

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

Rafael Silva Capaz

ESTUDO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: ASPECTOS METODOLÓGICOS E ESTUDOS DE CASO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia da Energia.

Área de Concentração: Planejamento Energético e Gestão de Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

Agosto de 2009

Itajubá - MG



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Estudo do Desempenho Energético da Produção de Biocombustíveis: Aspectos Metodológicos e Estudos de Caso”**

Autor: **Rafael Silva Capaz**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	Joaquim E. A. Seabra
2º	A	Electo Eduardo Silva Lora
3º	A	Luiz Augusto Horta Nogueira

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 31 de agosto de 2009.

Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra
1º Examinador - NIPE-UNICAMP

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira
3º Examinador - UNIFEI - (Orientador)

"A medida da vida não é a sua duração, mas a sua doação."

Peter Marshal

Aos meus avós José e Neuza, João e Leda

Agradecimentos

Ao meu estimado orientador Luiz Augusto Horta Nogueira.

Aos técnicos do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), especialmente José Guilherme, Claudemir e Felipe.

Aos técnicos do Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária (IMEA), especialmente Luana.

À professora Maria Inês Alvarenga.

Aos meus colegas e amigos da Universidade Federal de Itajubá.

À minha família.

Aos colaboradores diretos e indiretos deste trabalho.

RESUMO

Nas últimas décadas, a busca de alternativas aos combustíveis fósseis tem sido incentivada por questões ambientais, estratégicas e econômicas, como se observa particularmente no setor de transporte, responsável por mais de um quarto do consumo global de energia e abastecido praticamente por combustíveis à base de petróleo. Entre estas alternativas se destacam os combustíveis produzidos a partir da biomassa (biocombustíveis), motivando estudos e avaliações da conveniência de sua produção. Neste sentido, a análise energética, desenvolvida durante a década de setenta e posteriormente generalizada em análises do ciclo de vida (ACV), tem sido uma ferramenta largamente utilizada em estudos de viabilidade energética de biocombustíveis, a partir da contabilização sistemática das entradas e saídas de energia direta (eletricidade e combustível) e energia embutida nos insumos e produtos. No entanto, a ausência de uma metodologia consolidada para tal análise impede a comparação clara e direta de resultados, uma vez que cada estudo valida-se por meio de pressupostos próprios, a partir da adoção de coeficientes e das fronteiras do sistema. A fim de questionar os limites deste tipo de análise, este trabalho comparou o desempenho energético de dois sistemas produtivos, correspondentes aos principais biocombustíveis comercializados no Brasil: biodiesel de soja e etanol de cana-de-açúcar. A base de dados utilizada refere-se às safras de 2007/08 e 2008/09 e estudos similares, a partir da qual se pode detalhar a etapa agrícola e industrial dos sistemas, considerando três níveis de regressão (energia direta, energia embutida nos insumos e energia embutida nos equipamentos). Estimou-se um input energético médio de 2116,9 MJ/t_{grão} e 160,8 MJ/t_{cana} na etapa agrícola, que somados aos demais custos energéticos do processo industrial resultaram, respectivamente, em 641,7 kJ/MJ_{biodiesel} e 120,3 kJ/MJ_{etanol}. Nas condições de referência computou-se uma relação energia produzida/energia consumida (*output/input*), ou balanço geral do sistema, equivalente a 4,30 para o biodiesel de soja e 9,50 para o etanol de cana, chegando a 9,78 quando resíduos do processo, como torta de vinhaça, eram aplicadas no canavial. Observou-se uma variação expressiva nos indicadores resultantes da análise quando a energia consumida pelo sistema foi alocada a partir de variados critérios. Mesmo assim todos eles ilustraram o melhor desempenho do etanol. Ao considerar apenas a obtenção de biocombustível em função do consumo de energia fóssil, a relação de energia apresentou valores de 7,25 para o biodiesel e 12,11 para o etanol. Ao longo do estudo, verificou-se que a falta de padronização dos coeficientes energéticos adotados confere aos resultados finais expressivas variações e, juntamente com os procedimentos utilizados na valoração energética dos co-produtos, ilustram alguns dos limites verificados neste tipo de análise, sugerindo um tratamento cauteloso na formulação de um procedimento mais consolidado.

Palavras-chave: biocombustível, biodiesel de soja, etanol de cana, análise energética

Abstract

In recent times, the quest for alternatives to fossil fuels has been fostered by environmental, strategic and economic issues, as particularly can be observed in the transport sector, responsible for more than a quarter of global consumption of energy and currently supplied mostly with oil products. Among these alternatives, liquid fuels produced from biomass (biofuels) present a major significance and motivate several studies and evaluations of the viability of their production. In this sense, the energy analysis, developed during 70's and later generalized in Life Cycle Analyses (LCA), is a tool widely used in energy feasibility studies of biofuels, basically accounting and comparing inputs and outputs of direct energy (electricity and fuels) and embodied energy in materials. However, the absence of a consolidated methodology for this analysis prevents the clear and direct comparison of results as each study validates itself through its own assumptions, from the adoption of coefficients and determining the boundaries of the system. In order to explore the limits of this type of analysis, this study compared the energetic performance of two productive systems, corresponding to main biofuels commercialized in Brazil: biodiesel of soybean and ethanol of sugarcane. The energy analysis was carried based on harvests of 2007/08 and 2008/09, detailing the agricultural and industrial stages, and considering three levels of regression (direct energy; embodied energy in materials, like diesel, fertilizers, herbicides; and embodied energy in equipments). The input energy values reached 2116,9 MJ/t_{grain} and 160,8 MJ/t_{cane} in the agricultural stage, that added to energy costs of industrial process resulted, respectively, in 641,7 kJ/MJ_{biodiesel} and 120,3 kJ/MJ_{ethanol}. In the reference conditions, it was computed an relation of output/input of 4,30 for biodiesel of soy and 9,50 for ethanol of sugarcane, which reaching 9,78 when residues of process, as pie and vinasse, were applied in the fertilization. An expressive variation in these indicators was observed when allocation criteria were considered to attribute to the main product, that is biofuel, the energy consumed exclusively to get it. When considering only input of fossil energy, the output/input balance presents 7,25 units for biodiesel and 12,11 for ethanol. Throughout the study, it was verified that the lack of standardization in relation of the coefficients adopted in work cause expressive variations in final results and, the methods of energy valuation of the co-products illustrate some limits in is a kind of analysis, suggesting a careful treatment in the formularization of a consolidated methodology.

