da queima do bagaço é dado por:

$$GEE_{IX_b} \left(\frac{kgCO_2e}{ha.ano} \right) = [(\gamma_{CH_4,b} \cdot GWP_{CH_4}) + (\gamma_{N_2O,b} \cdot GWP_{N_2O})] \cdot P_b \cdot P_c \quad (31)$$

Onde, $\gamma_{CH_4,b}$ e $\gamma_{N_2O,b}$ são as emissões apresentadas na Tabela 15; GWP , o potencial de aquecimento global do CH₄ e N₂O; P_b , a produtividade de bagaço, t/tc; e P_c , a produtividade de cana, tc/ha.ano.

b) Cenários de estudo

Dois cenários foram propostos para a geração de energia a partir dos coprodutos.

O primeiro cenário consiste em duas caldeiras de 21 kgf/cm² e duas caldeiras de 31 kgf/cm², produção total de 280 toneladas de vapor por hora. São gerados 17 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, ou 68 kWh por tonelada de bagaço. Considerando o PCI do bagaço de 7,18 MJ/kg, são gerados 9,47 kWh por GJ de energia. Neste cenário, 95% da energia produzida são consumidas pela própria usina, restando apenas 5% para venda (Tabela 16).

Para o segundo cenário, têm-se duas caldeiras de 67 kgf/cm² cada, de produção total de 500 toneladas de vapor por hora. São gerados 78 kWh por tonelada de cana, ou 312 kWh por tonelada de bagaço. Considerando o PCI do bagaço de 7,18 MJ/kg, são gerados 43,46 kWh por GJ de energia. Neste cenário, apenas 21% de toda a energia produzida é consumida, restando 79% para venda (Tabela 16).

⁸ Informação cedida em visita a campo (fevereiro de 2010).

Tabela 16. Considerações para a geração de energia a partir da biomassa.

CENÁRIO 1	
Energia por cana-de-açúcar de entrada (kWh/tc)	17,00
Energia por bagaço de entrada (kWh/tb)	68,00
Energia por MJ de biomassa (kWh/GJ)	9,47
Geração de bagaço (tb/tc)	0,25
Consumo da energia produzida (%)	95
CENÁRIO 2	
Energia por cana-de-açúcar de entrada (kWh/tc)	78,00
Energia por bagaço de entrada (kWh/tb)	312,00
Energia por MJ de biomassa (kWh/GJ)	43,46
Geração de bagaço (tb/tc)	0,25
Consumo da energia produzida (%)	21

9.2.2. Sistema biodiesel de dendê

Nesta seção, serão apresentadas as metodologias para o cálculo da produtividade média e irrigação da cultura de dendê e a metodologia para cálculo do balanço de energia e emissões de gases de efeito estufa, tanto para a etapa agrícola quanto para a etapa industrial.

O volume de controle da produção de biodiesel de dendê foi dividido em 9 subsistemas: B.I - mudas e sementes; B.II – produção e uso de insumos agrícolas; B.III – colheita e transporte; B.IV – fabricação e manutenção de máquinas agrícolas; B.V – transporte e disposição de coprodutos; B.VI – fabricação e uso de insumos industriais; B.VII – fabricação e manutenção equipamentos e construção industrial; B.VIII – geração de energia a partir dos coprodutos; e B.IX - uso. Não há distribuição do biodiesel por ser esse destinado ao consumo interno do sistema integrado.

Os subsistemas B.I a B.IV correspondem à fase agrícola (Figura 8). Os subsistemas B.V a B.IX compreende as fases industriais (Figura 9).

Figura 8. Subsistemas agrícolas considerados para a avaliação do ciclo de vida do biodiesel de dendê.

Figura 9. Subsistemas industriais considerados para a avaliação do ciclo de vida do biodiesel de dendê.

Produtividade média

Para a produtividade média de cachos de fruto de dendê por hectare, foram coletados dados da empresa Agropalma, localizada em Tailândia, PA.

Os dados de produtividade ao longo do ciclo de vida da palma de dendê estão apresentados na Tabela 17.

Não foram utilizados dados do experimento da Embrapa Cerrados devido ao seu estágio ainda inicial de desenvolvimento.

Tabela 17. Produtividade média da palma de dendê.

Ano de vida	t CFF/ha	Ano de vida	t CFF/ha
1° - 3° ano	0,00	17° ano	29,00
4° ano	5,00	18° ano	28,00
5° ano	10,00	19° ano	27,00
6° ano	15,00	20° ano	25,00
7° ano	20,00	21° - 22° ano	23,00
8° - 11° ano	25,00	23° ano	22,00
12° ano	26,00	24° ano	21,00
13° ano	27,00	25° ano	20,00
14° ano	28,00	26° - 29° ano	19,00
15° ano	29,00	28° - 29° ano	18,00
16° ano	30,00	30° ano	17,00
MÉDIA (t CFF/ha.ano)	20,00		

O ciclo de vida total do plantio de dendê, segundo dados da Agropalma, é de 30 anos, sendo 27 anos de vida útil. Não há produção nos dois primeiros anos e no terceiro ano a produtividade é muito pequena, cerca de 3 t CFF/ha, o que torna inviável a colheita.

Dessa forma, o cálculo da produtividade média de cachos de dendê foi realizado com base nos rendimentos ao longo do ciclo de vida útil, porém estendida para o ciclo de vida completo (Equação (32)).

$$P_{CFF} \left(\frac{t}{ha.ano} \right) = \frac{\sum_1^n p_j}{t_{vc}} \quad (32)$$

Onde, P_{CFF} é a produtividade média dos cachos de fruto fresco, t CFF/ha.ano; p , a produtividade, t CFF/ha; j o ano de referência; e t_{vc} o tempo de vida completo do dendê, 30 anos.

Para a produtividade média de óleo por hectare, considerou-se que 20,5%, em massa, dos cachos de fruto fresco são compostos pelo óleo cru de palma. A composição considerada para todos os derivados do CFF estão apresentados na Tabela 18. Esses valores foram coletados na Agropalma e referências bibliográficas foram utilizadas para confirmar as informações. O total ultrapassa 100% pois o POME possui adição de água do processamento dos cachos.

Tabela 18 - Composição em massa dos cachos de fruto fresco.

Cacho de Fruto Fresco (CFF)	Composição
Óleo cru de palma	20 - 21 %
Óleo de palmiste	1,7 %
Torta de palmiste	3,5 %
Cachos de fruto vazio	22 - 23 %
Fibras	12 - 15 %
Cascas	5 -7 %
Palm Oil Mill Effluent (POME)	50 %

Fonte: Ngan et al. (1993); Embrapa/MAPA (2000); Agropalma (2009).

Irrigação da cultura de dendê

Segundo dados experimentais da Embrapa Cerrados, o volume diário de água demandado por planta por irrigação de dendê é de 166 litros, plantas essas que, em média, são irrigadas durante 134 dias no ano. De acordo com o estudo, o volume de irrigação é cerca de 7 vezes maior do que o volume proporcionado pela precipitação (Azevedo et al., 2008). Considerando 143 plantas por hectare, tem-se um total irrigado de 3180 m³ por ha por ano.

A demanda de água de irrigação é dada por:

$$I_{H_2O} \left(\frac{m^3}{ha. ano} \right) = DI_{H_2O} - \theta_{Pome} \quad (33)$$

Onde, DI_{H_2O} é a demanda de água de irrigação da planta de dendê no Cerrado, conforme apresentado acima, m³/ha.ano; e θ_{Pome} , a oferta de POME da usina de biodiesel de dendê, m³/ha.ano.

B.I: MUDAS E SEMENTES

O subsistema B.I inclui a etapa de viveiro e uso da leguminosa de cobertura, a *Pueraria phaseoloides*.

a) Energia

A quantificação do *input* energético para esse subsistema foi realizada através do levantamento de dados primários do consumo de insumos (nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio), consumo de água, taxa de aplicação de sementes de palma e sementes de *Pueraria phaseoloides*.

O consumo de energia para o subsistema B.I é dado por:

$$B_I \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \sum A_f \cdot dp \cdot IE_f \cdot t_{vc}^{-1} \quad (34)$$

Onde i é cada um dos fertilizantes; A é taxa individual de aplicação do fertilizante f , kg_f/planta; dp , a densidade de planta, plantas/ha; IE é a intensidade energética do fertilizante f , MJ/kg_f; t_{vc} , o tempo de vida completo do dendê, anos. Esse último termo é importante para distribuir o consumo de insumos ao longo do tempo de vida, uma vez que o mesmo ocorre somente uma vez para esse período.

a) Emissões de GEE

As emissões de GEE incluem a produção e uso dos insumos agrícolas, cuja metodologia é a mesma apresentada no item 9.2.1 (E.II, equação (7)).

B.II: PRODUÇÃO E USO DE INSUMOS AGRÍCOLAS E COPRODUTOS

Esse subsistema inclui a etapa de utilização de fertilizantes e de pesticidas. Não há consumo de combustível fóssil para os tratos culturais por serem realizados manualmente.

a) Energia

O consumo energético para o subsistema B.II, em termos de MJ por hectare ano, descontado o conteúdo de elementos fertilizantes contido nos cachos de fruto vazio (CFV) utilizados para adubação, é dado por:

$$B_{II} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = [(A_i \cdot dp) - (\vartheta_{i_{CFV}} \cdot P_{CFV})] \cdot IE_i \quad (35)$$

Onde i é cada um dos insumos agrícolas (fertilizantes e pesticidas); A é taxa individual de aplicação do insumo i , kg_i/planta.ano; dp , a densidade de planta, plantas/ha; ϑ , o conteúdo de fertilizantes i incorporado aos cachos de fruto vazio (CFV), kg_i/kg_(CFV); P_{CFV} , a produtividade média de cachos vazios, kg_(CFV)/ha.ano; IE é a intensidade energética do insumo i , MJ/kg_i.

Os insumos químicos utilizados para a cultura de dendê incluem o potássio (K), fósforo (P), nitrogênio (N), magnésio (Mg), boro (B), herbicidas e inseticidas. Seus fatores de intensidade energética foram referenciados do software Simapro (Simapro, 2008).

b) Emissões de GEE

Para as emissões de GEE, a metodologia é a mesma apresentada no item 9.2.1 (E.II, equação (7)). A taxa de aplicação de POME considerada foi de 2,75 m³/ha.ano.

B. III: TRANSPORTE

O subsistema de transporte envolve o envio dos cachos de dendê do campo até a usina de beneficiamento, e o retorno do caminhão vazio até o campo. Adotou-se um caminhão de 10 toneladas e uma distância entre a usina e o plantio de 40 km, com rendimento de 3,5 km/litro de diesel para a ida (caminhão carregado de CFV) e 2,5 km/litro para o retorno (caminhão carregado de CFF).

a) Energia

A contribuição energética para esse subsistema (B_{III}) é dada por:

$$B_{III} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = (P_{CFF} \cdot c_c^{-1} \cdot d \cdot IE_d) \cdot (\mu_{c,v}^{-1} \cdot \mu_{c,ch}^{-1}) \quad (36)$$

Onde P_{CFF} é a produtividade média de cachos de fruto fresco, t/ha.ano; c_c é a capacidade de armazenamento do caminhão, t; d é a distância percorrida pelo caminhão (trecho), km; IE_d é a intensidade energética para a produção do diesel, MJ/l; μ_c , o rendimento do caminhão, km/litros diesel; e v e ch referem-se ao caminhão vazio e cheio, respectivamente.

Na Empresa Agropalma, os dois primeiros complexos agroindustriais foram projetados para um raio de até 10 km de distância entre a indústria e o campo. No entanto, nos plantios seguintes, a empresa optou por concentrar as indústrias, aumentando a distância até o campo.

b) Emissões de GEE

As emissões do transporte dos cachos de fruto foram calculadas através do consumo de diesel, tal como apresentado no item 9.2.1 (E.IV, equação (16)).

B.IV: FABRICAÇÃO E MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS

Para a cultura de dendê, uma vez que não há mecanização no campo, a única máquina considerada é o caminhão de transporte de cachos.

A metodologia de cálculo para a demanda energética e das emissões incorporadas ao caminhão é a mesma apresentada no sistema de etanol de cana-de-açúcar, demonstradas pelas equações (18) e (19), respectivamente.

A metodologia para o cálculo da densidade média de utilização (dm_u) foi apresentada na equação (21), sendo a produtividade P correspondente à dos cachos de dendê, dada por toneladas de CFF por ha.ano.

Para o caso do dendê, a taxa tx_c da equação (21) é dada por:

$$tx_c \left(\frac{t \text{ CFF}}{h} \right) = c_c \cdot \frac{v_c}{d_t} \quad (37)$$

Onde, c_c é a capacidade de carga do caminhão, toneladas/viagem; v_c , a velocidade do caminhão, km/hora; e d_t , a distância total de transporte dos cachos (campo até usina, ida e volta), km/viagem.

As considerações adotadas para o cálculo da energia total demandada e emissões de GEE estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19. Considerações adotadas para cálculo de energia e emissões incorporadas ao caminhão.

Modelo caminhão	Ford Cargo 2428e 6x2 Max Truck ¹⁾
Massa total (kg)	23.000
Massa em aço (kg)	21.620
Capacidade de carga (kg)	10.000
Horas trabalhadas (h/dia)	8
Velocidade do caminhão (km/h)	60
Distância (ida e volta) do campo à usina (km)	80
Custo de manutenção (%)	20
Vida útil do caminhão (anos)	8

¹⁾ Especificações técnicas acesso em: www.ford.com.br/fordcaminhoes/#C2428e.

²⁾ Boddey et al. (2008).

B.V: TRANSPORTE E DISPOSIÇÃO DE COPRODUTOS

Essa etapa inclui a disposição dos coprodutos da indústria de óleo de dendê, ou seja, o transporte dos cachos de fruto vazio até o campo, que retornam para ser utilizados como adubo orgânico. Esses cachos vazios são transportados no retorno do caminhão que carrega os cachos frescos até a indústria.

Além disso, compreende a demanda energética e emissões de GEE para a irrigação do POME mais a irrigação complementar com água.

a) Energia e emissões de GEE

O consumo de combustível para a disposição dos cachos já está contabilizado no item B.III.

Para a irrigação da cultura, adotou-se um conjunto moto-bomba elétrico de 11,19 kW de potência⁹. De acordo com o experimento da Embrapa Cerrados (Azevedo et al., 2008), a irrigação é de 3 horas por dia, durante 134 dias do ano. Considerando uma conversão de 0,0036 GJ para cada kWh, tem-se uma demanda energética de 16,2 GJ/ha.ano.

Para cada cenário em estudo, que se diferenciam quanto à capacidade de geração de energia a partir dos coprodutos, essa demanda total de energia para irrigação foi descontada da energia gerada através das fibras e cascas.

Para as emissões, a energia restante, não atendida pela geração própria via coprodutos, foi multiplicada pelo fator de emissão do *mix* de energia elétrica no Brasil, 73 g CO₂e/kWh (IEA, 2009). Vale salientar que a demanda por energia elétrica do sistema biodiesel de dendê foi suprida, exclusivamente, pela queima das cascas e fibras, ou seja, não foi integrada a energia proveniente do sistema cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

Para o sistema integrado, ou seja, a substituição do consumo de diesel nas etapas agrícolas da cana-de-açúcar e palma de dendê, foram adotados os valores de demanda energética e emissões de GEE resultantes do cenário 2.

B.VI: FABRICAÇÃO E USO DE INSUMOS INDUSTRIAIS

O subsistema industrial inclui a energia consumida para a extração do óleo e para a transesterificação. Para esta etapa, foram levantados dados secundários para o consumo de energia e consumo dos insumos industriais. A configuração de produção de biodiesel de dendê na

⁹ Informações extraídas do trabalho desenvolvido por Neto (2007) no experimento de dendê irrigado da Embrapa Cerrados.

Agropalma não atenderia aos objetivos deste trabalho, pois esse é produzido somente a partir de ácidos graxos livres.

Extração do óleo

O consumo de energia para a extração do óleo foi referenciado de Schmidt (2007) e inclui o consumo de energia elétrica proveniente da rede, além da energia elétrica e vapor proveniente da própria central elétrica (coprodutos).

Para dar partida ao processo industrial é utilizado o diesel antes de dar entrada à biomassa. O consumo desse combustível foi coletado em campo junto à Empresa Agropalma.

Transesterificação

O consumo de eletricidade para a transesterificação foi referenciada de Janulis (2004a). A quantidade dos insumos industriais consumida no processo, tais como hidróxido de potássio (catalisador), ácido sulfúrico (neutralizante) e etanol, estão apresentadas no APÊNDICE B.

Para a intensidade energética e fator de emissão desses insumos foram utilizados dados de Yee et al. (2009) e software Simapro (Simapro, 2008). Para o etanol, a intensidade energética e o fator de emissão foram calculados por este estudo.

Após a transesterificação do óleo de palma para produção do biodiesel, tem-se a glicerina como coproduto, sendo geradas 0,3 toneladas para cada tonelada de óleo (Whitaker & Heath, 2008).

B.VII: FABRICAÇÃO E MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS E CONSTRUÇÃO INDUSTRIAL

O subsistema B.VII inclui a energia demandada e as emissões de GEE atribuídas à fabricação dos equipamentos industriais e construção. Foram utilizados dados de Maturana (2007) para a quantidade de aço empregada em uma planta típica de biodiesel, bem como a energia para a manutenção e utilização dos equipamentos.

Tabela 20. Considerações adotadas para cálculo da demanda energética e emissões de GEE para a indústria de biodiesel

Massa total de aço (kg)	48.380 ¹⁾
Número de bateladas	2 ¹⁾
Capacidade de processamento de biodiesel (t/ano)	102.000 ¹⁾
Vida útil (anos)	25 ²⁾
Taxa de manutenção anual (%)	4 ²⁾
Manutenção total (kg aço) ³⁾	96.760
Energia de utilização (%)	13 ²⁾
Massa total de utilização (kg) ⁴⁾	6
Massa Total (kg)	102,8
Massa total anual (kg aço/ano)	4,11

¹⁾ Maturana (2007)²⁾ Boddey et al. (2008).³⁾ 48.380 kg x 0,04 x 25 anos.⁴⁾ 48.380 x 0,13.**a) Energia e emissões de GEE**

A demanda energética para a construção da unidade de biodiesel é dada por:

$$B_{VII} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = \frac{m_a}{CI_b} \cdot P_{CPO} \cdot \eta_{O \rightarrow B} \cdot IE_a \quad (38)$$

Onde, m_a é a massa total de aço anual (Tabela 20), kg/ano; CI_b é a capacidade industrial da usina de biodiesel, kg de biodiesel por ano; P_{CPO} é a produtividade de óleo de dendê, t/ha.ano; $\eta_{O \rightarrow B}$ a taxa de conversão de óleo em biodiesel; e IE_a , a intensidade energética do aço inoxidável, MJ/kg.