Keywords: biofuel, biodiesel of soybean, ethanol of sugarcane, energy analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 O processo geral da fotossíntese	21
Figura 1.2: Fluxo de energia nos vegetais	22
Figura 1.3: Eficiência de conversão em da energia solar em biomassa	22
Figura 1.4: Fontes de Biomassa.....	25
Figura 1.5: Rotas tecnológicas para produção de bioenergia	26
Figura 1.6: Contribuição da bioenergia no consumo global de energia primária em 2007.....	27
Figura 2.1: Estrutura típica da cana-de-açúcar	33
Figura 2.2: Área plantada e produtividade média de cana-de-açúcar no Brasil	35
Figura 2.3: Produção de cana-de-açúcar nas regiões brasileiras e localização das usinas	35
Figura 2.4: Área plantada das principais culturas no Brasil	35
Figura 2.5: Áreas potenciais para o cultivo de cana-de-açúcar	36
Figura 2.6: Estrutura das moléculas de glicerídeo.....	39
Figura 2.8. Rotas tecnológicas para produção de etanol	43
Figura 2.9: Diagrama de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar	44
Figura 2.10: Reação de Transesterificação.....	46
Figura 2.11: Fluxograma do processo de obtenção de biodiesel.....	48
Figura 2.12: Evolução da produção de biocombustíveis.....	49
Figura 2.13: Produção de etanol em 2007 por regiões no mundo	49
Figura 2.14: Produção de biodiesel em 2007 por regiões no mundo	50
Figura 2.15: Rendimentos de biocombustíveis em termos de volume e energia obtidos por hectare de matéria-prima	51
Figura 3.1: Fronteiras de um sistema de produção de biocombustíveis.....	58
Figura 3.2: Níveis de regressão num sistema de produção de biocombustíveis.....	59
Figura 3.3: Critérios de alocação em sistemas produtivos com múltiplos produtos	65
Figura 4.1: Localização das cidades produtoras de soja consideradas no levantamento dos dados.....	73
Gráfico 5.1: Contribuição energética total dos insumos contabilizados na etapa agrícola da soja.....	84
Gráfico 5.3: Contribuição energética de cada etapa na produção de biodiesel de soja.....	90
Gráfico 6.1: Fluxo de energia total num sistema de produção de Biodiesel de Soja (Valores em kJ/MJ _{biodiesel}).....	95
Gráfico 6.2: Fluxo de energia total num sistema de produção de Etanol de Cana-de-açúcar (Valores em kJ/MJ _{etanol}).....	96

Gráfico 6.3: Variação do indicador I_{AE} (energia total) em função da alocação por massa para o sistema produtivo de etanol de cana	100
Gráfico 6.4: Variação do indicador I_{AE} (energia total) em função da alocação por valor monetário para os sistemas produtivos de biodiesel de soja e etanol de cana.....	101
Gráfico 6.5: Variação do I_{NR3} por coeficiente energético adotado no sistema da soja.....	103
Gráfico 6.6: Variação do I_{NR3} por coeficiente energético adotado no sistema da cana.....	103
Gráfico 6.7: Variação do I_{NR3} por outros parâmetros no sistema da soja.....	104
Gráfico 6.8: Variação do I_{NR3} por outros parâmetros no sistema da cana.....	104
Gráfico 6.9: Variação do I_{NR3} e I_L a partir da valoração energética dos co-produtos.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características físico-químicas do biodiesel (ésteres metílicos) de várias espécies vegetais e do óleo diesel convencional Tipo C	30
Tabela 2.2: Propriedades da gasolina e do etanol	30
Tabela 2.3: Produtividade da Cana-de-açúcar	34
Tabela 2.4: Principais parâmetros agrícolas da cultura da cana-de-açúcar	37
Tabela 2.5: Colheita de cana para a safra 2003/04 e previsões	38
Tabela 2.6: Características de algumas oleaginosas	40
Tabela 2.7: Principais parâmetros do processamento da cana.....	45
Tabela 3.1: Contribuição energética dos níveis de regressão	59
Tabela 3.2: Coeficientes energéticos dos insumos considerados em algumas análises energéticas	61
Tabela 3.3: Parâmetros energéticos para na produção de cana-de-açúcar	62
Tabela 3.4: Contribuição energética da mão-de-obra no cultivo de algumas matérias-primas usadas para a produção de biocombustível.....	63
Tabela 3.5: Sensibilidade dos métodos de alocação em diferentes sistemas produtivos	66
Tabela 3.6: Balanço energético da obtenção de biodiesel a partir do sebo bovino em função de diferentes rendimentos reacionais.....	67
Tabela 3.7: Balanço energético da obtenção de biodiesel a partir do trigo em função de diferentes critérios de alocação	68
Tabela 3.8: Balanço energético do ciclo de vida de vários biocombustíveis	68
Tabela 3.9: Balanço energético da cadeia do biodiesel	70
Tabela 3.10: Balanço energético da obtenção de biocombustíveis	70
Tabela 4.1: Coeficientes energéticos (CE) dos fertilizantes e defensivos químicos utilizados na etapa agrícola.....	76
Tabela 4.2: Coeficientes energéticos dos outros insumos utilizados na etapa agrícola	76
Tabela 4.3: Coeficientes energéticos dos equipamentos utilizados na etapa agrícola.....	77
Tabela 4.4: Coeficientes energéticos dos insumos utilizados na etapa industrial	77
Tabela 4.5: Coeficientes energéticos dos equipamentos no processamento de cana	78
Tabela 4.6: Coeficientes energéticos das edificações na etapa industrial	78
Tabela 4.7: Coeficientes energéticos dos produtos e co-produtos contabilizados na análise energética.....	79
Tabela 4.8: Indicadores de balanço energético da obtenção de biocombustíveis	80
Tabela 5.1: Perfil das unidades produtoras de soja nas últimas safras	82
Tabela 5.2: Aporte energético e mássico de insumos na produção da soja.....	83

Tabela 5.3: Aporte energético e mássico de insumos na produção da cana-de-açúcar	86
Tabela 5.4: Aporte energético e mássico na etapa industrial da soja	88
Tabela 5.5: Produtos e co-produtos gerados no processamento do grão de soja.....	91
Tabela 5.6: Aporte energético e mássico de insumos na produção de etanol	91
Tabela 5.7: Produtos e co-produtos gerados no processamento da cana.....	92
Tabela 6.1: Contribuição energética da mão-de-obra no sistema produtivo analisado com diferentes coeficientes	97
Tabela 6.2: Indicadores do balanço energético da obtenção de biocombustíveis	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas e Siglas