Para cálculo das emissões de GEE, o último termo é substituído pelo fator de emissão do aço inoxidável, dado por kg CO₂e por kg de aço.

b) Capacidade industrial para atender à necessidade total de biodiesel

A capacidade industrial da planta de biodiesel deve ser compatível com a necessidade de biocombustível nas fases agrícolas da cana-de-açúcar e dendê. Essa capacidade é dada por:

$$CI_b \left(\frac{kg_b}{ano} \right) = \left[Dd_c + \left(Dd_d \cdot \frac{ha_d}{ha_c} \right) \right] \cdot \frac{1}{P_c} \cdot CI_e \cdot \frac{PCI_D}{PCI_b} \quad (39)$$

Onde, CI_b é a capacidade industrial da usina de biodiesel, kg de biodiesel/ano; CI_e , a capacidade de moagem da usina de etanol de cana-de-açúcar, toneladas de cana-de-açúcar/ano; Dd_c e Dd_d são as demandas de diesel na fase agrícola para as culturas de cana-de-açúcar e dendê, respectivamente, kg diesel/ha.ano; P_c é a produtividade de cana-de-açúcar, tc/ha.ano; PCI_d e PCI_b , o PCI do diesel e biodiesel, respectivamente, MJ/kg. O termo $\frac{ha_d}{ha_c}$ corresponde à unidade de área de dendê demandada para cada unidade de área de cana-de-açúcar, detalhada na equação (46).

B.VIII: GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS COPRODUTOS

Nessa seção, é exposta a metodologia para o cálculo da energia total disponível com a queima das cascas e fibras para a geração de energia

Para as emissões da queima das cascas e fibras, utilizadas para a geração de energia juntamente com o bagaço da cana-de-açúcar, a metodologia de cálculo é a mesma adotada para a queima de bagaço, apresentada no item 9.2.1 (E.IX).

O fluxo de entrada de cachos de fruto fresco na usina é de 30 toneladas por hora. Sabendo que cada tonelada de CFF gera 135 kg de fibras e 60 kg de cascas, a alimentação da caldeira é de 4050 e 1800 kg de fibras e de cascas por hora, respectivamente.

A metodologia de cálculo para a geração de energia a partir das cascas e fibras foi baseada em Mahlia et al. (2001). Segundo esse autor, para o poder calorífico inferior das cascas e fibras, considera-se 35% de umidade nas fibras e 10% de umidade nas cascas. A eficiência da caldeira é de 68%, resultando em energia disponível efetiva, por tonelada de CFF, de 1,04 GJ e 0,71 GJ para fibras e cascas, respectivamente (Tabela 21).

Tabela 21. Valores e considerações adotados para cálculo de energia disponível nas cascas e fibras.

	Fibra	Casca	Unidade
Quantidade (fluxo)	135,00	60,00	kg/h
Valor bruto de energia	17,42	19,46	MJ/kg
Poder calorífico inferior	11,32	17,52	MJ/kg
Potencial de conversão de energia	45.863,42	31.528,44	MJ/h
Potencial de conversão de energia	1.528,78	1.050,95	MJ/t CFF
Energia disponível	31.187,12	21.439,34	MJ/h
Energia disponível efetiva	1.039,57	714,64	MJ/t CFF

Fonte: Mahlia et al. (2001).

B. IX: USO

O uso do biodiesel de dendê ocorre no próprio complexo agroindustrial (SIEB) através da substituição total (100%) do diesel pelo biocombustível. A descrição da metodologia utilizada para avaliar a substituição do combustível fóssil está apresentada no item 9.6.

9.3. Indicadores de eficiência energética

Os indicadores de eficiência energética (IEE) foram calculados através do balanço de energia (*input* e *output*) para os dois modelos propostos, somente etanol e etanol mais biodiesel.

Estudos têm aplicado métodos de ciclo de vida para avaliar os desempenhos energético e ambiental de produtos e sistemas, entre eles a Análise Energética do Ciclo de Vida (AECV) e a Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida (AACV) (Malça et al., 2003; Malça & Freire, 2006).

Para tanto, diversos indicadores têm sido utilizados para caracterizar a eficiência energética de biocombustíveis. Os indicadores de eficiência energética (IEE) utilizados neste trabalho foram: Razão de Energia Líquida (NER), Eficiência em Energia Renovável (EER).

9.3.1. Razão de energia líquida (NER)

O balanço de energia líquida (NER, sigla em inglês) é dado pela razão entre a energia de saída e a energia de entrada, tal como apresentado na equação abaixo:

$$NER = \frac{E_{saída}}{E_{entrada}} \quad (40)$$

Onde, a energia líquida de saída, $E_{saída}$, inclui somente a energia excedente dos coprodutos, mais aquela referente ao poder calorífico inferior dos biocombustíveis, MJ/ha.ano. A energia líquida de entrada, $E_{entrada}$, inclui as energias descontadas do consumo proveniente da própria unidade de cogeração de energia, MJ/ha.ano.

O consumo total energético em NER, ou seja, a energia de entrada consumida para a produção do etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê foi calculada através da soma das equações de energia apresentadas nos itens 9.2.1 e 9.2.2.

9.3.2. Eficiência em energia renovável (EER)

O indicador de eficiência em energia renovável (EER), proposto por Sheehan et al. (1998) e Malça e Freire (2006), é dado por:

$$EER = \frac{(E_{saída} - E_{entrada, \text{fóssil, prim}})}{E_{saída}} \quad (41)$$

Nesse caso, a eficiência energética está relacionada com a razão da diferença entre a energia líquida de saída, $E_{saída}$ (MJ/ha.ano), e a energia líquida de entrada fóssil primária (MJ/ha.ano) pela energia de saída (MJ/ha.ano).

Esse indicador mede a fração da energia final do combustível obtida através dos recursos renováveis. Entre 0 e 1, o combustível é renovável, e maior será quanto mais próximo de um. Se o valor for inferior a zero, indica a não renovabilidade.

9.4. Emissões de gases de efeito estufa

Foram estimadas as emissões evitadas com a substituição do consumo de combustíveis fósseis – etapas de transporte, tratos culturais e operações agrícolas – por biodiesel de dendê no ciclo de vida do etanol hidratado de cana-de-açúcar.

Para este estudo, as emissões consideradas foram os gases de efeito estufa CO_2 , CH_4 e N_2O . Esses foram quantificados em termos de CO_2e (dióxido de carbono equivalente), de forma a associar o potencial impacto de aquecimento global (GWP, sigla em inglês) dos GEE em termos de CO_2 . Para este estudo considerou-se GWP de 23 e 296, para o metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), respectivamente (IPCC, 2006a), sendo o CO_2 igual a 1.

Dessa forma, a redução das emissões de GEE do sistema integrado comparado ao sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar é dada por:

$$\text{Redução de GEE (\%)} = \frac{\text{GEE sistema convencional} - \text{GEE sistema acoplado}}{\text{GEE sistema convencional}} \quad (42)$$

As metodologias para o cálculo total das emissões ao longo do ciclo de vida dos sistemas em estudo, contabilizado em termos de dióxido de carbono equivalente, estão apresentados nos itens 9.2.1 e 9.2.2.

Foram ainda avaliadas as emissões evitadas com a substituição do etanol de cana-de-açúcar por gasolina e biodiesel de dendê por diesel, bem como as emissões evitadas com a substituição da energia elétrica excedente gerada a partir dos coprodutos (cogeração) pela energia elétrica produzida no Brasil. Para essa condição, foi adotado o valor médio de emissões de GEE do mix energético brasileiro (IEA, 2009).

9.5. Emissões de GEE devido à mudança no uso do solo

As emissões referentes à mudança no uso do solo (LUC, sigla em inglês, *Land Use Change*) foram computadas a partir do conhecimento do estoque de carbono no ecossistema substituído e estoque de carbono na cultura implantada.

Utilizou-se como referência de estoque de carbono dados de Gibbs et al. (2008) para a palma de dendê (solo e biomassa), Lardy et al. (2001) para estoque de carbono no solo dos biomas de Cerrado e Cerradão, Galdos (2007) para carbono no solo da cana-de-açúcar crua e queimada, Ottmar et al. (2001) para estoque de carbono na biomassa dos biomas Cerrado e Cerradão, estimativa VPB para estoque de carbono na biomassa da cana-de-açúcar queimada e crua, Rangel et al. (2007) para estoque de carbono no solo de pastagens degradadas e Szakács et al. (2003) para carbono na biomassa da pastagem degradada. Essas referências, com exceção da palma, foram citadas por Amaral et al. (2008).

A diferença entre o estoque de carbono dos ecossistemas, dividida pela unidade temporal do estudo, resulta na estimativa de emissão anual de carbono. A unidade temporal considerada foi de 30 anos, tempo de vida completo da palma de dendê. Assim, temos que:

$$GEE_{LUC} \left(\frac{tCO_2}{ha.ano} \right) = \{C_{ls} - [(C_{cq} \cdot f_q) + (C_{cc} \cdot f_c)]\} \cdot \frac{1}{t_{et}} \cdot \frac{44}{12} \quad (43)$$

Onde, C_{ls} é o estoque de carbono no ecossistema a ser substituído, tC/ha; C_{cq} e C_{cc} , o estoque de carbono na cana-de-açúcar queimada e crua, respectivamente, tC/ha; f_q e f_c , a porcentagem de cana-de-açúcar queimada e crua, respectivamente, %; t_{et} , o tempo adotado no escopo temporal, anos.

Foram consideradas as substituições dos seguintes ecossistemas: Cerrado, Cerradão e pastagem degradada.

9.5.1. Tempo de retorno de carbono para o ecossistema (ECPT)

O tempo de retorno do carbono para o ecossistema (ECPT, sigla em inglês) consiste em uma metodologia para avaliar e comparar a *performance* ambiental de biocombustíveis em relação aos efeitos diretos relacionados com a mudança no uso do solo e o balanço geral de carbono. Diferentes estudos, recentemente publicados, têm aplicado esse conceito (Fargione et al., 2008; Gallagher, 2008; Searchinger et al., 2008; Gibbs et al., 2008). Para este trabalho, adaptou-se o método apresentado por Gibbs et al. (2008), definido por “Ecosystem Carbon Payback Time – ECPT”, que corresponde ao tempo necessário, dado em anos, para compensar o déficit no estoque de carbono ocasionado pela substituição do ecossistema anterior pelo plantio de espécies energéticas. Além disso, relaciona as emissões evitadas devido à substituição do combustível fóssil pelo biocombustível. Assim, o ECPT é dado por:

$$ECPT (anos) = \frac{C_{ls} - [(C_{cq} \cdot f_q) + (C_{cc} \cdot f_c)]}{[(FE_{d,g} \cdot PCI_{d,g}^{-1} \cdot P_e \cdot PCI_{b,e}) - (GEE_{ACV_{b,e}})] \cdot \frac{12}{44}} \quad (44)$$

Onde, C_{ls} é o estoque de carbono no ecossistema a ser substituído, tC/ha; C_{cq} e C_{cc} , o estoque de carbono na cana-de-açúcar queimada e crua, respectivamente, tC/ha; f_q e f_c , a porcentagem de cana-de-açúcar queimada e crua, respectivamente, %; FE , o fator de emissão dos combustíveis substituídos, diesel (d) para avaliar o biodiesel de palma de dendê ou gasolina (g) para avaliar o etanol de cana-de-açúcar, kg CO₂e/kg combustível; PCI , o poder calorífico dos combustíveis, diesel (d), gasolina (g), biodiesel (b) e etanol (e), MJ/kg combustível; P_e , a produtividade de etanol de cana-de-açúcar, litros etanol/ha.ano; e GEE , as emissões atribuídas ao ciclo de vida dos biocombustíveis em estudo, biodiesel (b) e etanol (e), kg CO₂e/ha.ano.

Para o ECPT do biodiesel de dendê, o segundo termo do numerador da equação (44) corresponde ao estoque de carbono no ecossistema palma de dendê. Além disso, o termo P_e é

substituído por $P_{CPO} \cdot \eta_{O \rightarrow B}$, onde P_{CPO} é a produtividade de óleo de palma, kg óleo/ha.ano, e $\eta_{O \rightarrow B}$, a eficiência de conversão de óleo em biodiesel.

Para o sistema integrado, no segundo termo do numerador da equação (44) é feita a relação de área corresponde à cana-de-açúcar e dendê, conforme apresentado no item 9.7, equação (46).

Nesse sentido, foi computado o impacto em função da mudança direta no uso do solo devido à implantação das culturas de dendê e cana-de-açúcar.

Foram consideradas as substituições dos seguintes ecossistemas: Cerrado, Cerradão e pastagem degradada.

9.6. Sistema integrado de produção de biocombustíveis

Após levantamento do inventário do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê, foi possível construir o cenário para a produção acoplada desses biocombustíveis onde a total substituição do diesel por biodiesel de dendê foi considerada.

Dessa forma, a demanda energética atribuída ao sistema integrado (SIEB), no que diz respeito ao consumo de combustíveis fósseis, é dada por:

$$SIEB_{comb.fossil} \left(\frac{MJ}{ha.ano} \right) = f_s \cdot C_{cf} \cdot \frac{PCI_d}{PCI_b} \cdot E_{entrada} \cdot \frac{1}{P_{CPO} \cdot (\eta_{O \rightarrow B})} + [E_{cf} \cdot (1 - f_s)] \quad (45)$$

Onde, o f_s é a porcentagem de substituição de diesel por biodiesel, %; C_{cf} , o consumo total de diesel no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, kg/ha.ano; PCI , o poder calorífico inferior do diesel (d), e biodiesel (b), MJ/kg combustível; $E_{entrada}$ é a energia líquida do *input* para produção de biodiesel de dendê (ciclo de vida), MJ/ha.ano; P_{CPO} , a produtividade de óleo de dendê, kg óleo/ha.ano; $\eta_{O \rightarrow B}$, a eficiência de conversão de óleo de dendê em biodiesel; e E_{cf} , a energia total consumida a partir de combustível fóssil (diesel) nas etapas de tratamentos culturais, colheita, transporte e disposição de coprodutos, MJ/ha.ano.

Para o cálculo das emissões do sistema integrado, a quantificação é feita com base nas emissões atribuídas ao ciclo de vida do diesel total consumido e, as emissões do ciclo de vida do biodiesel total consumido necessário para suprir a mesma quantidade de energia disponibilizada pelo diesel.

9.7. Área de palma requerida para suprir a demanda de combustível

A área de palma requerida para fornecer o óleo para a produção do biodiesel necessário à substituição do combustível fóssil (diesel) consumido no ciclo de vida do sistema integrado é dada por:

$$\frac{\text{Hectares de dendê}}{\text{Hectares de cana}} = \left(\frac{C_{cf} \cdot PCI_d}{PCI_b \cdot P_{CPO} \cdot \eta_{O \rightarrow B}} \right)_{CVE} + \left(\frac{C_{cf} \cdot PCI_d}{PCI_b \cdot P_{CPO} \cdot \eta_{O \rightarrow B}} \right)_{CVB} \quad (46)$$

Onde, C_{cf} é o consumo total de diesel no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar (CVE) e biodiesel de dendê (CVB), kg/ha.ano; PCI é o poder calorífico do diesel (d) e biodiesel (b), MJ/kg; P_{CPO} , a produtividade de óleo de dendê, kg óleo/ha.ano; $\eta_{O \rightarrow B}$ é a eficiência de conversão de óleo de palma em biodiesel, %.

9.8. Alocação

De acordo com a norma ISO 14044:2006, a alocação consiste em distribuir os fluxos de entrada e saída de um processo, ou qualquer sistema de produto, de forma a identificar os *inputs* e *outputs* que correspondem ao sistema de produto em estudo.

O tipo de alocação exerce grande influência sobre o resultado final da ACV (Malça; Freire, 2006). Ela pode ser realizada a partir da massa, conteúdo de carbono, conteúdo de energia, valor de mercado ou volume (Gnansounou et al., 2009). A alocação por energia é mais comumente empregada em estudos de biocombustíveis, muito utilizada pelo Departamento Americano de Agricultura (USDA) e pelo “Argonne National Laboratory”, que pertence ao Departamento de Energia dos EUA e é o responsável pelo desenvolvimento do modelo GREET¹⁰.

Diferentes metodologias foram adotadas para a alocação do biodiesel de dendê e etanol de cana-de-açúcar, explicadas separadamente a seguir.

a) Etanol de cana-de-açúcar

O etanol pode ser produzido tanto da fermentação do caldo de cana quanto de misturas de caldo e melaço. A produção de álcool por tonelada de cana a partir do melaço é cerca de quatro vezes inferior àquela resultante do caldo direto, no entanto, além do álcool e eletricidade, tem-se o açúcar como produto final (BNDES & CGEE, 2008).

¹⁰ Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) model.

Por esse motivo, o balanço de energia e as emissões de gases de efeito estufa sofrem variação conforme o escopo adotado pela usina sucroalcooleira quanto à proporção de cana-de-açúcar enviada para produção de açúcar e/ou etanol.

Dessa forma, foram adotados diferentes cenários com relação à quantidade de cana destinada à produção de etanol. Para tanto, foi utilizada a metodologia de Gopal e Kammen (2009) cujo trabalho teve por objetivo avaliar as emissões finais do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar em função do escopo da usina. Para este trabalho, a metodologia dos autores foi adaptada para avaliar a razão de energia líquida, além de terem sido realizadas diferentes considerações para as emissões de saída e energias de entrada.

a.1) Razão de energia líquida

As fórmulas necessárias ao cálculo da razão de energia líquida (NER), nessas condições de alocação, estão apresentadas nas equações (47) a (51).

$$\text{Razão de energia líquida} \left(\frac{MJ_{out}}{MJ_{in}} \right) = \frac{E_{ex} + P_e}{DE_{ACV}} \quad (47)$$

Onde, E_{ex} é a energia elétrica excedente, cenário 1 ou cenário 2, (MJ/ha.ano); P_e , a produtividade, em termos de energia, do etanol (MJ_t/ha.ano); e DE_{ACV} , a demanda energética total no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, tradicional ou integrado, dada por:

$$DE_{ACV} \left(\frac{GJ}{ha.ano} \right) = DE_{A_e} + [(DE_{A_a} + DE_{I_a}) \cdot a] + DE_{I_e} \quad (48)$$

Onde, a refere-se à porcentagem de alocação; DE_{A_a} e DE_{I_a} são as demandas energéticas na fase agrícola e fase industrial para a produção de açúcar, respectivamente (GJ/ha.ano); e DE_{A_e} e DE_{I_e} são as demandas energéticas na fase agrícola e fase industrial para a produção do etanol, respectivamente (GJ/ha.ano), dadas por:

$$DE_{A_e} \left(\frac{GJ}{ha.ano} \right) = DE_{A_e} \cdot (1 - f) \quad (49)$$

ou

$$DE_{I_e} \left(\frac{GJ}{ha.ano} \right) = DE_{I_e} \cdot (1 - f)$$

e

$$DE_{A_a} \left(\frac{GJ}{ha.ano} \right) = DE_{A_a} \cdot f \quad (50)$$

ou

$$DE_{I_a} \left(\frac{GJ}{ha.ano} \right) = DE_{I_a} \cdot f$$

Onde, f é fração de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar.

A alocação a é dada pela equação (51):

$$a \text{ (alocação, \%)} = \left\{ \frac{\left[\frac{1-\eta_s}{m_m} \right]}{\left[\frac{1-\eta_s}{m_m} \right] + \left(\frac{1}{m_s} \right)} \right\} \quad (51)$$

Onde, η_s é eficiência de produção de açúcar final (t açúcar final/t açúcar recuperável); m_s é tonelada de sacarose no açúcar final/tonelada de açúcar final; m_m é tonelada de açúcar fermentável em melaço/tonelada de melaço padrão.

Os valores adotados para a alocação das emissões de GEE e energia de entrada para ambos os sistemas estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Parâmetro adotados para a alocação das emissões de GEE e entrada de energia

η_s	t açúcar final/t açúcar recuperável	0,94
m_m	t açúcar fermentável em melaço padrão/t melaço padrão	0,63
m_s	teor de sacarose (t sacarose/t açúcar final)	0,99

a.2) Emissões de gases de efeito estufa

Para aplicação da metodologia de alocação para as emissões de GEE, são válidas as mesmas equações apresentadas no item anterior (equações (48) a (51)). No entanto, foi realizada a alocação da energia elétrica excedente antes de aplicar a alocação referente ao escopo da usina.

Para o cenário 1, a energia elétrica correspondeu a 0,17% do total de energia gerada no ciclo de vida. Para o cenário 2, a energia excedente foi de 11% da energia total de saída. Ou seja, parte das emissões do ciclo de vida do etanol (etapas agrícola e industrial) foi alocada, nessas proporções, para a geração da energia elétrica excedente.

b) Biodiesel de dendê

A energia de entrada e as emissões de saída foram alocadas em função da massa total dos coprodutos do biodiesel, torta de palmiste e óleo de palmiste. Esses dois coprodutos representam 5,2% da massa total dos cachos de fruto fresco. Para a glicerina, a alocação corresponde a 7,9% da massa total gerada na etapa de transesterificação, que inclui a glicerina e o biodiesel. Os demais coprodutos (cascas e fibras) não foram alocados, pois esses foram consumidos para geração de energia e irrigação (POME).

Dessa forma, 5,2% da energia total de entrada e emissões totais de saída da fase agrícola foram alocadas para a torta de palmiste e óleo de palmiste. Para a fase industrial, 7,9% da energia total de entrada e emissões totais de saída foram alocadas para a glicerina.

9.9. Local de estudo

Para os inventários relacionados ao etanol, foram selecionadas três usinas localizadas no Estado de São Paulo com características que mais se aproximem das condições de Cerrado. Para o biodiesel de dendê, os dados foram levantados na empresa Agropalma, localizada no estado do Pará.

No Brasil, apenas a Região Amazônica e uma estreita faixa do litoral da Bahia respondem favoravelmente às exigências edafoclimáticas da cultura do dendê. Além disso, certas áreas no norte, nordeste (grande parte) e centro-oeste também atendem às exigências da cultura, com exceção dos índices pluviométricos exigidos (Lima et al., 2000).

No entanto, experimento conduzido com a planta no Cerrado brasileiro, localizado em Planaltina/DF, sob condições de irrigação, tem demonstrado que o dendê é uma oleaginosa promissora para a região de Cerrado (Azevedo et al., 2008).

9.10. Fatores de emissão de GEE e fatores de intensidade energética

Os fatores de emissão de GEE e fatores de intensidade energética, referentes à produção e uso de todos os insumos e materiais utilizados no ciclo de vida da cultura de cana-de-açúcar e de palma de dendê, estão dispostos no APÊNDICE A.

10. RESULTADOS

Como o objetivo do trabalho foi avaliar e comparar o sistema tradicional do etanol de cana-de-açúcar com um sistema cujo consumo do combustível fóssil das etapas agrícolas foi substituído pelo biodiesel de dendê, os resultados para o etanol foram detalhadamente apresentados neste capítulo. Para o biodiesel de dendê, as tabelas de resultados estão dispostas do APÊNDICE C ao APÊNDICE F.

10.1. Definição do objetivo do estudo de ACV

A avaliação do ciclo de vida apresentada neste estudo teve por objetivo avaliar e comparar o balanço energético, as emissões de gases de efeito estufa e aspectos de mudança no uso do solo, por meio de indicadores, do sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar e sistema integrado de produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê.

A razão para este estudo se foca em propor uma melhoria do desempenho ambiental no ciclo de vida do etanol brasileiro, principalmente relacionado ao elevado consumo de diesel.

A partir disso, as informações aqui apresentadas possuem o intuito de servir como diretrizes para futuras tomadas de decisão e como um banco de informações para posteriores estudos sobre biocombustíveis. Além disso, tem como público-alvo empresas do setor de bioenergia.

10.2. Definição do escopo do estudo de ACV

A seguir, estão descritos os itens fundamentais ao estudo de ciclo de vida, conforme norma ISO 14.044:06.

Sistema de produto: O escopo é apresentado de forma a descrever o sistema de produto proposto. O volume de controle do sistema de produto refere-se a uma avaliação do tipo “*well to tank*”, como descrito no item 9.1d. Os subsistemas foram apresentados separadamente, divididos em 10 volumes de controle, sendo eles:

1. Produção de mudas e sementes
2. Produção e uso de insumos agrícolas
3. Tratos culturais (válido somente para o etanol de cana-de-açúcar)
4. Colheita e transporte
5. Fabricação e manutenção de máquinas e implementos agrícolas
6. Transporte e disposição de coprodutos
7. Fabricação e uso de insumos industriais

8. Fabricação e manutenção de equipamentos e construção industrial
9. Geração de energia a partir dos coprodutos
10. Uso (válido somente para o biodiesel de dendê)

Função do sistema de produto 1: produzir etanol de cana-de-açúcar configurado em um sistema integrado a uma usina de biodiesel etílico de dendê, sendo esse para consumo interno e de cultivo sob condições de Cerrado, Cerradão e Pastagem degradada.

Função do sistema de produto 2: produzir etanol de cana-de-açúcar configurado em um sistema tradicional de produção, com cultivo de cana-de-açúcar sob condições de Cerrado, Cerradão e Pastagem degradada.

A função do produto etanol de cana-de-açúcar é fornecer combustível para automóveis de ciclo Otto, e a função do produto biodiesel de dendê é ofertar combustível para substituir totalmente (100%) o consumo de diesel em veículos de ciclo Diesel do ciclo de vida do produto etanol referido neste estudo (etapas agrícolas).

Fronteiras do sistema: abrange o ciclo de vida dos insumos químicos, tanto agrícolas quanto industriais, bem como os principais materiais utilizados na construção de máquinas, equipamentos e implementos, relacionado à intensidade energética e emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, inclui a intensidade energética e emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do diesel de petróleo consumido nos tratos culturais e transporte das matérias-primas em estudo, dendê e cana, bem como seus coprodutos, vinhaça, torta de filtro e CFV. Não inclui o transporte dos insumos até as unidades de processamento uma vez que o local de compra dos insumos é variável.

Unidade Funcional: 7.555,37 litros de etanol de cana-de-açúcar.

Fluxo de Referencia Sistema Tradicional: 1 hectare de cana-de-açúcar.

Fluxo de Referencia Sistema Integrado: 1,12 hectares de cana-de-açúcar e 0,14 hectares de dendê.

Procedimentos de alocação: conforme descrito no item 9.8.

Metodologia de AICV e tipo de Impactos: foram avaliados três fatores de sustentabilidade, balanço de energia, balanço de emissões de gases de efeito estufa e tempo de retorno de carbono ao ecossistema. Descrições detalhadas da metodologia conforme descritas no capítulo 9.

Requisitos de dados: Os dados primários foram levantados através de observação direta extensiva por meio de questionários, com posterior verificação quanto à realidade das informações através de constatações em literatura, por meio de artigos científicos, e auxílio de especialistas da área.

Para a realização do inventário de emissões líquidas de GEE, foram coletados dados secundários através de observação sistemática de dados bibliográficos. Os indicadores de intensidade energética e fatores de emissão de gases de efeito estufa foram extraídos de banco de dados de ciclo de vida disponível em *softwares* e artigos científicos.

Pressupostos:

- Vegetação de Cerrado e Cerradão estabelecida antes das culturas de dendê e cana-de-açúcar. Além disso, foi avaliada uma condição de pastagem degradada antecedendo aos plantios culturais.

- O nível tecnológico adotado para o cenário 1, com relação à eficiência da caldeira, tende ao ser substituído pelo cenário 2, cuja eficiência é maior. Para as máquinas agrícolas, implementos e tratores, o nível tecnológico varia de 5 a 8 anos, que corresponde ao tempo de vida, conforme indicado no item 9.2.1.

- Algumas considerações adotadas podem variar em função de novas tecnologias ou por ações legais, tais como: concentração da vinhaça para reduzir o consumo de diesel no transporte; aumento da produtividade tanto do dendê quanto da cana-de-açúcar; uso das folhas e ponteiros da cana para geração de energia, juntamente com o bagaço; uso de bagaço e palhas da cana para produção de etanol lignocelulósico; mudança de tecnologia de geração de energia de cogeração para gaseificação; aumento da mecanização devido à proibição de queimadas da palha da cana, dentre outros. No entanto, a maioria dessas tecnologias ainda está em fase de estudo e há controvérsias com relação à viabilidade econômica e técnica para implantação.

- Não foi considerada, para este estudo, a rotação de cultura, uma vez que a entrada de energia e as emissões atribuídas seriam alocadas e não trariam efeitos para os resultados finais. Além disso, por se tratar de um estudo comparativo, sistema tradicional e integrado, esses valores se anulariam devido à igualdade.

- O estudo se inicia a partir do quarto ano da cultura de dendê, quando a planta começa sua produção de cachos de dendê. Ou seja, um ciclo de 27 anos de vida útil.

- Como o ciclo do dendê é de 27 anos e o ciclo da cana-de-açúcar é de 6 anos, o escopo temporal adotado para ciclo de vida do sistema integrado foi de 27 anos. Ou seja, dentro desse período são possíveis 4 ciclos de 6 anos de cana-de-açúcar (24 anos) mais 3 anos de rotação de cultura. Lembrando que a rotação somente não foi considerada em termos de quantificação da demanda energética e emissões de GEE, no entanto, na prática ela existe e ocupa um determinado período.

Limitações do estudo: as principais limitações encontradas referiram-se ao banco de dados utilizado para a intensidade energética e fator de emissão, já que esse retrata a realidade europeia ou americana. Exceção é encontrada para os fatores de intensidade energética do aço e cimento, que retratam a realidade brasileira.

Outro fator importante é que, mesmo com a utilização de *softwares* de banco de dados, alguns insumos utilizados no ciclo de vida dos biocombustíveis não foram considerados devido à ausência de informações. No entanto, eles não se incluem entre os insumos mais representativos (ver item 9.2.1, “Fabricação e uso de insumos industriais”).

10.3. Inventário do ciclo de vida do etanol hidratado de cana-de-açúcar

A etapa de inventário foi conduzida de forma a atender aos objetivos, o que levou ao levantamento de dados para os dois sistemas propostos:

I) Etanol hidratado de cana-de-açúcar produzido sob os moldes tradicionais brasileiros.

II) Produção integrada de biodiesel de dendê e etanol de cana-de-açúcar, considerando o etanol como produto principal e a bioeletricidade, açúcar, vinhaça, torta de palmiste, óleo de palmiste e a glicerina como produtos secundários.

Esses inventários foram realizados segundo as técnicas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), estabelecidas pela Norma ISO 14044:2006.

O inventário do biodiesel de dendê encontra-se nos apêndices deste trabalho, bem como os fatores de emissão e indicadores de intensidade energética utilizados.

O inventário para o etanol hidratado de cana-de-açúcar está detalhado a seguir.

10.3.1. Insumos agrícolas

O consumo de todos os insumos agrícolas da cultura de cana-de-açúcar foi coletado em campo e se refere à média entre as usinas visitadas, apresentados na Tabela 23.

Tabela 23. Taxa de aplicação dos insumos agrícolas e vinhaça.

Insumo agrícola	Valor aplicado (kg/ha.ano)	Cana-planta	Cana-soca c/ vinhaça	Cana-soca s/ vinhaça
Nitrogênio (N)	58,7	47,50	72,50	87,50
Fósforo (P ₂ O ₅)	20,63	101,30	0,00	23,00
Potássio (K ₂ O)	30,39	101,30	0,00	101,30
Calcário	400	-	-	-
Herbicidas	5,00	-	-	-
Inseticida	2,00	-	-	-
Vinhaça				
Taxa de aplicação (m ³ /ha)	140,00	-	-	-
Área atendida com vinhaça	76%	-	-	-

A média da produtividade de cana-de-açúcar entre as usinas foi de 89 toneladas de cana-de-açúcar por hectare. Para o etanol, a produtividade média foi de 7.555 litros por hectare. As demais considerações e produtividades adotadas neste estudo estão apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24. Produtividade da cana-de-açúcar, etanol e coprodutos.

Cana-de-açúcar	
Cana-de-açúcar (tc/ha.ano)	88,89
Plantio cana-de-açúcar (t/ha)	12
Ciclo (anos)	6
Número de cortes	5
Etanol	
Etanol (l/ha.ano)	7.555,37
Etanol (l/t cana-de-açúcar)	85
Coprodutos	
Bagaço (t/ha.ano)	24
Torta de filtro (kg/t cana-de-açúcar)	23,87
Vinhaça (l/l etanol)	14,00
Vinhaça (m ³ /ha)	106,00

10.3.2. Consumo de combustível

É nesta etapa que ocorre a variação no inventário de demanda energética e emissões de GEE entre o sistema tradicional e sistema integrado. O consumo, em litros, do diesel não equivale ao biodiesel devido à diferença entre os valores de poder calorífico. Dessa forma, o consumo de combustível, para ambos os sistemas, estão apresentados separados nas tabelas a seguir.

O consumo de combustível adotado para a etapa agrícola da cana-de-açúcar está apresentado por tipo de atividade: tratos culturais, colheita e transporte da cana-de-açúcar. Todas as informações foram coletadas em campo.

Tratos culturais

A Tabela 25 apresenta o consumo médio de diesel e biodiesel para todas as etapas de tratos culturais de cana-planta e soqueira (média das usinas visitadas).

Tabela 25. Consumo de diesel e biodiesel na etapa de tratos culturais.

Estágio cana-de-açúcar	Equipamento (marca e modelo)	litros/h	ha/h	l/ha
Cana Planta				
Aplicação de calcário	MF-290	7,50	2,50	3,00
Incorporação dos restos culturais	Valmet 1280 R	12,00	1,00	12,00
Aração pesada I	Valmet BH 180	16,50	0,57	28,95
Subsolagem	Valmet BH 180	17,50	0,85	20,59
Gradagem pesada (I) - disco (16x32)	Valmet BH 180	14,00	0,65	21,54
Gradagem Intermediária (II) - disco (24x28)	Valmet BH 180	12,00	1,00	12,00
Gradagem niveladora (III) - disco (40x26)	Valmet BH 180	10,00	1,20	8,33
Sulcamento	MF-660	13,00	0,85	15,29
Fechamento sulcos e aplic. de inseticidas	MF-275	7,00	1,00	7,00
Aplicação de herbicidas	Ford 4610	9,00	2,50	3,60
Quebra lombo	Valmet 880	7,50	1,20	6,25
Total Cana-planta				23,09
Cana Soca				
Incorporação dos restos culturais	Valmet 1280	12,00	1,00	12,00
Aplicação de herbicidas	Ford 4610	9,00	2,50	3,60
Total ciclo cana-soca				10,40
Total diesel cana ciclo completo (l/ha.ano)				33,49
Total biodiesel cana ciclo completo (l/ha.ano)				37,73

Colheita da cana-de-açúcar

Os valores adotados para a capacidade operacional e consumo específico da colhedora, da carregadora, do transbordo e do reboque de Julieta estão dispostos na Tabela 26.

Tabela 26. Capacidade operacional e consumo específicos de diesel para a etapa de colheita.

Tipo de maquinário	Capacidade Operacional		Consumo específico	
	tc/h	ha.ano/h*	litros/h	litros/ha.ano
Colhedora Case A 7000	45,00	0,5063	38,00	75,06
Carregadora Santal	60,00	0,6750	10,00	14,81
Transbordo/Reboque de Julieta	40,00	0,4500	9,00	20,00

* tc/h x ha.ano/tc

O consumo de diesel e biodiesel total por tipo de colheita (aplicada à consideração de proporções de taxa de mecanização) está apresentado na Tabela 27.

Tabela 27. Consumo de diesel e biodiesel total para a etapa de colheita.

	%	Consumo diesel e biodiesel por tipo de colheita (l/ha)
Fração de colheita ocorrida no ciclo	83	
Cana-de-açúcar colhida crua	40	38,02
Cana-de-açúcar colhida queimada	60	20,89
Consumo final diesel (l/ha.ano)		49,09
Consumo Final Biodiesel		55,30

Transporte da cana-de-açúcar

O transporte da cana-de-açúcar é realizado por três tipos de caminhão: Treminhão, Rodotrem ou Romeu e Julieta. A Tabela 28 apresenta a contribuição de cada tipo de caminhão no transporte da cana-de-açúcar, sua capacidade de carga e o consumo específico do diesel (média das usinas visitadas) e biodiesel.

Tabela 28. Considerações e consumo de diesel e biodiesel para o transporte da cana-de-açúcar.

Distância média da usina ao campo	26,00	km		
Fração de transporte ocorrida no ciclo	83%			
	Unidade	Treminhão	Rodotrem	Romeu e Julieta
Contribuição de cada tipo de caminhão no transporte da cana-de-açúcar	-	20%	20%	60%
Capacidade de carga caminhão	toneladas	60,00	80,00	35,00
Número de viagens para transporte	unidade	1,48	1,11	2,54
Número de viagens (arredondado)	unidade	2,00	2,00	3,00
Distância total percorrida	km	52,00	52,00	78,00
Consumo específico (vazio)	km/l	1,50	1,50	3,00
Consumo específico (cheio)	km/l	1,30	1,30	2,50
Consumo combustível (vazio)	litros	34,67	34,67	26,00
Consumo combustível (cheio)	litros	40,00	40,00	31,20
Consumo Total	l/ha	74,67	74,67	57,20
Consumo Final Diesel	l/ha.ano		53,49	
Consumo Final Biodiesel	l/ha.ano		60,25	

Disposição dos coprodutos

A Tabela 29 apresenta o consumo total de diesel e biodiesel para a disposição dos coprodutos, vinhaça e torta de filtro, na lavoura.

Tabela 29. Consumo total de diesel e biodiesel para a etapa de disposição dos coprodutos

Coproducto	Consumo combustível por área (l/ha.ano)
Vinhaça	
Aplicação por aspersão (canal)	6,07
Aplicação por caminhão	79,40
Consumo diesel total	85,46
Consumo biodiesel total	96,27
Torta de Filtro	
Consumo diesel total	84,38
Consumo biodiesel total	95,05

10.3.3. Máquinas e implementos agrícolas

A demanda energética e as emissões de gases de efeito estufa para os maquinários, implementos e caminhões estão apresentadas nas Tabela 30 a Tabela 34.

A densidade média de utilização, D_{mu} , se diferencia entre os tipos de maquinários e sua metodologia foi desenvolvida para este trabalho, com exceção da densidade adotada para os implementos, cujo valor foi referenciado de Boddey et al. (2008). Essa densidade se refere à área total atendida por cada unidade de trator, caminhão ou implementos, onde a unidade corresponde à massa total desse maquinário.

A massa em aço corresponde à proporção de aço inoxidável considerada para cada um dos maquinários, 82% e 94% para os tratores e caminhões, respectivamente (Boddey et al., 2008). Para os implementos, considera-se que 100% é aço inoxidável.

A energia demandada para a manutenção dos implementos corresponde a 31% da energia total consumida na fabricação desses equipamentos mais a energia atribuída ao aço inoxidável.