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise Ciclo de Vida
AGL	Ácidos Graxos Livres
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	Balanco Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
CCAP	Center for Clean Air Policy
CE	Coefficiente Energético
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EBAMM	ERG Biofuel Analysis Meta-Model
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
GENR	Gasto Energético no Repouso
GER	Gross Energy Requirement
GREET	Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
IFIAS	International Federation of Institutes for Advanced Study
IMEA	Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Analysis
MEG	Monoetilenoglicol
MIC	Ministério da Indústria e do Comércio
NEV	Net Energy Value
PAR	Photossintetic Active Radiation
PCI	Poder Calorífico Inferior

TTW	Tank-to-Wheel
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
WTG	Well-To-Gate
WTT	Well-To-Tank
WTW	Well-To-Wheel

Índices de fórmulas

E_{primaria}	Energia primária consumida
$E_{\text{secundária}}$	Energia secundária gerada
E_{entrada}	Energia requerida pelo sistema
E_{input}	Energia requerida pelo sistema
$E_{\text{solicitada}}$	Energia consumida pelo sistema
E_{entregue}	Energia entregue pelo sistema
$E_{\text{fóssil}}$	Energia requerida pelo sistema
$E_{\text{saída}}$	Energia obtida pelo sistema
E_{output}	Energia obtida pelo sistema
E_{Biocomb}	Energia embutida no biocombustível
$E_{\text{Co-prod.}}$	Energia embutida nos co-produtos
E_{NRi}	Energia consumida no nível de regressão i
E_{Biomassa}	Energia embutida no produto do sistema agrícola (cana ou grão)
$E_{\text{Agrícola}}$	Energia consumida na etapa agrícola
E_{Sol}	Energia solar consumida na etapa agrícola
$E_{\text{Matéria-prima}}$	Energia embutida na matéria-prima do processo
$E_{\text{Co-prod.}}$	Energia embutida nos co-produtos
$E_{\text{Extração}}$	Energia consumida na etapa de extração do óleo
$E_{\text{Indústria}}$	Energia consumida na etapa de conversão da biomassa
E_{Biocomb}	Energia embutida no biocombustível
E_{massa}	Energia alocada em função da massa
E_{energia}	Energia alocada em função da energia
E_{valor}	Energia alocada em função do valor monetário
I_{NRi}	Indicador considerando o aporte até nível de regressão i
I_{FRa}	Indicador considerando apenas a etapa agrícola do sistema
I_{FRs}	Indicador considerando a etapa agrícola com aporte de radiação solar
I_{FRe}	Indicador considerando apenas a etapa de extração do óleos

I_{FRi}	Indicador considerando apenas o processamento da biomassa
I_{An}	Indicadores com alocação por exigência nula
I_{Am}	Indicadores com alocação por massa
I_{Ae}	Indicadores com alocação por energia (poder calorífico)
I_{Avm}	Indicadores com alocação por valor monetário
I_L	Indicador líquido dos fluxos de energia

SUMÁRIO

RESUMO	6
Abstract.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	12
INTRODUÇÃO.....	18
PARTE I: ASPECTOS FUNDAMENTAIS	20
CAPÍTULO 1. PRODUÇÃO E USO DA BIOMASSA	20
1.1. Bioenergia: Definições e Conceitos	20
1.2. Fotossíntese	21
1.3. Recursos energéticos da biomassa.....	24
1.4. Processos de conversão energética da biomassa	26
1.5. A bioenergia no cenário global.....	27
CAPÍTULO 2: BIOCOMBUSTÍVEIS	29
2.1. Biocombustíveis: caracterização	29
2.2. Matérias-primas para os biocombustíveis	31
2.2.1. Matérias-primas açucaradas	32
2.2.2. Matérias-primas oleaginosas	39
2.3. Aspectos de produção dos biocombustíveis	42
2.3.1. Produção de etanol.....	42
2.3.2. Produção de biodiesel.....	45
2.4. Os biocombustíveis no cenário global e no Brasil	48
CAPÍTULO 3: ANÁLISE ENERGÉTICA DE PROCESSOS	52
3.1. Evolução dos conceitos de Análise Energética	52
3.2. Aspectos metodológicos da Análise Energética.....	54
3.2.1. Pressupostos metodológicos da ACV segundo a norma ISO 14040.....	55
3.2.2. Fronteiras do sistema analisado.....	57
3.2.2. Contabilização de Insumos na Análise Energética.....	60
3.2.3. Contabilização da Radiação Solar	62
3.2.4. Contabilização da Mão-de-obra.....	62

3.2.5. Alocação dos gastos energéticos nos produtos obtidos	64
3.3. Indicadores resultantes da Análise Energética	68
3.4. Métodos de análise energética	71
PARTE II: ESTUDOS DE CASO: DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO, RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA	72
4.1. Estudos de caso: Informações gerais e base de dados	72
4.1.1. Biodiesel de Soja	72
4.1.2. Etanol de Cana-de-açúcar	73
4.2. Níveis de regressão e Fronteiras do sistema	74
4.3. Coeficientes energéticos	75
4.4. Indicadores	79
4.5. Análise de sensibilidade	81
4.6. Valoração energética dos co-produtos.....	81
CAPÍTULO 5. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS	82
5.1. Etapa Agrícola	82
5.1.1. Produção da Soja	82
5.1.2. Produção da Cana-de-açúcar	85
5.2. Etapa Industrial.....	88
5.2.1. Produção de Biodiesel de soja.....	88
5.2.2. Produção de Etanol de cana-de-açúcar.....	91
CAPÍTULO 6. BALANÇO ENERGÉTICO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS.....	94
6.1. Fluxo de energia e massa.....	94
6.2. Indicadores do sistema.....	98
6.3. Análise de sensibilidade	102
6.4. Valoração energética dos co-produtos.....	104
PARTE III: CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

ANEXO A: Contabilização dos insumos na etapa agrícola	115
ANEXO B: Contabilização dos equipamentos na etapa agrícola e transporte da soja.....	116
ANEXO C: Contabilização dos equipamentos na etapa agrícola e transporte da cana-de-açúcar.....	117
ANEXO D: Contabilização do consumo de diesel na etapa agrícola e transporte da soja.	118
ANEXO E: Contabilização do consumo de diesel na etapa agrícola e transporte da cana-de-açúcar.....	119
ANEXO F: Resultados finais do sistema produtivo de biodiesel em função dos critérios de alocação	120
ANEXO G: Resultados finais do sistema produtivo de etanol (sem vinhaça e torta) em função dos critérios de alocação	121