A demanda energética total conferida aos implementos foi de 1.018 MJ/ha, que dividido pelo tempo de vida desses equipamentos, 8 anos, resulta em 127 MJ/ha.ano.

Para as emissões, não foram incorporadas aquelas referentes à fabricação dos implementos. Dessa forma, as emissões totais são correspondentes somente à produção do aço inoxidável.

As emissões atribuídas à manutenção correspondem a 31% das emissões totais para a produção do aço inoxidável.

As emissões totais aferidas aos implementos foram de 20,2 kg CO₂e/ha, que dividido pelo tempo de vida desses equipamentos, 8 anos, resulta em 2,53 kg CO₂e/ha.ano (Tabela 30).

Tabela 30. Inventário da demanda energética e emissões de GEE dos implementos.

Massa total (kg)	9114,00
Densidade média de utilização (kg/ha)	12,40
Energia (MJ/ha) ¹⁾	670,89
Fabricação (MJ/ha) ²⁾	106,89
Manutenção (MJ/ha) ³⁾	240,33
Total energia (MJ/ha.ano)	127,26
Emissões do aço inoxidável (kg CO ₂ e/ha) ⁴⁾	15,46
Manutenção (kg CO ₂ e/ha) ³⁾	4,78
Total anual (kg CO₂e/ha.ano) ⁵⁾	2,53

¹⁾ A intensidade energética do aço inoxidável é 2,39 vezes a energia do aço leve (Pimentel & Patzek, 2005). Intensidade energética do aço: 22,6 MJ/kg (Brasil, 2009).

²⁾ Energia de fabricação dos tratores: 8,62 MJ/kg (Macedo et al., 2004).

³⁾ Custo de manutenção: 31% (Boddey et al., 2008).

⁴⁾ Fator de emissão aço inoxidável: 1,25 kg CO₂e/kg (Kim & Worrell, 2002).

⁵⁾ Tempo de vida: 8 anos.

A demanda energética para os tratores está apresentada na Tabela 31. A energia total parcial corresponde à soma da energia de fabricação do trator e da intensidade energética atribuída ao aço inoxidável. A energia demandada para a manutenção dos tratores corresponde a 30% dessa energia.

A demanda energética total conferida aos tratores foi de 2.855 MJ/ha, que dividido pelo tempo de vida desses maquinários, 5 anos, resulta em 571 MJ/ha.ano (Tabela 31).

Tabela 31. Inventário da demanda energética para os tratores

Modelo	Massa total (kg)	Massa em aço (kg)	Densidade de utilização (kg/ha)	Energia (MJ/ha)¹⁾	Fabricação (MJ/ha)²⁾	Total Parcial (MJ/ha)	Manutenção (MJ/ha)³⁾	Total por ano (MJ/ha.ano)⁴⁾
MF290	3.200	2.624	2,62	141,97	36,21	178,18	52,92	46,22
Valtra/Valmet 1280 R	6.609	5.419	6,61	357,57	91,20	448,78	133,29	116,41
Valtra/Valmet 880	3.550	2.911	3,55	192,07	48,99	241,06	71,59	62,53
Valmet BH 180	7.500	6.150	7,50	405,78	103,50	509,28	151,26	132,11
MF-660	8.175	6.704	8,18	442,30	112,82	555,11	164,87	144,00
MF-275	3.960	3.247	3,96	214,25	54,65	268,90	79,86	69,75
Total	32.994	27.055	32,42	1753,94	447,37	2201,3	653,79	571,02

¹⁾ A intensidade energética do aço inoxidável é 2,39 vezes a energia do aço leve (Pimentel & Patzek, 2005). Intensidade energética do aço: 22,6 MJ/kg (Brasil, 2009).

²⁾ Energia de fabricação: 13,80 MJ/kg (Macedo et al., 2004).

³⁾ Custo de manutenção: 30% (Boddey et al., 2008).

⁴⁾ Tempo de vida: 5 anos.

Não foram consideradas as emissões para a fabricação dos tratores. Dessa forma, a emissão total parcial inclui somente a produção do aço inoxidável. As emissões conferidas à manutenção dos tratores correspondem a 30% das emissões totais para a produção do aço inoxidável.

As emissões totais atribuída aos tratores foram de 52,4 kg CO₂e/ha, que dividido pelo tempo de vida desses equipamentos, 5 anos, resulta em 10,48 kg CO₂e/ha.ano (Tabela 32).

Tabela 32. Inventário das emissões de GEE para os tratores.

Modelo	Massa total (kg)	Massa em aço (kg)	Densidade de utilização (kg/ha)	Total Parcial (kgCO₂e/ha)¹⁾	Manutenção (kgCO₂e /ha)²⁾	Total por ano (kgCO₂e/ha.ano)³⁾
MF290	3200	2624	2,62	3,27	0,97	0,85
Valtra/Valmet 1280 R	6609	5419	6,61	8,24	2,45	2,14
Valtra/Valmet 880	3550	2911	3,55	4,43	1,31	1,15
Valmet BH 180	7500	6150	7,50	9,35	2,78	2,43
MF-660	8175	6704	8,18	10,19	3,03	2,64
MF-275	3960	3247	3,96	4,94	1,47	1,28
Total	32994	27055,08	32,42	40,41	12	10,48

¹⁾ Fator de emissão aço inoxidável: 1,25 kg CO₂e/kg (Kim & Worrell, 2002).

²⁾ Custo de manutenção: 30% (Boddey et al., 2008).

³⁾ Tempo de vida: 5 anos.

A demanda energética para os transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras está apresentada na Tabela 33. A energia total parcial corresponde à soma da energia de fabricação

desses maquinários e da intensidade energética atribuída ao aço inoxidável. A energia demandada para a manutenção corresponde a 20% dessa energia parcial para transbordo, carregadora e Romeu e Julieta e 30% da energia parcial para colhedoras.

A demanda energética total conferida aos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras foi de 2.035 MJ/ha, que dividido pelo tempo de vida desses maquinários, 5 anos, resulta em 407 MJ/ha.ano (Tabela 33).

Tabela 33. Inventário da demanda energética para a fabricação e manutenção dos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras.

Tipo	D_{mu} (kg/ha)	Energia (MJ/ha)¹	Fabricação (MJ/ha)²	Total Parcial (MJ/ha)	Manutenção (MJ/ha)³	Total anual (MJ/ha.ano)⁴
Transbordo Santal VT-8 Simples	1,91	103,60	26,42	130,02	26,26	31,26
Colhedora Santal Tandem	2,79	150,69	38,43	189,12	56,74	49,17
Romeu e Julieta (Volkswagen 24320 + reboque)	18,73	1013,13	273,58	1286,72	259,92	309,33
Carregadora Santal CMP Master	1,06	57,35	14,63	71,98	14,54	17,30
Total	24,49	1324,77	353,07	1677,84	357,46	407

¹⁾ A intensidade energética do aço inoxidável é 2,39 vezes a energia do aço leve (Pimentel & Patzek, 2005). Intensidade energética do aço: 22,6 MJ/kg (Brasil, 2009).

²⁾ Energia de fabricação dos maquinários: 13,8 MJ/kg para transbordo, colhedora e carregadora e 14,61 MJ/kg para Romeu e Julieta. (Macedo et al., 2004).

³⁾ Custo de manutenção: 20% para transbordo, carregadora e Romeu e Julieta e 30% para colhedora (Boddey et al., 2008).

⁴⁾ Tempo de vida: 5 anos.

Para as emissões dos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras não foram incorporadas aquelas referentes à fabricação desses maquinários. Dessa forma, as emissões totais são correspondentes somente à produção do aço inoxidável.

As emissões da manutenção desses maquinários correspondem a 20% da emissão total parcial para transbordo, carregadora e Romeu e Julieta e 30% da emissão total parcial para colhedoras.

As emissões totais atribuída aos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras foram de 37 kg CO₂e/ha, que dividido pelo tempo de vida desses equipamentos, 5 anos, resulta em 7,3 kg CO₂e/ha.ano (Tabela 34).

Tabela 34. Inventário das emissões de GEE para a fabricação e manutenção dos transbordos, colhedoras, Romeu e Julieta e carregadoras.

Tipo	Densidade média de utilização (kg/ha)	Total parcial (kgCO₂e/ha) ¹⁾	Manutenção (kgCO₂e/ha) ²⁾	Total por ano (kgCO₂e/ha.ano) ³⁾
Transbordo Santal VT-8 Simples	1,91	2,39	0,48	0,57
Colhedora Santal Tandem	2,79	3,47	0,70	0,83
Romeu e Julieta (Volkswagen 24320 + reboque)	18,73	23,34	4,72	5,61
Carregadora Santal CMP Master	1,06	1,32	0,27	0,32
Total	24,49	30,53	6,17	7,34

¹⁾ Fator de emissão aço inoxidável: 1,25 kg CO₂e/kg (Kim & Worrell, 2002).

²⁾ Custo de manutenção: 20% para transbordo, carregadora e Romeu e Julieta e 30% para colhedora (Boddey et al., 2008).

³⁾ Tempo de vida: 5 anos.

10.3.4. Insumos industriais

A Tabela 35 apresenta o inventário de energia e emissões de gases de efeito estufa para os insumos industriais utilizados na produção de etanol de cana-de-açúcar.

Tabela 35. Taxa de consumo, IE e emissões de GEE dos insumos industriais.

Insumo Químico	Unidade	Quantidade	Total intensidade energética (GJ/ha.ano)	Emissões totais de GEE (kg CO₂e/ha.ano)
Cal Virgem	g/tc	1066,52	0,036	41,68
Acido fosfórico	g/tc	23,28	0,001	2,38
Ácido Sulfúrico	g/l etanol	6,31	0,1124	16,20
Lubrificantes	g/tc	13,93	0,0002	0,88
Total			0,15	61,14

10.3.5. Equipamentos e construção industrial

O inventário do consumo de energia e emissões de GEE para a produção de equipamentos e construção está apresentado na Tabela 36.

Tabela 36. Demanda energética e inventário de emissões de GEE para os equipamentos e construção industrial.

Insumo	MJ/ha.ano	Kg CO ₂ e/ha.ano
Cimento	13,43 ¹⁾	2,85
Aço leve estrutural	245,69	13,53
Aço leve em equipamentos	220,48	12,14
Aço inoxidável	83,80	1,93
Total	563,4	30,45

¹⁾ Segundo dados de Pimentel e Patzek (2005) a energia embutida no aço inoxidável é 2,39 vezes a energia do aço leve.

10.4. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Neste capítulo serão apresentados os resultados da avaliação do ciclo de vida do sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar e sistema integrado de produção.

10.4.1. Balanço de energia

O balanço de energia para os sistemas tradicional e integrado estão apresentados a seguir. Os resultados representam uma condição onde toda a cana-de-açúcar é utilizada para a produção de etanol, ou seja, não há o açúcar como produto final, somente o etanol e a eletricidade excedente.

Uma avaliação do balanço de energia pra diferentes escopos de produção, envolvendo distintas frações de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar, será apresentada no item 10.4.4.

a) Energia de entrada

A demanda energética no ciclo de vida dos sistemas de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê representa as entradas de energia necessárias para o cálculo do balanço energético.

a.1) Sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar

A avaliação demonstrou que a fase agrícola foi responsável por 97,7% de toda a demanda energética do ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar (Tabela 37). A maior contribuição foi atribuída ao uso do combustível fóssil nos subsistemas “Tratos culturais”, “Colheita e transporte” e “Transporte e disposição de coprodutos”, que respondeu por 23%, 16% e 26% de toda a energia de entrada da fase agrícola, respectivamente (Gráfico 1).

A demanda energética dos insumos agrícolas contribuiu com 26% (Gráfico 1), dos quais 13% e 6,7% estão atribuídos ao nitrogênio e herbicida, respectivamente.

Para a fabricação e manutenção dos caminhões, colhedoras, transbordos, reboques, tratores e implementos da área agrícola, a demanda energética foi pequena quando comparada aos demais subsistemas, sendo de apenas 1,9%, 0,4% e 1,3% para os tratores, implementos e caminhões/colhedoras/transbordo/reboque, respectivamente.

O subsistema industrial correspondeu somente a 2,3% de toda a energia consumida no ciclo de vida do etanol, onde a maior contribuição foi associada aos equipamentos e construção industrial, 1,8%.

A queima do bagaço no sistema de cogeração foi responsável pela geração de 5,16 GJ/ha.ano. Como essa geração de energia é proveniente do coproduto resultante do próprio ciclo de vida do etanol, não é somada à demanda total de energia, pois a energia necessária à sua produção já foi contabilizada. No entanto, o conhecimento do consumo de energia procedente do sistema de cogeração é importante para quantificar a energia elétrica excedente para os cenários propostos.

A energia total consumida no ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar foi de 31 GJ/ha.ano.

a.2) Biodiesel de dendê

Os resultados para o biodiesel de dendê foram apresentados para cada cenário, que se diferenciam quanto à capacidade de geração de energia a partir dos coprodutos (ver item 9.2.2, “B.VIII”).

Os resultados de entrada de energia para o ciclo de vida do biodiesel de dendê estão apresentados no APÊNDICE C.

A demanda energética total para a fase agrícola foi de 25 GJ/ha.ano para o cenário 1, sendo a irrigação responsável por 64% e os fertilizantes e defensivos responsáveis por 34% desse total. Em contrapartida, para o cenário 2, a irrigação foi responsável por 38% da demanda energética da fase agrícola e a maior contribuição ficou a cargo dos fertilizantes e defensivos, que somaram 58,5% da energia total de entrada da fase agrícola. A energia total de entrada para a fase agrícola do cenário 2 foi de 14,6 GJ/ha.ano.

A energia de entrada correspondente à etapa de viveiro ocorre somente uma vez dentro do período de 30 anos de ciclo de vida da planta de dendê. Essa fase foi responsável por 0,06 GJ/ha.ano, valor mínimo quando comparado à demanda energética total da fase agrícola.

O inventário da fase agrícola permitiu identificar que o potássio é o micronutriente mais importante para a palma de dendê (125 kg/ha.ano; APÊNDICE B). No entanto, o uso do nitrogênio

e do fósforo está associado à maior demanda de energia da fase agrícola, juntamente com a irrigação. Este é um fator importante para a produção de dendê em bioma de Cerrado.

As máquinas agrícolas, que correspondem somente ao caminhão utilizado para o transporte dos cachos até a unidade industrial, representaram somente 0,94% e 1,43% da demanda energética total do ciclo de vida para os cenários 1 e 2, respectivamente. Os equipamentos industriais somaram apenas 0,07% e 0,11% da demanda total do ciclo de vida nos cenários 1 e 2, respectivamente.

A fase industrial foi responsável por 5,8 GJ/ha.ano; 18,7% e 28,5% da energia total consumida no ciclo de vida para os cenários 1 e 2, respectivamente. As maiores demandas por energia estão relacionadas ao consumo de energia elétrica da rede e etanol para o processo de transesterificação.

A queima dos coprodutos, cascas e fibras, é responsável pelo suprimento de 35 GJ/ha.ano da etapa industrial, que corresponde à eletricidade e ao vapor. No entanto, esse consumo não é somado à demanda total de energia, pois são provenientes do próprio ciclo de vida. Como as entradas de energia estão condicionadas somente à intensidade energética incorporada nos insumos necessários à fabricação do biodiesel, essa energia desprendida para produzir os coprodutos já foi contabilizada no ciclo do dendê.

A energia total consumida no ciclo de vida do biodiesel de dendê foi de 31 GJ/ha.ano e 20 GJ/ha.ano. para os cenários 1 e 2, respectivamente, sem alocação dos coprodutos, e 29 GJ/ha.ano e 19 GJ/ha.ano para os cenários 1 e 2, respectivamente, com alocação.

Verifica-se que com o aumento da eficiência das caldeiras para a geração de energia a partir dos coprodutos, cenário 2, a demanda energética para irrigação foi atendida em quase 70% pela eletricidade da central elétrica.

a.3) Sistema integrado: etanol de cana-de-açúcar – biodiesel de dendê

Para o sistema integrado, a fase agrícola foi responsável por 94% de toda a demanda energética do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar (Tabela 37). No entanto, devido à substituição do diesel por biodiesel de dendê, a maior contribuição passa a ser atribuída ao consumo dos fertilizantes e pesticidas, sendo o nitrogênio e o herbicida responsáveis por 34% e 18% da demanda energética total, respectivamente (Tabela 37).

Um dos objetivos centrais deste trabalho foi contribuir para reduzir a dependência energética em relação ao diesel no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar e melhorar o balanço energético, com base na hipótese de que o balanço de energia do diesel é inferior ao balanço de energia do biodiesel de dendê. Com a substituição do combustível fóssil pelo biodiesel de dendê, houve uma

redução de 93% na demanda energética por combustível (etapas agrícolas), o que trouxe uma mudança considerável na contribuição de energia dos subsistemas (Gráfico 1).

Gráfico 1. Demanda energética para os sistemas tradicional e integrado de etanol de cana-de-açúcar.

Nessas condições, a demanda energética para a fabricação e manutenção dos caminhões, colhedoras, transbordos, reboques, tratores e implementos passou a ser superior à própria demanda de energia por combustível, somando quase 10% de toda a demanda energética do ciclo do etanol.

O subsistema industrial contribuiu com 6,2% de toda a energia consumida no ciclo de vida do etanol, sendo a maior contribuição associada aos equipamentos e construção industrial, 4,9%. Da mesma forma que o sistema tradicional, toda a energia consumida na etapa industrial foi proveniente da queima dos coprodutos gerados no processo, não sendo somada ao consumo total do subsistema. A mesma não varia em função do escopo do sistema, ou seja, tradicional ou integrado, uma vez que está associada à etapa industrial.

Para a transesterificação do óleo de dendê é utilizado o etanol anidro. Segundo Pimentel e Patzek (2005), a energia demanda para a conversão do etanol hidratado para o etanol anidro é de apenas 0,038 MJ para cada litro de álcool convertido. Dessa forma, a energia demandada para essa conversão é insignificante uma vez que a quantidade necessária é de apenas 310 g de etanol anidro para cada 1 kg de óleo de dendê (Maturana, 2007). Essa energia contribuiu somente com 0,0001 % de toda a energia consumida no ciclo de vida, portanto, não foi apresentada nas tabelas.

A energia total consumida no ciclo de vida do sistema integrado foi de 11,5 GJ/ha.ano, uma redução de 62% em relação ao sistema tradicional.

Tabela 37. Energia de entrada para os sistemas tradicional e integrado de produção de etanol de cana-de-açúcar.