INTRODUÇÃO

Atualmente observa-se uma intensa busca de alternativas aos combustíveis fósseis, principal insumo da matriz energética mundial, especialmente por serem fontes finitas com riscos de suprimento devido à instabilidade política dos maiores produtores, e por conta das consequências negativas ao meio ambiente associadas às emissões causadas pelo uso desses combustíveis. Como ressaltava o estudo da IEA (2004), dificilmente outro setor sentiria falta de alternativas ao petróleo como o setor de transportes, que consome 30% da energia global, sendo suprido em 99% por combustíveis fósseis. Enquanto várias tecnologias, como a energia eólica, a solar fotovoltaica e a energia nuclear se apresentam como efetivas alternativas ao carvão e ao gás natural na produção de eletricidade, atualmente poucas opções conseguem competir com o petróleo em termos de custo e conveniência para o setor de transportes. Neste contexto, o uso veicular de combustíveis provenientes da biomassa, ou biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, tem representado fortes tendências frente ao uso de células a combustível, ao gás natural e aos veículos elétricos (Prayas, 2007).

Entre os vários motivos que geralmente são apresentados no incentivo ao uso de biocombustíveis, pode-se citar a renovabilidade destes recursos, pois são obtidos de produtos cultivados em terras agrícolas; a menor emissão de carbono em comparação com os combustíveis fósseis, sendo considerado muitas vezes como uma das mais viáveis soluções às mudanças climáticas; e a possibilidade de melhorias em termos de segurança energética, uma vez que grande parte dos países pode produzir seu próprio combustível, reduzindo a dependência externa de energia (IEA, 2004). Entretanto, recentemente, intensas discussões acerca das efetivas vantagens associadas à produção e uso em grandes volumes de biocombustíveis vêm fomentando discussões entre os mais variados setores da sociedade. Aspectos como a competição com a produção de alimentos, a redução da emissão de gases de efeito estufa em toda a cadeia de produção, e o “nível de renovabilidade” que o combustível possui são tópicos freqüentemente questionados, trazendo muitas vezes algumas ressalvas aos programas governamentais que incentivam uma maior contribuição destes combustíveis na matriz energética dos países.

A solução para alguns desses impasses passa por vários tipos de análises que procuram comparar e elencar as melhores alternativas, considerando parâmetros econômicos, energéticos e ambientais. Uma das análises mais utilizadas para este fim tem sido a Análise do Ciclo de Vida (ACV) ou *Life Cycle Analysis* (LCA), incluída no conjunto de normas ISO 14000 e criada em meados dos anos noventa a fim de instrumentalizar os aspectos ambientais no contexto empresarial. Esta análise baseia-se nas entradas e saídas de energia e massa de um determinado sistema produtivo ao longo de todo o seu ciclo de vida fornecendo argumentos técnicos para escolher ou não uma determinada rota tecnológica, produto ou matéria-prima. A qualidade da ACV está sujeita à confiabilidade dos dados e dos métodos considerados, bem como à definição dos limites e à configuração do sistema. Por conta disso, como observam Kim et al. (2005), encontram-se facilmente diferentes resultados de ACV's

realizados para um mesmo produto, revelando a ausência de um padrão consolidado que nem sempre permite a comparação direta das alternativas estudadas, provocando uma diversidade de interpretações.

A construção dos pressupostos metodológicos da ACV foi consideravelmente influenciada pelas análises energéticas realizadas desde a década de oitenta, e que propunham a quantificação dos fluxos de energia num sistema produtivo. Este tipo de análise, largamente utilizada na avaliação da viabilidade da produção de biocombustíveis, permite deduzir a quantidade de insumos energéticos requeridos à produção de um bem, além de identificar e localizar as perdas associadas, resultando em índices variados que podem expressar o aporte de energia fóssil no sistema produtivo ou a importância energética dos co-produtos, entre outros fatores. Da mesma forma, a análise energética carece de padrões metodológicos, dando espaço para questionamentos que não ficam apenas na confiabilidade dos dados utilizados, mas também na natureza e na maneira que estes são dispostos no estudo.

Nesta perspectiva, o presente trabalho apresenta uma abordagem conceitual dos fluxos energéticos em sistemas produtivos de biocombustíveis, discutindo os aspectos inerentes a este tipo de análise e elaborando, em contexto representativo de casos reais, índices compostos por distintos critérios, comparando-os entre si. Não se busca propor uma nova metodologia, mas principalmente discutir as metodologias convencionais de análise energética, verificando e quantificando a influência dos procedimentos na análise, que justificam a variabilidade dos resultados finais e a necessidade de um padrão consolidado.

De maneira específica, este trabalho pretende:

- Analisar energeticamente a produção do etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel de soja, biocombustíveis preponderantes no Brasil, baseando-se em dados locais e pressupostos metodológicos semelhantes a fim de permitir uma comparação direta dos resultados;
- Verificar o impacto dos parâmetros considerados na análise energética nos resultados finais, tais como: escolha das fronteiras, alocação de subprodutos, aporte da mão-de-obra, e outros; questionando os limites da análise por conta da ausência de um procedimento consolidado.

Assim, este trabalho foi dividido em três partes distintas. Na primeira parte foram apresentados os aspectos fundamentais que envolvem o tema em estudo, desde as definições básicas, passando por uma revisão das matérias-primas e tecnologias de produção de biocombustíveis, e organizando didaticamente os tópicos preponderantes numa análise energética genérica, onde foi ressaltada a falta de padronização metodológica, que restringe a clareza da interpretação dos resultados. Na segunda parte foram definidos os aspectos metodológicos usados na análise, e apresentados os resultados obtidos no trabalho. Na terceira e última parte fez-se a conclusão geral do estudo, e recomendações para trabalhos futuros.

PARTE I

ASPECTOS FUNDAMENTAIS

CAPÍTULO 1. PRODUÇÃO E USO DA BIOMASSA

De maneira geral, pode-se definir energia como a capacidade de realizar mudanças. Estas mudanças e a possibilidade de transformação entre diferentes formas de energia são de importância imprescindível para a existência e manutenção da vida, na maneira que a conceituamos. Sabe-se da existência de variadas formas de energia, como a energia elétrica, a energia térmica e a energia nuclear. Um caso particular de energia química, ou seja, aquela contida nas ligações entre os elementos químicos, é a *bioenergia*.