Entrada (GJ/ha.ano)	TRADICIONAL		INTEGRADO	
	GJ/ha.ano		GJ/ha.ano	
Agrícola				
1. Mudas	0,66	2,1%	0,24	2,1%
2. Insumos Agrícolas				
2.1. Fertilizantes				
Nitrogênio (N)	3,97	13,0%	3,97	34,4%
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,72	2,3%	0,72	6,2%
Potássio (K ₂ O)	0,32	1,1%	0,32	2,8%
Calcário	0,15	0,5%	0,15	1,3%
Total	5,16	16,9%	5,16	44,7%
2.2. Defensivos agrícolas				
Herbicida	2,04	6,7%	2,04	17,6%
Inseticida	0,81	2,7%	0,81	7,0%
Total	2,85	9,3%	2,85	24,6%
Total	8,00	26,2%	8,00	69,3%
3. Tratos culturais (Combustível)	7,09	23,2%	0,16	1,4%
4. Colheita e transporte (Combustível)				
Colheita	2,34	7,7%	0,24	2,1%
Transporte da cana	2,55	8,3%	0,26	2,3%
Total	4,88	16,0%	0,50	4,3%
5. Máquinas e implementos agrícolas				
Tratores	0,57	1,9%	0,57	4,9%
Implementos	0,13	0,4%	0,13	1,1%
Caminhões, colhedoras, carregadoras, transbordos e reboque	0,41	1,3%	0,41	3,5%
Total	1,11	3,6%	1,11	9,6%
6. Transporte e disposição de coprodutos (Combustível)				
Torta de filtro	4,02	13,2%	0,41	3,6%
Vinhaça	4,07	13,3%	0,42	3,6%
Total	8,09	26,5%	0,83	7,2%
Total Agrícola	29,82	97,7%	10,83	93,8%
Indústria				
7. Insumos industriais				
Cal Virgem	0,036	0,1%	0,036	0,3%
Ácido Fosfórico	0,001	0,003%	0,001	0,01%
Ácido Sulfúrico	0,112	0,4%	0,112	1,0%
Lubrificantes	0,0002	0,0%	0,000	0,0%
Total	0,15	0,5%	0,15	1,3%
8. Equipamentos e construção industrial				
Cimento	0,01	0,04%	0,01	0,1%
Aço leve	0,25	0,8%	0,25	2,1%
Aço leve em equipamentos	0,22	0,7%	0,22	1,9%
Aço inoxidável	0,08	0,3%	0,08	0,7%
Total	0,56	1,8%	0,56	4,9%
9. Consumo de energia				
Cenário 1				
Eletricidade a partir da central elétrica	5,16		5,16	
Cenário 2				
Eletricidade a partir da central elétrica	5,16		5,16	
Total Indústria	0,71	2,3%	0,71	6,2%
Total energia líquida	30,54		11,55	

b) Energia de saída

A energia de saída corresponde àquela resultante dos produtos gerados nos sistemas propostos, ou seja, etanol de cana-de-açúcar e eletricidade excedente. Os resultados estão apresentados na Tabela 38.

b.1) Sistema etanol de cana-de-açúcar: tradicional e integrado

A energia de saída não varia em função do tipo de sistema (integrado ou tradicional), somente em relação aos cenários adotados, ou seja, quanto à eficiência atribuída às caldeiras de biomassa.

Para a energia atribuída ao etanol, que corresponde ao seu poder calorífico inferior em relação à área de cana-de-açúcar colhida anualmente, não há variações em função dos cenários e sistema considerado.

Para a eletricidade, o cenário 1 gerou um total de 5,44 GJ/ha.ano, contra 25 GJ/ha.ano do cenário 2. Sabendo que a demanda de energia da etapa industrial é de 5,16 GJ/ha.ano, tem-se como energia excedente 0,28 e 19,8 GJ/ha.ano para os cenários 1 e 2, respectivamente (Tabela 38).

A energia total de saída do cenário 1 foi de 160 GJ/ha.ano, contra 180 GJ/ha.ano para o cenário 2, um aumento de 11%. Esse cenário justifica-se pelo aumento da eficiência das caldeiras, que contribui para a geração de 7 vezes mais energia.

Tabela 38. Energia de saída para os sistemas tradicional e integrado de etanol de cana-de-açúcar.

Saída (GJ/ha.ano)	
Etanol	160,17
Cenário 1	
Eletricidade gerada	5,44
Eletricidade excedente	0,28
Total saída líquido	160,45
Cenário 2	
Eletricidade gerada	24,96
Eletricidade excedente	19,80
Total saída líquido	179,97

b.2.) Biodiesel de dendê

A energia de saída atribuída ao biodiesel (poder calorífico inferior) não varia em função dos cenários adotados, ou seja, quanto à eficiência atribuída às caldeiras de biomassa.

Para a eletricidade, o cenário 1 gerou um total de 2,65 GJ/ha.ano, contra 12,16 GJ/ha.ano do cenário 2. Sabendo que a demanda de energia para a extração do óleo e para a irrigação somam 17,7 GJ/ha.ano (APÊNDICE C), não há energia elétrica excedente em os ambos cenários devido à alta

demanda energética para a irrigação (Tabela 39). No entanto, a eletricidade proveniente da queima das cascas e fibras supriu quase 70% da demanda energética para irrigação no cenário 2.

Dessa forma, a energia total de saída dos cenários foi de 144,4 GJ/ha.ano.

Tabela 39. Saída de energia do ciclo de vida do biodiesel de dendê.

Saída	(GJ/ha.ano)
Biodiesel	144,38
Cenário 1	
Eletricidade gerada (Fibras)	1,04
Eletricidade gerada (Cascas)	1,61
Eletricidade excedente	0,00
Total saída líquido	144,38
Cenário 2	
Eletricidade gerada (Fibras)	4,775
Eletricidade gerada (Cascas)	7,386
Eletricidade excedente	0,00
Total saída líquido	144,38

c) Indicadores de eficiência energética

De acordo com a metodologia, dois indicadores foram propostos para avaliar o balanço de energia dos sistemas e cenários em estudo: a) razão de energia líquida (NER) e, b) eficiência em energia renovável (EER).

c.1) Razão de energia líquida

A razão de energia líquida para o sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar foi de 5,25 e 5,89 para o cenário 1 e cenário 2, respectivamente (Tabela 40). Essa condição indica que para cada unidade de energia consumida para produzir o etanol de cana-de-açúcar foram obtidas 5,25 e 5,89 unidades de energia, respectivamente. A diferença está atribuída à maior energia excedente apresentada no cenário 2.

Quando comparado ao sistema integrado, houve um aumento de cerca de 10 unidades na razão de energia líquida, para ambos os cenários (Tabela 40), que se justifica pela elevada redução no consumo de diesel, substituído pelo biodiesel, nas etapas agrícolas do etanol de cana-de-açúcar.

Estudo desenvolvido por Macedo et al. (2008) apresentou balanço energético de 1:9,3 para o etanol de cana-de-açúcar, podendo alcançar até 1:11,6 com a utilização de caldeiras mais eficientes. A demanda energética na fase agrícola, apresentada pelos autores, é 2,5 vezes inferior aos resultados calculados por este trabalho.

Boddey et al. (2008) apresentou um balanço energético de 1:9,07. O consumo de diesel adotado pelos autores, na fase agrícola, é cerca de seis vezes inferior aos valores adotados neste trabalho.

Números mais próximos deste trabalho, para o balanço de energia, foram encontrados por Oliveira et al. (2005) cujos valores reportados foram 3,1, para a pior situação, e 3,9 para a melhor situação. As entradas de produtividade de cana-de-açúcar (tc/ha.ano) e produtividade de etanol (l etanol/tc) foram inferiores a este trabalho.

Os resultados para o indicador de energia renovável mostraram que, em ambos os sistemas e cenários, o etanol de cana-de-açúcar é um combustível renovável (Tabela 40).

O sistema integrado contribuiu para um aumento de 8% na renovabilidade do combustível em relação ao sistema tradicional. A fração não renovável no ciclo de vida do etanol produzido em sistema integrado corresponde, principalmente, ao uso de insumos agrícolas derivados de fontes fósseis. Esses correspondem tanto ao uso direto, aquele utilizado na cultura da cana-de-açúcar, quanto o de uso indireto, aquele utilizado na cultura do dendê.

Entre os cenários, a variação na renovabilidade do etanol não foi significativa (Tabela 40).

Tabela 40. Resultado final de razão de energia líquida e eficiência em energia renovável.

	TRADICIONAL	INTEGRADO
Cenário 1		
NER	5,25	13,89
EER	0,89	0,96
Cenário 2		
NER	5,89	15,58
EER	0,90	0,96

O Gráfico 2 apresenta uma comparação entre o combustível fóssil e o biocombustível em estudo, nos seus diferentes cenários e sistemas de produção. Os valores adotados para o cálculo do balanço de energia da gasolina foram referenciados de Simapro (2008) e EIA (2009a). Esse balanço de energia corresponde a 0,75:1, ou seja, para cada unidade de energia consumida para a produção da gasolina, 0,75 unidade de energia está incorporada ao combustível.

Gráfico 2. Razão de energia líquida.

10.4.2. Emissões de gases de efeito estufa

As emissões de GEE no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar para os sistemas em estudo estão apresentadas a seguir. Nesta seção, os resultados retratam uma condição onde toda a cana-de-açúcar é destinada à produção de etanol. A aplicação da alocação por fração de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar e etanol será demonstrada no item 10.4.4.

a) Sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar

A fase agrícola do etanol tradicional de cana-de-açúcar contribuiu com 88% de todo o CO₂e emitido no ciclo de vida. O uso do combustível fóssil, o nitrogênio, o calcário, o uso e disposição dos coprodutos e a queima da palha da cana justificaram quase a totalidade das emissões de GEE (Tabela 41).

O combustível fóssil, consumido nas etapas de colheita, transporte da cana-de-açúcar, tratos culturais e disposição dos coprodutos, somou 26,5% das emissões totais do ciclo de vida.

O nitrogênio e o calcário responderam por 14% e 11% das emissões, respectivamente. Essas emissões estão atribuídas à volatilização do nitrogênio, contido no fertilizante, e do carbono, contido no calcário.

As emissões atribuídas ao uso da vinhaça, 8,4% do total, e ao uso da torta de filtro, 1,6% do total, estão associadas à volatilização do metano e do nitrogênio, respectivamente.

As demais emissões atribuídas à etapa agrícola correspondem aos defensivos agrícolas e às máquinas e implementos agrícolas, que contribuíram com 3,2% e com 0,6%, respectivamente.

Para a etapa industrial, as emissões de GEE responderam por 12% do total do ciclo de vida, sendo 9% relacionada à queima do bagaço para geração de energia. As emissões dos equipamentos, construção civil e insumos industriais foram insignificantes, juntas somaram 3% das emissões totais do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar.

As emissões totais do ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar, sem considerar a alocação da eletricidade excedente, foram de 3.310 kg CO₂e/ha.ano ou 20,7 g CO₂e/MJ etanol (Tabela 41).

Considerando a alocação, as emissões diferem quanto aos cenários propostos, ou seja, quanto à eletricidade excedente. Para o cenário 1, a eletricidade excedente respondeu por 0,17% da eletricidade total gerada, alocando 5,75 kg CO₂e/ha.ano das emissões totais. O cenário 2 apresentou 11% de eletricidade excedente, que destinou uma alocação de 364 kg CO₂e/ha.ano para essa eletricidade (Tabela 38).

Estudos recentes publicados pelo “California Air Resources Board” (CARB, 2009) e “Environmental Protection Agency” (EPA, 2010) avaliaram as emissões de gases de efeito estufa da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil.

As emissões do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar divulgadas pelo CARB (2009) foram de 23 g CO₂e/MJ, sem considerar a alocação, o transporte e a distribuição do combustível. Essas emissões não incluem energia elétrica excedente a partir da queima do bagaço e considera que toda a cana-de-açúcar é queimada, não havendo mecanização da colheita.

Macedo et al. (2008) e Oliveira et al. (2005) também apresentaram valores próximos a este trabalho, 20 g CO₂e/MJ e 24,4 g CO₂e/MJ, respectivamente. Trabalho desenvolvido por Boddey et al. (2008) apresentou o menor valor entre os estudos, 15 g CO₂e/MJ.

EPA (2010) avaliou as emissões do etanol de cana-de-açúcar para diferentes cenários de produção de energia a partir dos seus coprodutos e, desconsiderando o uso das palhas para geração de energia e incluindo as emissões de mudança no uso do solo, chegaram ao valor de 42 g CO₂e/MJ.

b) Sistema biodiesel de dendê

Os resultados para o biodiesel de dendê (APÊNDICE E) foram apresentados para cada cenário, que se diferenciam quanto à capacidade de geração de energia a partir dos coprodutos (ver item 9.2.2, “B.VIII.”).

No cenário 1, os insumos agrícolas, industriais e a irrigação foram os maiores responsáveis pelas emissões de GEE no ciclo de vida do biodiesel de dendê, respondendo por 92% das emissões

totais. O nitrogênio e o fósforo contribuíram com 20% e com 10% das emissões totais do ciclo de vida, respectivamente. A irrigação colaborou com 20% das emissões totais (APÊNDICE E).

Para o cenário 2, onde 70% da energia elétrica demandada para a irrigação foi proveniente da própria estação elétrica, a irrigação, os insumos agrícolas e industriais somaram 91% das emissões totais do ciclo de vida. O nitrogênio e o fósforo contribuíram com 23% e com 11% das emissões totais do ciclo de vida, respectivamente. A irrigação colaborou com 8% das emissões totais (APÊNDICE E).

Ao contrário do sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar, a cultura do dendê não demanda um elevado consumo de diesel para a etapa agrícola por não se tratar de uma cultura mecanizada. Dessa forma, o consumo de energia elétrica para a irrigação ganha importância dentro do ciclo de vida do biodiesel de dendê.

Na fase industrial, o consumo de etanol para o processo de transesterificação foi responsável por 33% e 38% das emissões totais do ciclo de vida para os cenários 1 e 2, respectivamente. Essas emissões correspondem a 536 kg CO₂e/ha.ano. Caso o escopo adotado fosse a transesterificação via rota metílica¹¹, as emissões atribuídas a essa fase somariam 715 kg CO₂e/ha.ano, um aumento de 14% nas emissões totais do ciclo de vida.

As emissões atribuídas aos equipamentos e caminhão não foram relevantes quando comparadas às emissões totais do ciclo de vida.

A queima das cascas e fibras para a geração de energia foi responsável por 96 kg CO₂e/ha.ano, 6% e 7% do total das emissões para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Considerando a alocação dos coprodutos, o ciclo de vida do biodiesel de dendê totalizou 1.533 kg CO₂e e 1.327 kg CO₂e para cada hectare de dendê por ano, cenários 1 e 2, respectivamente (APÊNDICE E).

c) Sistema integrado: etanol de cana-de-açúcar – biodiesel de dendê

Para o sistema integrado, a fase agrícola foi responsável por 84,5% das emissões totais do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar (Tabela 41). A maior contribuição de emissões está atribuída aos fertilizantes, onde o nitrogênio e o calcário são responsáveis por 18 % e 14% das emissões totais do combustível, respectivamente, bem como as emissões resultantes da queima da palha da cana-de-açúcar e volatilização do metano proveniente da vinhaça.

A substituição do combustível fóssil por biodiesel de dendê acarretou uma redução de 88% nas emissões atribuídas ao uso de combustível (Gráfico 3), que inclui as etapas de tratos culturais, colheita, transporte da cana-de-açúcar e dos coprodutos.

¹¹ Fator de emissão do metanol: 0,786 kg CO₂e/kg (Ecoinvent, 2004).

Gráfico 3. Emissões de GEE atribuídas ao consumo de combustível no ciclo de vida - sistemas tradicional e integrado.

Nota: * Tratos culturais, colheita, transporte de cana-de-açúcar e de coprodutos.

Novamente, verifica-se que o objetivo de reduzir a dependência energética do diesel no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, tendo, agora, a hipótese de que as emissões do ciclo de vida do biodiesel de dendê são muito inferiores às atribuídas ao ciclo de vida do diesel, refletiram significativamente na redução de GEE conferidas ao uso de combustível.

As emissões da fabricação e manutenção dos caminhões, colhedoras, transbordos, reboques, tratores e implementos da área agrícola somaram 0,8% do total de emissões do ciclo de vida do etanol, ou seja, irrelevantes.

O subsistema industrial contribuiu com 15,5% das emissões totais, sendo a maior contribuição associada à queima do bagaço, 12%. As emissões relacionadas à queima das cascas e fibras de dendê não estão inclusas nesse subsistema, pois já foram incorporadas no ciclo de vida do biodiesel de dendê.

As emissões variam para cada cenário proposto, ou seja, sofrem alterações de acordo com a eficiência da caldeira. Quanto maior a energia elétrica excedente, maiores serão as emissões alocadas para esse coproduto, resultando em uma redução nas emissões atribuídas ao outro coproduto, o etanol.

No cenário 1, foram alocadas 4,38 kg CO₂e/ha.ano para a eletricidade excedente; 0,17% das emissões totais. Para o cenário 2, a alocação de emissões foi de 277,2 kg CO₂e/ha.ano; uma redução de 11% nas emissões totais do ciclo de vida.

Tabela 41. Emissões finais do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar para os sistemas tradicional e integrado.

	TRADICIONAL		INTEGRADO	
	kg CO ₂ e/ha.ano		kg CO ₂ e/ha.ano	
Agrícola				
1. Mudas	74,47	2,3%	56,69	2,3%
2. Insumos Agrícolas				
2.1. Fertilizantes				
Nitrogênio (N)	464,36	14,0%	464,36	18,4%
Fósforo (P ₂ O ₅)	41,47	1,3%	41,47	1,6%
Potássio (K ₂ O)	16,86	0,5%	16,86	0,7%
Calcário	351,88	10,6%	351,88	14,0%
Total	874,58	26,4%	874,58	34,7%
2.2. Defensivos agrícolas				
Herbicida	77,50	2,3%	77,50	3,1%
Inseticida	27,40	0,8%	27,40	1,1%
Total	104,90	3,2%	104,90	4,2%
2.3. Uso dos coprodutos				
Vinhaça	278,94	8,4%	278,94	11,1%
Torta de filtro	54,28	1,6%	54,28	2,2%
Total	333,22	10,1%	333,22	13,2%
Total	1312,69	39,7%	1312,69	52,1%
3. Tratos culturais	114,98	3,5%	11,27	0,4%
4. Colheita e transporte				
Colheita da cana-de-açúcar	168,54	5,1%	16,52	0,7%
Queima da palha da cana	636,04	19,2%	636,04	25,2%
Transporte da cana	183,63	5,5%	18,00	0,7%
Total	988,20	29,9%	670,56	26,6%
5. Máquinas e implementos agrícolas				
Tratores	10,48	0,3%	10,48	0,4%
Implementos	2,53	0,1%	2,53	0,1%
Caminhões, colhedoras, carregadoras, transbordos e reboque	7,34	0,2%	7,34	0,3%
Total	20,35	0,6%	20,35	0,8%
6. Transporte e disposição dos coprodutos				
Torta de filtro	114,98	3,5%	28,39	1,1%
Vinhaça	293,40	8,9%	28,75	1,1%
Total	408,38	12,3%	57,14	2,3%
Total Agrícola	2919,07	88,2%	2128,69	84,5%
Indústria				
7. Insumos industriais				
Cal Virgem	41,68	1,3%	41,68	1,7%
Ácido fosfórico	2,38	0,1%	2,38	0,1%
Ácido Sulfúrico	16,20	0,5%	16,20	0,6%
Lubrificantes	0,88	0,0%	0,88	0,0%
Total	61,14	1,8%	61,14	2,4%
8. Equipamentos e construção industrial				
Cimento	2,85	0,1%	2,85	0,1%
Aço leve	13,53	0,4%	13,53	0,5%
Aço leve em equipamentos	12,14	0,4%	12,14	0,5%
Aço inoxidável	1,93	0,1%	1,93	0,1%
Total	30,45	0,9%	30,45	1,2%
9. Geração de energia a partir dos coprodutos				
Queima bagaço	298,99	9,0%	298,99	11,9%
Total	298,99	9,0%	298,99	11,9%
Total Indústria	390,58	11,8%	390,58	15,5%

Além do excedente de eletricidade, alocações podem ser necessárias em função da fração de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol e açúcar. Para essa condição, os resultados serão apresentados no item 10.4.4.