1.1. Bioenergia: Definições e Conceitos

Como apresenta BNDES (2008), a bioenergia pode ser definida como toda e qualquer forma de energia associada à energia química acumulada mediante processos fotossintéticos recentes. Neste contexto, o termo *biomassa* engloba todos os recursos naturais que dispõe de bioenergia, ou seja, toda a matéria vegetal gerada através de fotossíntese e seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, comerciais e municipais. A energia acumulada nestes recursos é proveniente do Sol, e pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida em outras fontes energéticas mais adequadas para um fim desejado qualquer através processos específicos.

Smil (1985) estimou que, considerando um aproveitamento aproximado de 1% do total de radiação solar incidente na Terra, anualmente seriam produzidos cerca de 220 bilhões de toneladas de biomassa (base seca), resultando no equivalente energético de $2,0 \cdot 10^{15}$ MJ, ou seja, mais que dez vezes a energia global consumida por ano no planeta. Para Nogueira e Lora (2003), quando se estima o total de energia existente na cobertura vegetal da Terra, incluindo-se as florestas tropicais e temperadas, as savanas e campos, chega-se a valores de 100 vezes o consumo anual de energia na Terra. Desta forma é perceptível a grande importância que a utilização da biomassa para fins energéticos representaria para o cenário atual, mesmo sabendo que apenas uma parte deste potencial poderia ser efetivamente utilizada por conta das outras funções que a biomassa exerce na biosfera, como a manutenção da temperatura e da biodiversidade. Os biocombustíveis correspondem às formas de biomassa passíveis para uso energético direto, como a lenha, ou formas processadas dos recursos primários, como o carvão vegetal, o biodiesel, o etanol, sendo estes dois últimos o escopo deste trabalho.

Particularmente, o que tem incentivado o uso da biomassa como fonte energética é o fato dela ser um recurso natural renovável, pois a energia nela embutida (bioenergia) é

conseqüência de um processo natural, o qual se associa ao fluxo energético entre uma fonte renovável de energia, o sol, para as ligações intramoleculares dos recursos vegetais e resíduos orgânicos. Este processo é conhecido como *fotossíntese* e será detalhado no tópico seguinte.

1.2. Fotossíntese

Em termos gerais, a fotossíntese pode ser definida como o processo pelo qual os vegetais transformam energia radiante (energia solar) em energia química armazenada nas ligações entra as moléculas de açúcar gerados no processo (Figura 1.1). A captação e o armazenamento de energia solar nos vegetais podem cumprir um papel destacado no futuro energético das nações, sem pretender ser a solução exclusiva (BNDES, 2008).

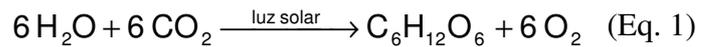
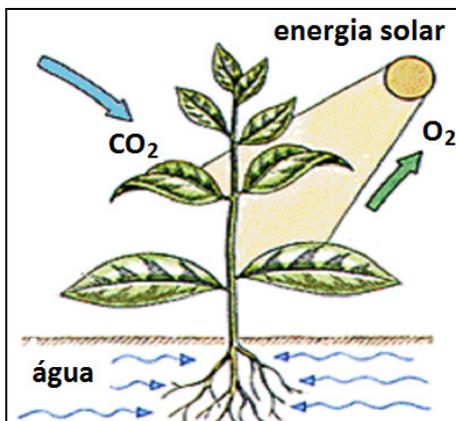


Figura 1.1 O processo geral da fotossíntese

A reação global do processo (Eq. 1) explicita a produção de glicose, desencadeada pela energia solar, a partir de dióxido de carbono e água, por meio de reações fotoquímicas e bioquímicas. Segundo BNDES (2008), estima-se que, na reação da fotossíntese, a formação de 1,0 kg de açúcar demanda cerca de 18 MJ de energia solar, correspondente a cerca de meio litro de gasolina. O balanço de massa dessa reação indica que a síntese de 1,0 kg de glicose consome cerca de 0,6 kg de água e 1,4 kg de dióxido de carbono, liberando para a atmosfera 1,0 kg de oxigênio. Naturalmente, essa água representa apenas a parcela utilizada na composição do açúcar, pois durante seu crescimento e durante a fotossíntese, quando ocorre a evapotranspiração, o vegetal necessita de água em volumes bem acima da quantidade fixada no produto vegetal. Desta forma, quando se supõe o uso da biomassa para a produção de alimentos, geração de energia ou outros fins, as condições sob as quais o vegetal está sujeito, tais como incidência de luz, água, dióxido de carbono, temperatura e nutrientes do solo, devem ser consideradas pois afetam diretamente a eficiência fotossintética e a produtividade da cultura.

A eficiência fotossintética pode ser definida pela parcela de energia solar que é convertida em glicose ou mesmo em biomassa, sendo expressa pela relação entre a energia

contida na biomassa de uma espécie vegetal e a quantidade de energia solar incidente sobre a área ocupada pela mesma durante o período de cultivo. Segundo Gliessman (2000) pode-se dizer que muito da estrutura e função de uma planta individual evolui com o tempo, buscando uma maior eficiência fotossintética. Porém, mesmo com adaptações que vão da morfologia das folhas às rotas fotossintéticas, apenas uma porcentagem da energia solar incidente transforma-se efetivamente em biomassa, representando algo que raramente excede 1%, ou seja, apenas uma pequena parcela da radiação solar que incide na planta é convertida em biomassa total do vegetal. A Figura 1.2 apresenta um balanço energético generalizado da fotossíntese.

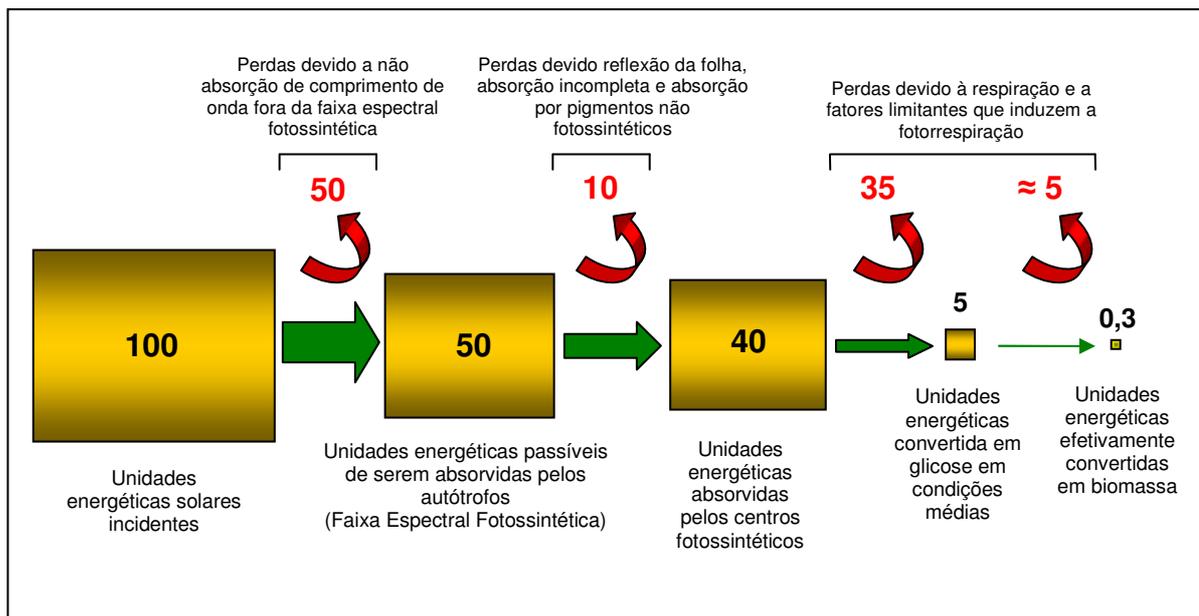


Figura 1.2: Fluxo de energia nos vegetais (Adaptado de Gliessman, 2000)

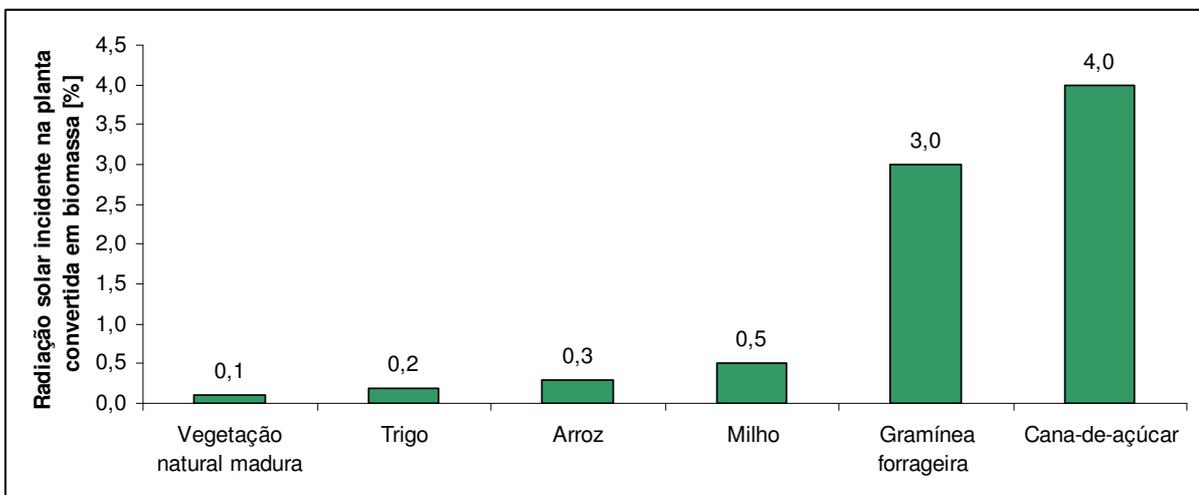


Figura 1.3: Eficiência de conversão da energia solar em biomassa (Adaptado de Gliessman, 2000)

Sabe-se, no entanto, que sob determinados fatores, espécies diferentes de vegetais apresentam resultados distintos. Na Figura 1.3 seguinte, Gliessman (2000) compara a eficiência na conversão de biomassa de diferentes espécies, chamando atenção a eficiência alcançada pela cana-de-açúcar em áreas tropicais que pode chegar a 4,0%. Embora seja relativamente baixo, este valor ainda é muito maior que a eficiência média na vegetação natural madura.

De maneira geral, os fatores limitantes da fotossíntese, isto é, que influenciam os valores de eficiência fotossintética, e conseqüentemente de produtividade, são: luz solar, água e nutrientes. Para a fotossíntese, quanto à luz solar, apenas interessa a faixa espectral referente aos comprimentos de onda que vão de 400 a 760nm, também denominada Radiação Fotossinteticamente Ativa (*Photossintetic Active Radiation* – PAR). Ainda assim, nessa faixa espectral, existe uma preferência pelos pigmentos dos vegetais (clorofilas do tipo *a* e *b*) em absorver a radiação correspondente ao azul (430 a 500 nm) e ao vermelho (650 a 760 nm). Não só a qualidade da radiação incidente, mas a intensidade da PAR, isto é, o montante energético que alcança a superfície da folha e a duração de incidência são parâmetros importantes que influenciam o processo fotossintético. Nogueira e Lora (2003) estimaram que, em média, a disponibilidade de energia solar anual para zona tropical varia entre 5,0 e 9,2 GJ/m².ano, e para a zona temperada, entre 1,5 e 6,0 GJ/m².ano. Esta variação espacial da disponibilidade de energia solar geralmente implica na maior produtividade da biomassa verificada nas regiões intertropicais, em comparação com as regiões temperadas. Por outro lado, a disponibilidade de água é muitas vezes o fator crítico, não surpreendendo o fato das regiões desérticas apresentarem baixa produtividade mesmo quando submetidas à elevada incidência de radiação solar. Da mesma forma, se o solo for deficiente de nutrientes minerais essenciais como o nitrogênio e o fósforo, a eficiência fotossintética será baixa. Pode-se supor que, em localizações não privilegiadas pela incidência de luz, temperatura ou umidade, a produtividade das culturas seja mantida em valores altos a partir do aporte excessivo de nutrientes, o que pode acarretar impactos ambientais.