Sem considerar a alocação da energia elétrica excedente, as emissões totais do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, sistema integrado, foram de 2.520 kg CO₂e/ha.ano ou 16 g CO₂e/MJ (Tabela 41).

A redução de emissões de GEE do sistema integrado, em relação ao sistema tradicional, foi de 24% nas emissões do ciclo de vida desse combustível.

10.4.3. Emissões de GEE devido à mudança no uso do solo

Para o sistema tradicional, as emissões de mudança no uso do solo devido à substituição do bioma Cerrado pelo plantio de cana-de-açúcar somaram às emissões totais do ciclo de vida do etanol 1,92 t CO₂e/ha.ano. Para o bioma Cerradão, 3,75 t CO₂e/ha.ano foram somados ao ciclo de vida. A substituição de pastagem degradada contribuiu para a redução das emissões do ciclo de vida devido à característica de aumento de estoque de carbono, uma vez que o carbono contido do ecossistema cana-de-açúcar é superior ao estoque de carbono em pastagem degradada (Tabela 42).

Para o biodiesel de dendê, a mudança no uso do solo para os biomas Cerrado e Cerradão somaram às emissões totais do ciclo de vida 0,06 e 1,89 t CO₂e/ha.ano, respectivamente. Para a substituição de pastagem degradada por palma de dendê ocorreu um estoque de carbono no ecossistema (Tabela 42).

No sistema integrado, a substituição dos biomas Cerrado e Cerradão somaram às emissões do ciclo de vida 1,72 e 3,55 t CO₂e/ha.ano, respectivamente. Em contrapartida, a substituição de pastagem degradada contribuiu para a redução das emissões do ciclo de vida e, consequentemente, para o aumento do estoque de carbono no ecossistema (Tabela 42).

Em suma, as emissões do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar para o sistema tradicional, sem considerar a alocação da energia elétrica e produção de açúcar, somadas às emissões devido à mudança no uso do solo, duplicaram as emissões totais para a produção desse combustível; condição para Cerradão.

Para o sistema integrado, nas mesmas condições apresentadas no parágrafo anterior, as emissões devido à mudança no uso do solo aumentaram, em até 2,4 vezes as emissões totais do ciclo de vida.

Para o biodiesel de dendê, houve um aumento de até 2,4 vezes nas emissões totais do ciclo de vida.

Tabela 42. Emissões de GEE devido à mudança no uso do solo.

Bioma substituído	Sistema tradicional (t CO₂e/ha.ano)	Biodiesel de dendê (t CO₂e/ha.ano)	Sistema integrado (t CO₂e/ha.ano)
ACV	3,31	1,33	2,52
Cerrado (LUC)	1,92	0,06	1,72
Total (LUC + ACV)	5,23	1,39	4,25
Cerradão (LUC)	3,75	1,89	3,55
Total (LUC + ACV)	7,06	3,22	6,07
Pastagem degradada (LUC)	-1,65	-3,51	-1,85
Total (LUC + ACV)	1,66	-2,18	0,67

Estudo desenvolvido pelo CARB (2009) apresentou emissões de 46 g CO₂e/MJ, ou 7,37 t CO₂e/ha.ano, atribuídas a mudança no uso do solo para a substituição de floresta. Esse valor está mais próximo do valor apresentado para substituição do bioma Cerradão. No entanto, o estoque de carbono em bioma de floresta é cerca de três vezes superior ao estoque de carbono em Cerradão (Amaral et al., 2008), o que acarretaria emissões de mudança no uso do solo muito maiores que aquelas apresentadas pelo CARB (2009).

EPA (2010) avaliou as emissões do etanol de cana-de-açúcar para diferentes cenários de produção de energia a partir dos coprodutos da cana-de-açúcar e, sem considerar o uso das palhas para geração de energia, porém, incluindo as emissões de mudança no uso do solo, chegaram ao valor de 42 g CO₂e/MJ ou 6,73 t CO₂e/ha.ano (aplicando os valores adotados neste trabalho para a produtividade de etanol), próximo ao valor encontrado neste trabalho para a substituição de Cerradão; sistema tradicional (Tabela 42).

10.4.3.1. Tempo de retorno de carbono para o ecossistema (ECPT)

O tempo de retorno de carbono para o ecossistema (ECPT) com a substituição do bioma Cerradão foi de 10,4 anos, em média. Para a substituição do bioma Cerrado, a média do tempo de retorno foi de 5,2 anos. Para a pastagem degradada, a média de tempo de retorno foi de - 5 anos, ou seja, quando a cana-de-açúcar é cultivada sob pastagem degradada, não há emissões devido à mudança no uso do solo e, portanto, haverá fixação de carbono.

Estudo desenvolvido por Fargione et al. (2008), também para a substituição de Cerrado por cana-de-açúcar, encontraram um tempo de retorno de carbono ao ecossistema de 17 anos. Gibbs et al. (2008) estimaram uma média de 12 anos para o ECPT, para substituição de Cerrado.

O Gráfico 4 demonstra a variação do ECPT. As barras apresentadas nas colunas representam os valores máximos e mínimos, que variam em função do tipo de sistema. Os valores máximos

referem-se ao sistema tradicional, e os valores mínimos, ao sistema integrado. Essas variações foram de 6%, 9% e 2% para o Cerrado, Cerradão e pastagem degradada, respectivamente.

Gráfico 4. Tempo de retorno de carbono para o ecossistema, por bioma.

Os resultados demonstraram que não há alterações significativas de ECPT entre os sistemas de produção de etanol de cana-de-açúcar. O sistema integrado reduziu 12 % do tempo de retorno em bioma de Cerradão, quando comparado ao sistema tradicional. Para o bioma de Cerrado, o sistema integrado reduziu 17% do tempo de retorno em relação ao sistema tradicional. Para a pastagem degradada, em ambos os sistemas não há débito de carbono associado, ou seja, o retorno de carbono ao ecossistema é imediato à implantação da cultura de cana-de-açúcar.

Certamente, o fator de maior influência para o ECPT é o tipo de mudança no uso do solo, como observado na Tabela 42 e no Gráfico 4. Entre os tipos de vegetação, a substituição do bioma de Cerradão acarretou um tempo de retorno de carbono ao ecossistema duas vezes maior do que para a substituição de Cerrado, em ambos os sistemas.

10.4.4. Aplicação da metodologia de alocação

Nesta seção, serão abordados os resultados de razão de energia líquida e balanço de emissões de gases de efeito estufa para diferentes escopos de produção de etanol. Esses se diferenciam quanto à fração de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol direto e açúcar. Os

resultados foram comparados quanto ao tipo de sistema – tradicional ou integrado – e quanto ao cenário de eficiência das caldeiras para produção de vapor e energia.

Observe que mesmo quando toda a cana-de-açúcar é destinada à fabricação de açúcar, fração 1,0 nos gráficos a seguir, há produção de etanol indireto a partir do mel final.

a) Razão de energia líquida

No cenário 1, a razão de energia líquida (NER) para o sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar variou de 5,2 a 8,4 ($GJ_{(f+e)}/GJ_{ACV}$)¹². Para o sistema integrado, a variação foi de 13,9 a 22,1 ($GJ_{(f+e)}/GJ_{ACV}$)¹² (Gráfico 5).

Gráfico 5. Variação de NER para o cenário 1 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.

Para o cenário 2, a NER do sistema tradicional resultou em uma variação de 5,9 a 15,4 ($GJ_{(f+e)}/GJ_{ACV}$). No sistema integrado, a razão de energia líquida resultante variou de 15,6 a 40,8 ($GJ_{(f+e)}/GJ_{ACV}$) (Gráfico 6).

¹² f + e = energia incorporada ao combustível mais a energia elétrica excedente.

Gráfico 6. Variação de NER para o cenário 2 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.

Por fim, verificou-se que com a aplicação da metodologia de alocação em função do escopo da usina, o balanço de energia pode alcançar um aumento de até 59% para o cenário 1 e 162% para o cenário 2. Essa variação não difere entre os sistemas, uma vez que a alocação está relacionada com a fração de cana-de-açúcar destinada ao etanol, que independe do consumo de biodiesel nas etapas agrícolas do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar.

Não foram encontrados outros trabalhos onde essa consideração de alocação tenha sido aplicada em balanço de energia para etanol de cana-de-açúcar.

b) Emissões de gases de efeito estufa

No cenário 1, as emissões totais do sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar variaram de 20,6 a 1,8 g CO₂e/MJ de combustível. Para o sistema integrado, a variação foi de 15,7 a 1,36 g CO₂e/MJ de combustível (Gráfico 7).

Gráfico 7. Balanço de emissões de GEE para o cenário 1 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.

Para o cenário 2, as emissões totais do sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar variaram de 18,4 a 1,6 g CO₂e/MJ de combustível. Para o sistema integrado, a variação foi de 14 a 1,2 g CO₂e/MJ de combustível (Gráfico 8).

Gráfico 8. Balanço de emissões de GEE para o cenário 2 em função da fração de cana-de-açúcar enviada para o etanol.

Com a aplicação da metodologia de alocação relacionada à fração de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol, a redução de emissões de GEE pode chegar a 91% em ambos os

cenários. Essa variação não difere entre os sistemas, uma vez que independe do consumo de biodiesel nas etapas agrícolas do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar.

Um estudo similar foi realizado por Gopal e Kammen (2009). Para a condição onde toda a cana-de-açúcar é destinada exclusivamente à produção de etanol, o resultado de emissões de GEE do ciclo de vida foi de 27 g CO₂e/MJ de etanol anidro. Para a produção de etanol somente através de mel final, as emissões resultantes foram de 15,1 g CO₂e/MJ de etanol anidro. O fator de maior divergência entre este estudo e o trabalho de Gopal e Kammen (2009) refere-se às emissões atribuídas a fase industrial do etanol de cana-de-açúcar, cujo valor apresentado pelos autores é cerca de 10 vezes superior ao valor encontrado por este trabalho.

Por fim, foi verificado que o escopo de produção do etanol da usina exerce grande influência sobre a razão de energia líquida e sobre as emissões finais de GEE. Quanto maior a fração de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar, menores serão as emissões atribuídas ao etanol e maior será a razão de energia líquida.

10.4.5. Emissões evitadas com a substituição do combustível fóssil pelos biocombustíveis em estudo

Em comparação com as emissões da gasolina, as emissões do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, nas condições tradicionais e para uma média entre os cenários avaliados, verificaram redução de 77%.

Para o sistema integrado, também considerando uma média entre os cenários, as emissões evitadas foram de 82% quando comparadas à gasolina.

Para o biodiesel de dendê, as emissões evitadas com a substituição do diesel foram de 90%, motivo que justifica os melhores resultados para o sistema integrado de produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de dendê (Gráfico 9).

Gráfico 9. Comparativo de emissões de GEE entre os biocombustíveis avaliados e os combustíveis fósseis.

Nota: fatores de emissão adotados para gasolina e diesel: ver APÊNDICE A.

10.4.6. Emissões evitadas com a geração de energia elétrica a partir do coproduto

A geração de energia elétrica excedente também é importante para avaliar as emissões evitadas pela não utilização da energia do sistema elétrico brasileiro.

Para o cenário 1, do sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar, o excedente de energia elétrica foi de 0,28 GJ/ha.ano, cujas emissões associadas são de 74,3 g CO₂e/kWh, contra 73 g CO₂e/kWh para o *mix* energético brasileiro. Nesse caso, a eletricidade excedente não contribuiu para a redução das emissões de GEE. A diferença entre os valores é insignificante, o que não permite afirmar que, nessas condições, há um aumento das emissões, pois 2% podem estar dentro da margem de erro dos resultados.

Já para o cenário 2 do sistema tradicional, cuja eletricidade excedente foi de 19,8 GJ/ha.ano com emissões relacionadas de 66,2 g CO₂e/kWh, houve uma redução de 9% em relação às emissões do sistema elétrico brasileiro.

Para o sistema integrado, as emissões evitadas foram mais significativas. A eletricidade excedente do cenário 1 contribuiu com 56,5 g CO₂e/kWh, redução de 23%. Para o cenário 2, as emissões evitadas com a energia elétrica excedente foram de 31%.

Como as emissões do ciclo de vida do sistema integrado são inferiores às emissões do sistema tradicional, consequentemente, as emissões por unidade de energia elétrica produzida também são menores. Dessa forma, as emissões evitadas com a exportação dessa eletricidade excedente (e, portanto, a substituição da energia elétrica do sistema nacional brasileiro) são inferiores às conferidas ao *mix* energético nacional.

Em suma, as reduções proporcionadas pelo sistema integrado foram até 25% maiores do que as emissões evitadas pelo sistema tradicional. Os resultados para os diferentes cenários e sistemas estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 43. Emissões evitadas devido ao excedente de energia elétrica do sistema de cogeração de biomassa.

Cenário 1	Unidade	Tradicional	Integrado
Eletricidade excedente	GJ/ha.ano	0,28	0,28
	g CO ₂ e/kWh ^{1,2)}	74,3	56,5
Emissões evitadas	g CO ₂ e/kWh	-1,3	16,5
	%	-2%	23%
Cenário 2			
Eletricidade excedente	GJ/ha.ano	19,8	19,8
	g CO ₂ e/kWh ^{1,2)}	66,2	50,4
Emissões evitadas	g CO ₂ e/kWh	6,8	22,6
	%	9%	31%
Emissões da energia elétrica no Brasil *	g CO ₂ e/kWh	73,0	

* Mix energético brasileiro (IEA, 2009).

¹⁾ Emissões totais ACV/(Energia de saída etanol + eletricidade excedente); kg CO₂e .(ha.ano)⁻¹/ GJ .(ha.ano)⁻¹

²⁾ 1 kWh = 0,0036 GJ (EBAMM, 2006).

10.5. Área de palma requerida para suprir a demanda de combustível

O consumo energético de diesel na cultura da cana-de-açúcar e dendê foi estimado em 15,421 e 2.175 MJ de combustível para cada hectare de cultura, respectivamente. A cultura de dendê produz 144,4 GJ de energia incorporada ao combustível, para cada hectare de cultura.

Dessa forma, para atender à demanda energética por combustível no ciclo de vida do etanol, é necessário 0,107 hectare de dendê para cada hectare de cana-de-açúcar. Para o ciclo de vida do biodiesel de dendê, é necessário 0,015 ha dessa cultura para atender à sua própria exigência por combustível. Ou seja, para cada 8,21 hectares de cana-de-açúcar, é necessário apenas 1 hectare de dendê para atender toda a demanda de biodiesel de dendê no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar.

Por fim, para cada hectare, 89,1% são compostos por plantio de cana-de-açúcar e 10,9% por cultura de dendê (Figura 10).

Figura 10. Relação de áreas de palma de dendê e de cana-de-açúcar para atender à demanda de biodiesel no ciclo de vida do sistema integrado de produção.

O Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro¹³, que antecipa os prazos legais¹⁴ para o fim da queima da palha da cana-de-açúcar, determina a eliminação da queimada até 2014 em terrenos com declividade de até 12%. Para terrenos com declividade acima de 12% o prazo final para a eliminação da queimada da cana-de-açúcar é 2017.

Dessa forma, as áreas não mecanizáveis (declividade superior a 12%) são uma boa alternativa para o plantio de dendê.

10.6. Capacidade industrial da planta de biodiesel de dendê

Os resultados demonstraram que para suprir a demanda de combustível nas fases agrícolas da cana-de-açúcar e do dendê é necessária uma capacidade industrial anual de 7.000 toneladas de biodiesel.

10.7. Demanda de água de irrigação para o dendê

De acordo com Schmidt (2007), são gerados 672,5 kg de POME para cada tonelada de óleo de palma (CPO), o que resultou um total de 2,75 m³/ha.ano.

Segundo dados experimentais da Embrapa Cerrados (Azevedo et al., 2008), para um plantio com 143 plantas de dendê por hectares, a demanda total por água da cultura é de 3.180 m³ por ha por ano.

¹³ Informações sobre o Protocolo Agroambiental disponível em:
<http://homologa.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/introducao.asp>

¹⁴ Lei Estadual n.º 11.241/02

Embora a irrigação com POME não seja expressiva para a cultura de dendê, um fator importante a ser avaliado é o consumo de água por unidade de energia gerada.

Em termos de energia, para cada unidade de GJ de biodiesel (poder calorífico inferior), são consumidos 22 m³ de água. Um estudo desenvolvido por Gerbens-Leenes et al. (2009) avaliou o consumo de água de irrigação para diferentes culturas energéticas, tanto para a produção de etanol quanto de biodiesel. A cultura da soja consome 217 m³ de água para cada GJ de energia (Tabela 44).

Para as culturas de canola e de pinhão manso, o consumo de água é de 245 e 335 m³ por GJ de biodiesel, respectivamente.

Tabela 44. Comparativo de culturas energéticas quanto ao consumo de água de irrigação.

Cultura energética	Consumo de água de irrigação	
	m ³ por GJ de biodiesel	Litros água por litros de biodiesel
Dendê	22	750
Soja ¹⁾	217	7.521
Canola ¹⁾	245	8.487
Pinhão manso ¹⁾	335	11.636

¹⁾ Gerbens-Leenes, Hoekstra, van der Meer (2009).

Nesses termos, verifica-se que, embora haja a necessidade de irrigação para a cultura de dendê no Cerrado, o consumo de água, por unidade de energia, é 91% inferior, em média, à demanda de água de irrigação para as culturas apresentadas na Tabela 44. Ou seja, nesse comparativo, a palma de dendê é muito mais eficiente na utilização de água.

11. CONCLUSÃO

A avaliação do ciclo de vida do etanol hidratado de cana-de-açúcar integrado a um sistema de produção de biodiesel de dendê demonstrou que, através de alternativas focadas na melhoria da sustentabilidade do biocombustível, é possível reduzir as emissões de gases de efeito estufa, melhorar o balanço energético e minimizar os impactos ocasionados pela mudança no uso do solo.

Dentre os resultados encontrados por este trabalho, os principais foram:

- A fase agrícola foi responsável por 97,7% de toda a demanda energética no ciclo de vida do etanol tradicional, da qual 66% e 26% estão atribuídas ao uso do diesel (etapas agrícolas) e insumos agrícolas (fertilizantes e pesticidas), respectivamente. Com a substituição do combustível fóssil pelo biodiesel de dendê, houve uma redução de 96% na demanda energética por combustível. Como consequência, no sistema integrado, a maior demanda energética passa a ser relacionada aos insumos agrícolas, que contribuem com 70% do total do ciclo de vida.
- A energia total consumida no ciclo de vida do sistema integrado foi 62% inferior ao sistema tradicional.
- A energia demandada e as emissões de GEE para a fabricação e manutenção dos equipamentos industriais e maquinários agrícolas foram insignificantes em todos os sistemas em estudo.
- Em ambos os sistemas, a energia total de saída no cenário 2 foi 11% superior ao cenário 1. Justifica-se pelo aumento da eficiência das caldeiras, que contribui para a geração de 7 vezes mais energia.
- A razão de energia líquida para o sistema tradicional de etanol de cana-de-açúcar foi de 5,25 e 5,89 para o cenário 1 e cenário 2, respectivamente. Em contrapartida, o sistema integrado apresentou cerca de 10 unidades a mais na razão de energia líquida, para ambos os cenários.
- Em ambos os sistemas e cenários, o indicador de energia renovável demonstrou que o etanol de cana-de-açúcar é um combustível renovável.
- O sistema integrado contribuiu para um aumento de 8% na renovabilidade do combustível em relação ao sistema tradicional.
- A fase agrícola do etanol tradicional de cana-de-açúcar contribuiu com 59% de todo o CO₂e emitido no ciclo de vida desse combustível, dos quais 26% estão atribuídos ao uso de

combustível fóssil. Com a substituição do combustível fóssil por biodiesel, houve uma redução de 88% nas emissões atribuídas ao uso de combustível.

- A redução de emissões de GEE do sistema integrado, em relação ao sistema tradicional, foi de 24% nas emissões do ciclo de vida desse combustível.
- As emissões provenientes do uso dos coprodutos somaram 38% e 50% das emissões de GEE no ciclo de vida do etanol tradicional de cana-de-açúcar e sistema integrado de produção, respectivamente.
- Para o cenário 1 do biodiesel de dendê, a irrigação exerceu uma grande contribuição para a demanda energética do ciclo de vida. No cenário 2, a eletricidade da central elétrica supriu 70% da demanda de energia para irrigação, reduzindo 66% da demanda energética para essa fase.
- Para o cenário 1 do biodiesel de dendê, os insumos agrícolas, industriais e a irrigação foram os maiores responsáveis pelas emissões de GEE no ciclo de vida do biodiesel de dendê; juntos responderam por 92% das emissões totais. Para o cenário 2, os insumos agrícolas e industriais somaram 91% das emissões totais do ciclo de vida.
- Na fase industrial do biodiesel de dendê, o consumo de etanol para o processo de transesterificação foi responsável por 35% das emissões totais do ciclo de vida, média entre os cenários. A rota metílica acarretaria um aumento de 33% nas emissões da etapa de transesterificação.
- As emissões de mudança no uso do solo foram mais significativas para a substituição do bioma Cerradão pelas culturas de cana-de-açúcar e dendê devido ao maior estoque de carbono contido nesse bioma.
- A substituição de pastagem degradada contribuiu para a redução das emissões do ciclo de vida, em ambos os sistemas, devido à característica de aumento de estoque de carbono.
- O sistema integrado, em relação ao sistema tradicional, reduziu 12% e 17% do tempo de retorno de carbono ao ecossistema nos biomas de Cerradão e Cerrado, respectivamente.
- Em comparação com as emissões da gasolina, as emissões do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar apresentaram, para uma média entre os cenários avaliados, uma redução de 77% e 82% para o sistema tradicional e integrado, respectivamente.
- Para o biodiesel de dendê, as emissões evitadas com a substituição do diesel foram de 90%.
- Para cada 8 hectares de cana-de-açúcar, é necessário 1 hectare de dendê (3,9 toneladas de biodiesel) para atender à demanda de combustível no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agropalma. (2009). *Personal Information*. Tailândia, PA.

Amaral, W. A. N., Marinho, J. P., Tarasantchi, R., Beber, A., Giuliani, E. (2008). Environmental sustainability of sugarcane ethanol in Brazil. In P. Zuurbier & J. C. Vooren, *Sugarcane ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment* (1 ed., pp. 113-138). The Netherlands: Wageningen Academic.

Andreoli, C., Souza, S. P. (2006). Cana-de-açúcar: A melhor alternativa para conversão da energia solar e fóssil em etanol. *Economia e Energia*. Disponível em http://ecen.com/para_imprimir/eee59p.pdf.

ANFAVEA. (2009). *Vendas Atacado Mercado Interno por Tipo e Empresa - Combustível Flex Fuel - 2007/2008/2009*. ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores/Assessoria de Planejamento Econômico e Estatístico/Indústria Automobilística Brasileira - Empresas Associadas. Disponível em <http://www.anfavea.com.br/>.

ANP. (2005). Dispõe sobre as especificações do Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) e do Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC) comercializados pelos diversos agentes econômicos em todo o território nacional, consoante as disposições contidas no Regulamento T. Brasília/DF: Resolução ANP nº 36, de 6 de dezembro de 2005.

ANP. (2009). Levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis. *Coordenadoria de Defesa da Concorrência*. Disponível em <http://www.anp.gov.br/preco/>.

ANP. (2010a). *17º leilão de biodiesel*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/leilao_biodiesel.asp.

ANP. (2010b). *Boletim mensal de biodiesel*. Brasília/DF: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Superintendência de Refino e Processamento de Gás Natural. Disponível em <http://www.anp.gov.br>.

Azevedo, J. A., Junqueira, N. A. V., Braga, M. F., Sá M. A. C. (2008). *Parâmetros de Irrigação Durante o Período Seco em Plantas Jovens de Dendê Cultivadas no Cerrado* (p. 4). Planaltina, DF: Embrapa Cerrados.

BNDES, CGEE. (2008). *Bioetanol de Cana-de-Açúcar - Energia para o desenvolvimento sustentável*. (BNDES) (1 ed., p. 316). Rio de Janeiro. Disponível em www.bioetanoldecana.org.

BNDES. (2008). *Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável* (p. 316). Rio de Janeiro: BNDES e CGEE. Disponível em www.bioetanoldecana.org.

Boddey, R. M., Soares, L. H., Alves, B. J., Urquiaga, S. (2008). Bio-ethanol production in Brazil. In D. Pimentel, *Renewable energy systems: Environmental and Energetic Issues* (pp. 1-32). New York: Springer.

Brasil. (1975). Programa Nacional do Álcool – Proálcool. Institui o Programa Nacional do Álcool. Brasília/DF: Decreto Federal n.º 76.593.

Brasil. (2004). *Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. Objetivo e Diretrizes..* Brasil. Disponível em www.biodiesel.gov.br/programa.html.

Brasil. (2007). *Biocombustíveis: 50 perguntas e respostas sobre este novo mercado* (p. 44). Ministério das Minas e Energia, Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRÁS). Disponível em http://www2.petrobras.com.br/petrobras/portugues/pdf/Cartilha_Biocombustiveis.pdf.

Brasil. (2008). Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Brasília: Comitê Interministerial sobre mudanças do clima.

Brasil. (2009). Balanço Energético Nacional 2009: Ano Base 2008. Rio de Janeiro.

Brasil. (2010). Balanço Energético Nacional 2010. Ano Base 2009: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro.

Brasil/MAPA. (2008). Produção Integrada no Brasil: agropecuária sustentável alimentos seguros (p. 1008). Brasília/DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretária de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo.

Brasil/MMA. (2007). Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado. Brasília/DF. Disponível em <http://www.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=72&idMenu=3813&idConteudo=5978>.

CARB. (2009). *Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard. Regulation* (Vol. I, p. 374). Sacramento, California: California Environmental Protection Agency - Air Resources Board.

Carmo, V. B. (2008). *Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar – fase industrial* (p. 7). Campinas: DEDINI S.A. - Indústria de Base.

CEPEA, ESALQ. (2009). *Indicador Álcool CEPEA/ESALQ*. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz." Disponível em <http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/>.

CGEE. (2005). *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo - Fase I*. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos.

Coltro, L. (2007). *Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão* (p. 75). Campinas: CETEA/ITAL.

Crutzen, P. J., Mosier, A. R., Smith, K. A., Winiwarter, W. (2008). N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuel. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8 (2008), 389-395.

Demirbas, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2106-2116. doi: 10.1016/j.enconman.2008.02.020.

EBAMM. (2006). The ERG biofuels analysis meta-model. UC Berkeley: Energy and Resources Group and Richard & Rhoda Goldman School of Public Policy. Disponível em <http://rael.berkeley.edu/node/9>.

Ecoinvent. (2004). Ecoinvent database Data. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

EIA. (2009a). Official Energy Statistics from the US Government. *Energy Information Administration - EIA; Oxygenate production*. Disponível em http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/m_epooxe_yop_-nus_1m.htm.

EIA. (2009b). *International Energy Statistics - Renewables, Biofuels Production. Energy Information Administration*. Washington, DC: U.S. Energy Information Administration. Disponível em <http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=80&aid=1&cid=regions,&syid=2004&eyid=2008&unit=TBPD>.

EIA. (2009c). *International Energy Outlook. Outlook* (Vol. 0484, p. 284). Washington, DC: Energy Information Administration.

Embrapa/MAPA. (1995). *A cultura do dendê. Serviço de Produção de Informação* (p. 68). Brasília/DF: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental.

Embrapa/MAPA. (2000). *A cultura do dendezeiro na Amazônia Brasileira*. (I. D. Viérgas & A. A. Müller) (p. 374). Belém, PA; Manaus, AM: Embrapa Amazônia Ocidental, Embrapa Amazônia Oriental, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

EPA. (2010). *Regulation of Fuels and Fuel Additives: Changes to Renewable Fuel Standard Program. Literacy Research and Instruction* (Vol. 21, pp. 136-138). Environmental Protection Agency (EPA). doi: 10.1080/19388078109557636.

EUCAR-CONCAWE-JCR. (2008). Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well-to-wheels report. CONCAWE, EUCAR, Joint Research Centre of the European Commission.

Faaij, A. (2008). Biofuel conversion technologies. In P. Zuurbier & J. C. Vooren, *Sugarcane ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment* (1 ed., pp. 159-180). The Netherlands: Wageningen Academic.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., Hawthorne, P. (2008). Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science*, 319. doi: 10.1126/science.1152747.

Furlan Junior, J., Kaltner, F. J., Azevedo, G. F., Campos, I. A. (2006). BIODIESEL: Porque tem que ser dendê. Belém, PA.

Gallagher, E. (2008). *The Gallagher review of indirect effects of biofuels production. Report to UK Renewable Fuels Agency* (p. 92). England: Renewable Fuels Agency.

Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., van der Meer, T. H. (2009). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(25), 10219-23. doi: 10.1073/pnas.0812619106.

- Gibbs, H. K., Johnston, M., Foley, J. A., Zaks, D. (2008). Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters*, 3, 10. doi: 10.1088/1748-9326/3/3/034001.
- GM, ANL, BP, ExxonMobil, Shell. (2001). Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems, North American Analysis.
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Villegas, J., Panichelli, L. (2009). Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances. *Bioresource technology*, 100(21), 4919-30. doi: 10.1016/j.biortech.2009.05.067.
- Goldemberg, J., Coelho, S. T., Guardabassi, P. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 36(6), 2086-2097. doi: 10.1016/j.enpol.2008.02.028.
- Gopal, A. R., Kammen, D. M. (2009). Molasses for ethanol: the economic and environmental impacts of a new pathway for the lifecycle greenhouse gas analysis of sugarcane ethanol. *Environmental Research Letters*, 4(4), 044005. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/044005.
- Hassuani, S. J., Leal, M. R., Macedo, I. D. (2005). *Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash* (1 ed., p. 217). Piracicaba, SP: PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. CTC - Centro de Tecnologia Canavieira.
- Hoekman, S. K. (2009). Biofuel in the U.S. - Challenges and Opportunities. *Renewable Energy*, 34, 14-22. doi: 10.1016/j.renene.2008.04.030.
- Hofman, V. (2003). Biodiesel Fuel. *North Dakota State University, AE-1240*(February), 4.
- IEA. (2009). *CO₂ emissions from fuel combustion Highlights* (p. 124). Paris, France: International Energy Agency (IEA). Disponível em www.iea.org/about/copyright.asp.
- IPCC. (2006a). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe). Hayama, Japan: Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES.
- IPCC. (2006b). N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. In C. Klein, R. S. Novoa, S. Ogle, K. A. Smith, P. Rochette, T. C. Wirth, et al., *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 11.1* (pp. 11.1 - 11.54).
- IPCC. (2006c). Mineral Industry Emissions. In L. Hanle, P. Maldonado, E. Onuma, M. Tichy, H. G. van Oss, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (pp. 2.1 - 2.40). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2.1.
- IPCC. (2006d). Stationary Combustion. In IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2.1* (Vol. 47, pp. 2.1 - 2.47). doi: 10.1016/S0166-526X(06)47021-5.
- ISO 14044: Environmental Management - Life cycle assessment -Requirements and guidelines, International Organization for Standardization (ISO), Geneve, 2006. 54p.
- Janulis, P. (2004). Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle. *Renewable Energy*, 29, 861-871.

Kim, Y., Worrell, E. (2002). International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry. *Energy Policy*, 30, 827-838.

Knothe, G., Gerpen, J. V., Krahl, J., Ramos, L. P. (2006). *Manual de Biodiesel*. (G. Knothe, J. V. Gerpen, J. Krahl, & L. P. Ramos) (1 ed., pp. 323-329). São Paulo, SP: Edgard Blücher.

Lima, S. M. V., Freitas Filho, A., Castro, A. M. G., Souza, H. R. (2000). *Desempenho da Cadeia Produtiva do Dendê na Amazônia Legal* (p. 160). SUDAM/Fundação do Desenvolvimento da UFPE; Embrapa; IPEA.

Liska, A. J., Cassman, K. G. (2008). Towards Standardization of Life-Cycle Metrics for Biofuels: Greenhouse Gas Emissions Mitigation and Net Energy Yield. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2, 187-203.

Macedo, I. D., Carvalho, E. P. (2005). *A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. (Berlendis & Vertecchia) (p. 65). São Paulo: UNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo.

Macedo, I. D., Leal, M. R., Silva, J. E. (2004). *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil* (p. 32). São Paulo, SP: Governo do Estado de São Paulo.

Macedo, I. D., Seabra, J. E., Silva, J. E. (2008). Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, 32, 582 - 595. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.12.006.

Mahlia, T. M., Abdulmuin, M. Z., Alamsyah, T. M., Mukhlisshien, D. (2001). An alternative energy source from palm wastes industry for Malaysia and Indonesia. *Energy Conversion and Management*, 42, 2109-2118.

Malça, J., Freire, F. (2006). Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bioethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. *Energy*, 31, 3362-3380. doi: 10.1016/j.energy.2006.03.013.

Malça, J., Rozakis, S., Freire, F. (2003). Análise Energética do Ciclo de Vida de Biocombustíveis: Aplicação à fileira do bioetanol em França. In *Comunicação apresentada nas 3^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia* (p. 12). Lisboa.

Marzullo, R. D. (2007). *Análise de ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, visando a produção de biodiesel* (p. 303). São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Maturana, A. (2007). *Informe Interno*. Bogotá D.C.: Area de Investigaciones, Universidad Mawela Beltran.

MMA. (2009). *Brasil poderá ultrapassar meta de redução do desmatamento e chegar a 90% até 2020*. Disponível em <http://www.agenciabrasil.gov.br/noticias/2009/12/08/materia.2009-12-08.5791112132/view>.

MME. (2002). Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. *Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003*. Disponível em <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>.

- Nassar, A. M., Rudorff, B. F., Antoniazzi, L. B., Aguiar, D. A., Bacchi, M. R., Adami, M., et al. (2008). Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use change. In P. Zurbier & J. C. Vooren, *Sugarcane ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment* (1 ed., pp. 63-93). Wageningen Academic.
- Neto, B. d. (2007). *Balanço energético do óleo de dendê (Elaeis guineensis Jacq) no Cerrado* (p. 44). Brasília/DF: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília.
- Ngan, M. A., May, C. Y., Yusof, B. (1993). No Title. In *Energy Forum* (pp. 26-27). Langkawi.
- Oliveira, M. E., Vaughan, B. E., Rykiel, E. J. (2005). Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint. *BioScience*, 55(7), 593. doi: 10.1641/0006-3568(2005)055[0593:EAFECD]2.0.CO;2.
- Ometto, A. R. (2000). *Discussão sobre os fatores ambientais impactados pelo setor sucroalcooleiro e a certificação socioambiental*. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Ometto, A. R. (2005). *Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia* (p. 209). São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Ometto, A. R., Ramos, P. A. R., Lombardi, G., Scanavini, F. L., Ortega, E., Coelho Filho, (2002). Mini-usinas de álcool integradas (MUAI): avaliação emergética. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000000220020002000200024&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200024&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 21 Junho de 2010.
- Ortega, E., Souza, A., Storfer, J. (2009). Análise emergética de um sistema integrado de produção inovador: a Fazenda Jardim de Marcelo Guimarães Melo em Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 4 (2), 3180-3183.
- Pacca, S., Moreira, J. R. (2009). Historical carbon budget of the Brazilian ethanol program. *Energy Policy*, 37(11), 4863-4873. doi: 10.1016/j.enpol.2009.06.072.
- Panichelli, L., Gnansounou, E., Dauriat, A., Villegas, J. D. (2008). *Accounting for indirect land-use changes in GHG balances of biofuels*. Carbon (p. 22). Lausanne.
- Pereira, C. L. (2008). *Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais. Estudo de caso: Suco de Laranja e Etanol* (p. 290). Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- Pimentel, D., Patzek, T. W. (2005). Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. *Natural Resources Research*, 14(1), 65-76. doi: 10.1007/s11053-005-4679-8.
- Razafimbelo, T., Barthe, B., Larre, M., Larré-Larrouy, M., Luca, E. F., Laurent, J., et al. (2006). Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 115, 285-289. doi: 10.1016/j.agee.2005.12.014.

Reijnders, L., Huijbregts, M. A. (2008). Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases. *Journal of Cleaner Production*, 16, 477-482. doi: 10.1016/j.jclepro.2006.07.054.

RFA. (2008). *Estatísticas: Ethanol Industry Overview*. Washington, DC. Disponível em <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#EIO>.

São Paulo. (2002). *Lei n. 11.241 de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas*. (p. 4). São Paulo, SP.

Schmidt, J. H. (2007). *Life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. Development and Planning*, Aalborg University (p. 276). Aalborg University: Development and Planning.

Seabra, J. E. (2008). *Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., et al. (2008). Use of U.S. Croplands for biofuels increases Greenhouse Gases through emissions from Land Use Change. *Science*, 319(2008), 1238 - 1240. doi: 10.1126/science.1151861.

SECEX. (2009). *Exportações anuais de etanol pelo Brasil*. Brasília/DF: Secretaria de Comércio Exterior (Secex). Disponível em <http://www2.desenvolvimento.gov.br/sitio/secex/depPlaDesComExterior/indEstatisticas/balComercial.php>.

Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Michael, G., Shapouri, H. (1998). An overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles. *Energy*. Cole Boulevard, Golden Colorado.

Silva, E. M., Sakatsume, F. (1974). A Política Brasileira de Biocombustíveis. In Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, *Public Policies: Tema # 3: The Brazilian Biofuels Policy. The Brazilian Agriculture and Agro-Energy Policies* (pp. 31-38). Brasília: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial.

Simapro. (2008). *Classroom 2.0* (p. version 7.1.8.). Amersfoort, The Netherlands: PreConsultants BV.

Smeets, E. M. (2008). *Possibilities and limitations for sustainable bioenergy production systems. Development* (p. 307). Netherlands: European Union's Sixth Framework Programme for Research and Technological Development and the Netherlands Environmental Assessment Agency.

Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A., Dolzan, P., Turkenburg, W., et al. (2008). The sustainability of Brazilian ethanol - An assessment of the possibilities of certified production. *Biomass and Bioenergy*, 32(8), 781-813. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.01.005.