Especificamente por conta destes fatores limitantes, e conforme sinalizado por Gliessman (2000) anteriormente, os vegetais ao longo do tempo desenvolveram rotas fotossintéticas que procuram, a partir das condições ambientais que estão sujeitas, diminuir a fotorrespiração, favorecendo o armazenamento de energia em seus tecidos, e conseqüentemente mantendo a produtividade de biomassa. As rotas fotossintéticas correspondem a diferenciações nas rotas reacionais que caracterizam a etapa bioquímica da fotossíntese, configurando três sistemas distintos responsáveis pela fixação do carbono que ocorre nesta fase. O Ciclo C3 (Ciclo de Calvin/Benson), exemplificados pela soja e pelo feijão, consiste no ciclo mais comum de fotossíntese, caracterizado pelo fato do primeiro composto estável formado nas reações de escuro possuir três carbonos, taxas fotossintéticas entre 15 e 35 mgCO₂/dm².h⁻¹, com temperatura ótima entre 15 e 30°C. Nas plantas do Ciclo C4 (Ciclo Hatch/Slack), como o milho e a cana-de-açúcar, o CO₂ é incorporado pelo vegetal em compostos de quatro carbonos sendo direcionados para células específicas, denominadas células da bainha vascular, onde enzimas rompem as ligações destes compostos deixando o

carbono parcialmente “solto”, os quais posteriormente serão destinados ao ciclo reacional semelhante ao C3. Vegetais com esta rota possuem taxas fotossintéticas entre 30 e 45 $\text{mgCO}_2/\text{dm}^2.\text{h}^{-1}$ com valores mais elevados para temperatura ótima. Por fim, as plantas do Ciclo CAM (Ciclo das Crassuláceas), exemplificadas pelos cactos, são comuns em ambientes quentes e secos como os desertos, apresentando taxas fotossintéticas bem menores.

É interessante observar que a energia solar é fixada em diferentes substâncias e órgãos de acumulação, que determinam as rotas tecnológicas passíveis de serem adotadas para sua conversão em energia para uso final. Na cana-de-açúcar, por exemplo, as reservas energéticas se localizam principalmente nos colmos, como sacarose, celulose e lignina, sendo tradicionalmente empregadas na produção de etanol e bagaço, mas também as pontas e folhas da cana apresentam crescente interesse, à medida que se desenvolvem processos para a utilização de seu substrato lignocelulósico. As raízes e tubérculos de plantas como a mandioca e a beterraba acumulam amido e sacarose, enquanto os frutos e as sementes, como o dendê e o milho, acumulam geralmente amido, açúcar e óleos vegetais, de acordo com cada espécie (BNDES, 2008).

Além de definirem as rotas tecnológicas mais adequadas para conversão da biomassa em biocombustíveis, esses aspectos são relevantes para a eficiência global de captação e utilização de energia solar. Segundo Demeyer et al. (1985), para a síntese de carboidratos (como celulose e sacarose), o vegetal requer cerca de 60% menos energia do que para a síntese de gorduras ou lipídios, por unidade de massa de produto final, o que, em princípio, torna as rotas associadas ao biodiesel comparativamente menos eficientes do que as rotas do etanol, com base na sacarose ou na celulose.

1.3. Recursos energéticos da biomassa

Os recursos energéticos da biomassa, isto é, a biomassa na perspectiva do uso energético, pode ser classificada de diversas maneiras. Nogueira e Lora (2003) classificam a biomassa a partir dos biocombustíveis que podem ser gerados pelos respectivos materiais de origem, conforme apresenta a Figura 1.4.

Nesta classificação, os *dendrocombustíveis* referem-se à energia que pode ser gerada direta ou indiretamente pela madeira, ou seja, pela queima e/ou processamento de recursos vegetais destinados ao fim energético ou ainda pela queima e/ou processamento de resíduos produzidos pela utilização da madeira em outros fins como a indústria de celulose. Neste último caso junta-se aos cavacos de madeira e pó de serragem exemplos mais complexos de resíduos que podem ser utilizados como combustíveis, como o licor negro, subproduto da indústria de celulose, o carvão vegetal e o metanol produzido da madeira. Nesta classe o conteúdo energético da biomassa associa-se basicamente aos conteúdos de celulose e lignina presentes na matéria-prima, apresentando em geral baixa umidade e adotando preferencialmente rotas termoquímicas de transformação para o uso final. Os *agrocombustíveis* são provenientes geralmente de biomassa com umidade mais alta que os

dendrocombustíveis, cujo valor energético associa-se não somente ao conteúdo de celulose, mas de amido, açúcares e lipídeos. Não obstante os variados critérios que justificam uma determinada classificação das fontes de biomassa, observa-se a dificuldade em fazê-lo de maneira que abranja toda a forma de biomassa conhecida.



Figura 1.4: Fontes de Biomassa (Nogueira e Lora, 2003)

1.4. Processos de conversão energética da biomassa

O processamento da biomassa possui a rigor duas finalidades: fornecer diretamente energia para um determinado uso ou produzir um combustível intermediário mais homogêneo que se apresente mais adequado para o uso final desejado. Como a energia na biomassa encontra-se nas ligações entre os elementos químicos que a compõe, o processamento da biomassa procura quebrar estas ligações e utilizar a energia nelas embutida, consumindo oxigênio atmosférico e restituindo dióxido de carbono ao meio. A Figura 1.5 apresenta uma síntese das diversas rotas de conversão que podem ser aplicadas para transformar a biomassa em biocombustíveis e calor útil.