Soares, L. H., Alves, B. J., Urquiaga, S. (2009). *Mitigação das Emissões de Gases Efeito Estufa pelo Uso de Etanol da Cana-de-açúcar Produzido no Brasil. Circular Técnica* (Vol. 27, p. 14). Seropédica, RJ: Embrapa.

Souza, A. P., Gaspar, M., Silva, E. A., Ulian, E. C., Waclawovsky, A. J., Nishiyama, M. Y., et al. (2008). Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant, cell & environment*, 31(8), 1116-27. doi: 10.1111/j.1365-3040.2008.01822.x.

- Souza, S. P., Pacca, S., Ávila, M. T., Borges, J. L. (2010). Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renewable Energy*, 35, 2552-2561. doi: 10.1016/j.renene.2010.03.028
- Todd, J. A., Curran, M. A. (1999). *Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup*. *Environmental Toxicology* (p. 31). Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC); SETAC Foundation for Environmental Education.
- Unica, Orplana. (2010). Preço Médio do ATR (Açúcar Total Recuperável) no Estado de São Paulo. 05/04/2010. Disponível em <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>.
- UNICA. (2009). Estatística do Setor Sucroalcooleiro, Safra 2008/2009. *União da Agroindústria de Cana-de-Açúcar*. Disponível em http://www.portalunica.com.br/portalunica/files/referencia_estatisticas_producaoBrasil-9-Tabela.xls.
- Vianna, F. C. (2006). Análise de ecoeficiência: avaliação do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e petrodiesel.
- Vieira Junior, P. A., Vieira, A. C. P., Buainain, A. M., Lima, F., Silveira, J. M. F. (2008). Produção brasileira de cana-de-açúcar e deslocamento da fronteira agrícola no estado do Mato Grosso. *Informações Econômicas*, 38(4), 20.
- Vijaya, S., Ma, A. N., Choo, Y. M., Nik Meriam, N. S. (2008). Life cycle inventory of the production of crude palm oil - a gate to gate case study of 12 palm oil mills. *Journal of Oil Palm Research*, 20, 484-494.
- Wang, M., Wu, M., Huo, H. (2007). Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. *Environmental Research Letters*, 2, 13. doi: 10.1088/1748-9326/2/2/024001.
- Whitaker, M., Heath, G. (2008). *Life Cycle Assessment of the Use of Jatropha Biodiesel in Indian Locomotives*. *Production* (p. 100). Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Wicke, B., Dornburg, V., Faaij, A. (2007). *A Greenhouse Gas Balance of Electricity Production from Co-firing Palm Oil Products from Malaysia*. *Society* (p. 62). Utrecht, Netherlands: Universiteit Utrecht, Copernicus Institute, Department of Science, Technology and Society.
- Wicke, B., Dornburg, V., Junginger, M., Faaij, A. (2008). Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1322-1337. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.04.001.
- Wood, B. J., Corley, R. H. (1991). The Energy Balance of Oil Palm Cultivation. In *PORIM Intl. Palm Oil Conference – Agriculture*.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emission from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, 303 - 329. Disponível em www.AnnualReviews.org.
- Yee, K. F., Tan, K. T., Abdullah, A. Z., Lee, K. T. (2009). Life cycle assessment of palm biodiesel: Revealing facts and benefits for sustainability. *Applied Energy*, 86, S189-S196. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.04.014.

Yu, S., Tao, J. (2009). Energy efficiency assessment by life cycle simulation of cassava-based fuel ethanol for automotive use in Chinese Guangxi context. *Energy*, 34(1), 22-31. doi: 10.1016/j.energy.2008.10.004.

Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil – innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 14(1), 87-93. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.07.005.

Zhu, X., Long, S. P., Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current opinion in biotechnology*, 19(2), 153-9. doi: 10.1016/j.copbio.2008.02.004.

APÊNDICE A - Indicadores de eficiência e fatores de emissão adotados

Insumo Químico	Intensidade energética (GJ/kg)	Fonte	Emissões de GEE (kg CO ₂ e/kg)	Fonte
Indústria				
Cal Virgem	0,0062	(Simapro, 2008)	0,88	(Simapro, 2008)
Ácido Fosfórico	0,0157	Simapro (2008)	1,150	Simapro (2008)
Ácido Sulfúrico	0,0024	Simapro (2008)	0,34	Simapro (2008)
Lubrificantes	0,000174	Simapro (2008)	0,71 ¹⁾	Simapro (2008)
Hidróxido de sódio	0,04	Simapro (2008)	1,88	Simapro (2008)
Metanol	0,04	Simapro (2008)	0,786	(Ecoinvent, 2004)
Agrícola				
Nitrogênio (produção)	0,07	Simapro (2008)	3,26	Simapro (2008)
Nitrogênio (uso)	-	-	4,65	IPCC (2006b)
Fósforo	0,03	Simapro (2008)	2,01	Simapro (2008)
Potássio	0,01	Simapro (2008)	0,51	Simapro (2008)
Calcário (produção)	0,00038	Simapro (2008)	0,4397	(IPCC, 2006c)
Calcário (uso)	-		0,44	IPCC (2006b)
Herbicida	0,41	Simapro (2008)	15,5	Simapro (2008)
Inseticida	0,41	Simapro (2008)	13,7	Simapro (2008)
Bórax	0,03	Simapro (2008)	1,6	Simapro (2008)
Máquinas e equipamentos				
Aço	0,02264	(Brasil, 2009)	1,25	(Kim e Worrell, 2002)
Aço inoxidável	0,0541 ²⁾	(Pimentel e Patzek, 2005)	1,25	(Kim e Worrell, 2002)
Cimento	0,003	(Brasil, 2009)	0,64	(Worrell, Price, et al., 2001)
Combustíveis e energia				
Diesel (produção)	0,054	Simapro (2008)	14,19 ³⁾	(EUCAR-CONCAWE-JCR, 2008)
Diesel (uso)	0,0416	EIA (2009a)	75,34 ³⁾	(IPCC, 2006d)
Gasolina (produção)	0,06	Simapro (2008)	12,5 ³⁾	(EUCAR-CONCAWE-JCR, 2008)
Gasolina (uso)	0,0426	EIA (2009a)	71,67 ³⁾	(IPCC, 2006d)
Elettricidade	-	-	73,0 ⁴⁾	(IEA, 2009)

¹⁾ Fator de emissão em kg CO₂e/m³.

²⁾ A energia embutida é 2,39 vezes a energia do aço leve (Pimentel e Patzek, 2005).

³⁾ Valores expressos em kg CO₂e/GJ.

⁴⁾ Valor expresso em kg CO₂e/kWh. Corresponde ao mix energético brasileiro.

APÊNDICE B - Entrada de dados para o ciclo de vida do biodiesel de dendê

Fase viveiro	Quantidade	Unidade	Quantidade	Unidade
Nitrogênio	0,13	kg/ha	-	-
Fósforo	0,13	kg/ha	-	-
Potássio	0,13	kg/ha	-	-
Magnésio	0,02	kg/ha	-	-
Irrigação (1º - 2º mês)	0,255	Litros/saco/dia	73,03	Litros/ha.ciclo vida
Irrigação (3º - 4º mês)	0,312	Litros/saco/dia	89,26	Litros/ha.ciclo vida
Irrigação (5º - 6º mês)	0,454	Litros/saco/dia	129,83	Litros/ha.ciclo vida
Irrigação (7º - 12º mês)	0,653	Litros/saco/dia	186,63	Litros/ha.ciclo vida
Fase agrícola *				
Sementes	180,00	unidade/ha.25anos	-	-
<i>Pueraria javanica ou phaseoloides</i>	5,00	kg/ha	-	-
Nitrogênio	41,48	kg/ha.ano	-	-
Fósforo	78,64	kg/ha.ano	-	-
Potássio	123,30	kg/ha.ano	-	-
Magnésio	7,51	kg/ha.ano	-	-
Boro	5,72	kg/ha.ano	-	-
Herbicida	2,5	kg/ha.ano	-	-
Inseticida	1,2	kg/ha.ano	-	-
Fase industrial				
Hidróxido de potássio (KOH) ¹⁾	5	g/kg óleo	-	-
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) ¹⁾	5,125	g/ kg óleo	-	-
Etanol ¹⁾	310	g/kg óleo	-	-
Metanol ¹⁾	175,7	g/kg óleo	-	-
Combustível				
Transporte cachos (caminhão vazio)	10,06	kg diesel/ha.ano	-	-
Transporte cachos (caminhão cheio)	42,24	kg diesel/ha.ano	-	-
Diesel <i>start-up</i>	68,67	kg diesel/ha.ano	-	-

¹⁾ Maturana (2010).

* Taxa de aplicação de insumos descontada dos nutrientes contidos nos coprodutos utilizados como adubo orgânico.

APÊNDICE C - Entradas de energia do ciclo de vida do biodiesel de dendê (continua)

Entrada (GJ/ha.ano)	GJ/ha.ano
Agrícola	
1. Mudas e sementes	
Sementes	0,018
<i>Pueraria phaseoloides</i>	0,028
Viveiro	0,014
Total	0,060
2. Insumos agrícolas	
2.1. Fertilizantes	
Nitrogênio (N)	2,804
Fósforo (P ₂ O ₅)	2,729
Potássio (K ₂ O)	1,189
Magnésio (MgO)	0,021
Boro (B)	0,176
Total	6,980
2.2 Defensivos agrícolas	
Herbicida	1,018
Inseticida	0,486
Total	1,504
Total	8,54
3. Transporte	
Colheita (campo)	manual
Transporte (até o campo)	0,050
Transporte (do campo à usina)	0,211
Total	0,261
4. Máquinas agrícolas	
Caminhão	0,29
5. Transporte e disposição dos coprodutos (+ irrigação complementar)	
Irrigação palma de dendê (cenário 1)	16,19
Irrigação palma de dendê (cenário 2)	5,51
Total agrícola (cenário 1)	25,29
Total agrícola (cenário 2)	14,60
Indústria	
5. Insumos industriais	
Etanol	2,46
Catalisador hidróxido de potássio (KOH)	0,03
Neutralizante Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	0,05
Total	2,53
6. Equipamentos Industriais	
Total	0,02

APÊNDICE C - Entradas de energia do ciclo de vida do biodiesel de dendê (conclusão)

Entrada (GJ/ha.ano)	GJ/ha.ano
7. Consumo de energia	
7.1. Extração do óleo	
Eletricidade a partir da central elétrica	1,47
Vapor a partir da central elétrica	33,76
Diesel <i>start-up</i>	0,89
7.2. Transesterificação	
Eletricidade	2,37
Total	3,26
Total indústria	5,81
Total energia líquida (cenário 1)	31,103
Total energia líquida alocada (cenário 1)	29,329
Total energia líquida (cenário 2)	20,415
Total energia líquida alocada (cenário 2)	19,20

APÊNDICE D - Indicadores de eficiência energética para o biodiesel de dendê

Cenário 1	
Total saída líquido	144,380
NER	4,642
NER alocado	4,923
EER	0,928
Cenário 2	
Total saída líquido	144,380
NER	7,072
NER alocado	7,521
EER	0,928

APÊNDICE E - Emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do biodiesel de dendê (continua)

Etapas	Quantidade (kg CO₂e/ha.ano)
Viveiro	
Nitrogênio (N)	1,02
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,26
Potássio (K ₂ O)	0,06
Magnésio	0,02
Total	1,3607
Agrícola	
Insumos Agrícolas	
Fertilizantes	
Nitrogênio (N)	328,17
Fósforo (P ₂ O ₅)	158,07
Potássio (K ₂ O)	62,26
Magnésio	7,89
Boro	9,15
Total	565,54
Defensivos agrícolas	
Herbicida	38,75
Inseticida	16,44
Total	55,19
Total	620,73
Transporte (Combustível)	
Colheita (campo)	manual
Transporte de CFF (ida)	2,62
Transporte de CFF (volta)	11,02
Diesel <i>start-up</i>	4,27
Total	17,91
Máquinas agrícolas	
Caminhão	6,74
Transporte e disposição dos coprodutos + irrigação complementar (Combustível)	
Irrigação palma de dendê (cenário 1)	328,38
Irrigação palma de dendê (cenário 2)	111,66
Total Agrícola (cenário 1)	973,76
Total Agrícola (cenário 2)	757,04

APÊNDICE E - Emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do biodiesel de dendê (conclusão)

Etapas	Quantidade (kg CO₂e/ha.ano)
Indústria	
Insumos industriais	
INTEGRADO	
Etanol	536,25
Catalisador hidróxido de potássio (KOH)	1,27
Neutralizante Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	7,13
Total	544,65
TRADICIONAL	
Metanol	715,12
Catalisador hidróxido de potássio (KOH)	1,27
Neutralizante Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	7,13
Total	723,53
Equipamentos industriais	
Equipamentos	0,54
Total Indústria	545,19
Emissões atribuídas ao uso dos coprodutos	96,53
Total Integrado (cenário 1, sem alocação)	1616,84
Total Integrado (cenário 2, sem alocação)	1400,11
Total Integrado (cenário 1, com alocação)	1532,76
Total Integrado (cenário 2, com alocação)	1327,31
Total Tradicional (cenário 1, sem alocação)	1795,71
Total Tradicional (cenário 2, sem alocação)	1578,99

APÊNDICE F - Emissões de GEE devido à mudança no uso do solo para a cultura de dendê.

Emissões por tipo de bioma substituído	Kg CO₂e/ha.ano
Emissões LUC (Cerrado)	61,11
Emissões LUC (Cerradão)	1894,44
Emissões LUC (Pastagem degradada)	-3507,78

APÊNDICE G - Razão de energia líquida alocada para os diferentes cenários e escopo da usina - sistema tradicional

Agrícola		Indústria		Cenário 1						Cenário 2		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
0,0	29,8	0,0	0,00	0,0	9,06%	0,71	30,5	160,2	0,28	5,25	19,80	5,89
0,1	26,8	3,0	0,07	3,1	9,06%	0,64	27,8	146,4	0,28	5,28	19,80	5,99
0,2	23,9	6,0	0,14	6,1	9,06%	0,57	25,0	132,7	0,28	5,32	19,80	6,10
0,3	20,9	8,9	0,21	9,2	9,06%	0,50	22,2	119,0	0,28	5,37	19,80	6,25
0,4	17,9	11,9	0,29	12,2	9,06%	0,43	19,4	105,3	0,28	5,43	19,80	6,44
0,5	14,9	14,9	0,36	15,3	9,06%	0,36	16,7	91,5	0,28	5,51	19,80	6,69
0,6	11,9	17,9	0,43	18,3	9,06%	0,29	13,9	77,8	0,28	5,63	19,80	7,03
0,7	8,9	20,9	0,50	21,4	9,06%	0,21	11,1	64,1	0,28	5,80	19,80	7,56
0,8	6,0	23,9	0,57	24,4	9,06%	0,14	8,3	50,3	0,28	6,08	19,80	8,43
0,9	3,0	26,8	0,64	27,5	9,06%	0,07	5,5	36,6	0,28	6,65	19,80	10,18
1,0	0,0	29,8	0,71	30,5	9,06%	0,00	2,8	22,9	0,28	8,37	19,80	15,43
A: Fração de suco destinado ao açúcar						G: <i>input</i> energético na indústria para produção de etanol (GJ/ha.ano)						
B: <i>Input</i> energético, antes da porteira, referente à cana para etanol (GJ/ha.ano)						H: Energia de entrada (ACV) (GJ/ha.ano)						
C: <i>Input</i> energético, antes da porteira, referente à cana para açúcar (GJ/ha.ano)						I: Produtividade etanol (GJ/ha.ano)						
D: <i>input</i> na fábrica para produção do açúcar (GJ/ha.ano)						J e L: Eletricidade excedente (GJ/ha.ano)						
E: Agrícola + Indústria (C + D)						K e M: Razão de energia líquida						
F: Porcentagem de alocação												

APÊNDICE I - Emissões de GEE alocadas para os diferentes cenários e escopo da usina - sistema tradicional

Agrícola					Indústria														
		Cen.1	Cen.2			Cen.1	Cen.2			Cen.1	Cen.2			Cen.1	Cen.2			Cen.1	Cen.2
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
0,0	2919,07	2914,00	2597,9	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	9,06%	390,58	389,90	347,6	3303,9	20,63	2945,5	18,39
0,1	2627,16	2360,34	2104,3	291,9	29,1	26,0	27,34	2,73	2,43	31,9	28,4	9,06%	351,52	315,82	281,6	2679,0	16,73	2388,4	14,91
0,2	2335,25	1864,96	1662,7	583,8	116,6	103,9	54,68	10,92	9,73	127,5	113,6	9,06%	312,46	249,54	222,5	2126,0	13,27	1895,4	11,83
0,3	2043,35	1427,86	1273,0	875,7	262,3	233,8	82,02	24,56	21,90	286,8	255,7	9,06%	273,40	191,05	170,3	1644,9	10,27	1466,5	9,16
0,4	1751,44	1049,04	935,3	1167,6	466,2	415,7	109,36	43,67	38,93	509,9	454,6	9,06%	234,35	140,36	125,1	1235,6	7,71	1101,6	6,88
0,5	1459,53	728,50	649,5	1459,5	728,5	649,5	136,70	68,23	60,83	796,7	710,3	9,06%	195,29	97,47	86,9	898,2	5,61	800,7	5,00
0,6	1167,63	466,24	415,7	1751,4	1049,0	935,3	164,04	98,25	87,60	1147,3	1022,8	9,06%	156,23	62,38	55,6	632,6	3,95	564,0	3,52
0,7	875,72	262,26	233,8	2043,3	1427,9	1273,0	191,38	133,74	119,23	1561,6	1392,2	9,06%	117,17	35,09	31,3	438,8	2,74	391,2	2,44
0,8	583,81	116,56	103,9	2335,3	1865,0	1662,7	218,72	174,67	155,73	2039,6	1818,4	9,06%	78,12	15,60	13,9	316,9	1,98	282,6	1,76
0,9	291,91	29,14	26,0	2627,2	2360,3	2104,3	246,06	221,07	197,09	2581,4	2301,4	9,06%	39,06	3,90	3,5	266,9	1,67	238,0	1,49
1,0	0,00	0,00	0,0	2919,1	2914,0	2597,9	273,40	272,93	243,33	3186,9	2841,2	9,06%	0,00	0,00	0,0	288,7	1,80	257,4	1,61
A: Fração de suco destinado ao açúcar											K: Agrícola + Indústria (F + H) - Cenário 1								
B: Emissões antes da porteira referente à cana para etanol (kg CO ₂ e/ha.ano)											L: Agrícola + Indústria (G + H) - Cenário 2								
C e D: Emissões antes da porteira referente à cana para etanol (kg CO ₂ e/ha.ano) - alocado											M: Porcentagem de alocação								
E: Emissões antes da porteira referente à cana para açúcar (kg CO ₂ e/ha.ano)											N: Emissões na indústria para produção de etanol (kg CO ₂ e/ha.ano)								
F e G: Emissões antes da porteira referente à cana para açúcar (kg CO ₂ e/ha.ano) - alocado											O e P: Emissões na indústria para produção de etanol (kg CO ₂ e/ha.ano) - alocado								
H: Emissões na fábrica para a produção de açúcar (kg CO ₂ e/ha.ano)											Q e S: Emissões do ciclo de vida (kg CO ₂ e/ha.ano)								
I e J: Emissões na fábrica para a produção de açúcar (kg CO ₂ e/ha.ano) - alocado											R e T: Emissões totais (g CO ₂ e/MJ _f)								