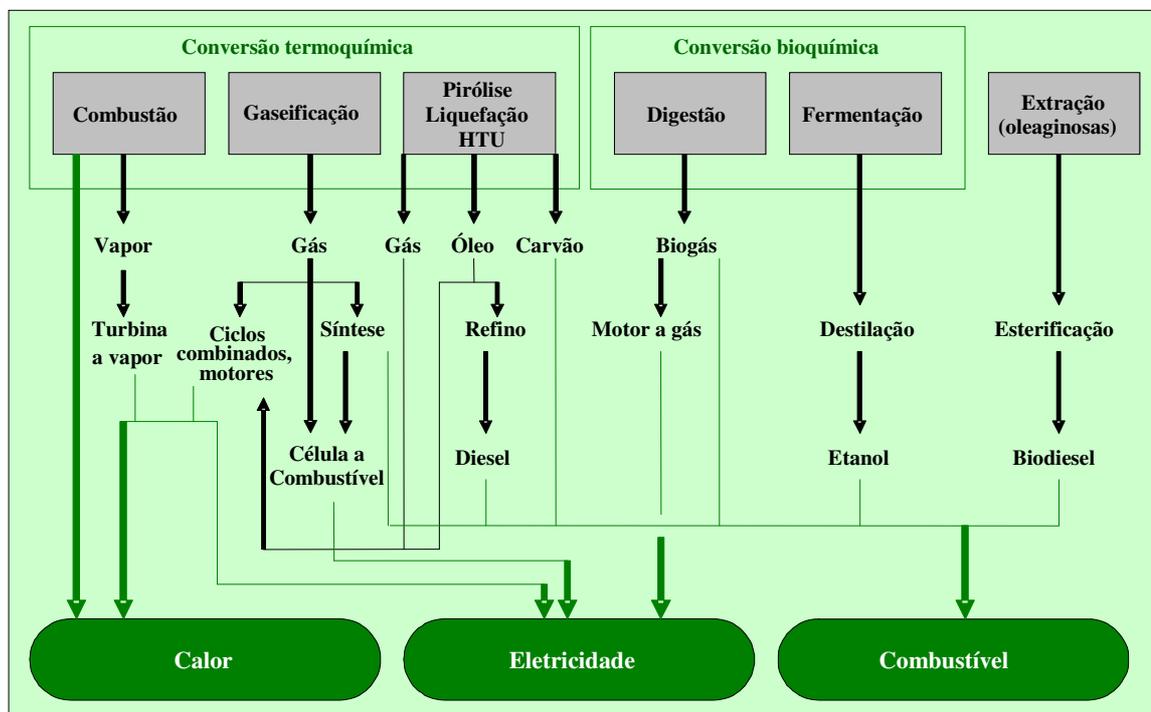


Figura 1.5: Rotas tecnológicas para produção de bioenergia (Turkemburg et al., 2000 apud Seabra, 2008)

Além dos processos físicos, puramente mecânicos, usados na concentração, redução granulométrica, compactação ou redução da umidade da biomassa, dois grupos de tecnologias químicas alteram a composição da matéria-prima para fornecer produtos mais compatíveis aos usos finais: *processos termoquímicos*, que empregam matérias-primas com baixa umidade e temperaturas elevadas; e *processos bioquímicos*, desenvolvidos em meios com elevado teor de água e temperaturas próximas à condição ambiente. Neste trabalho, preocupa-se em detalhar e analisar os processos que permitem a obtenção de biocombustíveis líquidos veiculares como o etanol e o biodiesel.

1.5. A bioenergia no cenário global

A bioenergia acompanha o homem desde os tempos primitivos quando a lenha era queimada para aquecer, proteger e alimentar os pequenos clãs. Em termos globais e atualizando os dados da Agência Internacional de Energia, a demanda de energia comercial em 2007, isto é que passou pelos mercados energéticos, foi da ordem de 470 milhões de GJ, correspondendo a cerca de 82 bilhões de barris de petróleo em um ano (Best et al., 2008). Desse consumo total, aproximadamente 88% foram obtidos de recursos fósseis, especialmente carvão mineral e petróleo. O restante foi conseguido mediante bioenergia, energia hidrelétrica, energia nuclear e, em menor grau, outras fontes, como energia geotérmica e energia eólica.

Desta forma, a bioenergia, a mais importante entre as energias renováveis, continua participando da realidade energética dos países, respondendo por aproximadamente 10% do aporte anual (comercial e não-comercial) como mostra a Figura 1.6, sendo encontrada em uso tanto nos fogões a lenha de grande parte das moradias de todo o mundo, em fornos e fornalhas das caldeiras das agroindústrias, como nos tanques de combustível de um número crescente de veículos, sobretudo nos países industrializados (BNDES, 2008).

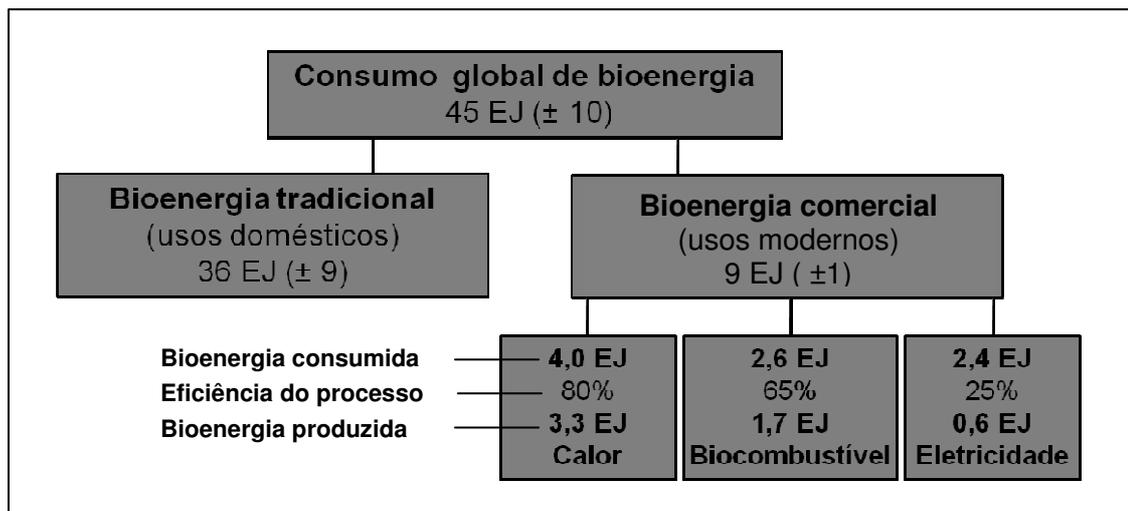


Figura 1.6: Contribuição da bioenergia no consumo global de energia primária em 2007 (Best et al., 2008).

As diferentes maneiras que a bioenergia é disponibilizada ao usuário final revela uma marcada dicotomia entre o uso tradicional e o uso moderno desta fonte energética. Conforme observa Saghar e Kartha (2007), por um lado percebe-se seu uso como fonte dominante em mais de um terço da população mundial na forma de esterco, resíduos agrícolas e lenha queimada em fogões caseiros ineficientes e com grande emissão de material particulado. Por outro lado apresenta-se como uma nova fonte energética de rápido crescimento entre as fontes renováveis, capaz de mitigar preocupantes problemas ambientais, oferecendo uma alternativa efetiva à necessária evolução da sociedade industrial moderna para um contexto energético mais sustentável e racional, sendo personificada especialmente nos biocombustíveis.

No caso do Brasil, que sob certos aspectos é considerado um país em desenvolvimento, sua matriz energética apresenta uma participação significativa da biomassa, quer seja nos moldes do uso tradicional, quer seja sob a roupagem das modernas tendências. A lenha utilizada para fins energéticos correspondeu a 12% do consumo de energia primária no país em 2007, já os produtos derivados da cana (etanol), representantes do uso moderno da biomassa, corresponderam a 16% do total.

Sob estas perspectivas, o uso da bioenergia tem sido elencado junto às prioridades de muitos governos por conta do insistente apelo para a diminuição de gases de efeito estufa e na busca de alternativas aos recursos fósseis. Isso tem se dado especialmente pelo desenvolvimento de programas e políticas que viabilizem o uso maciço de biocombustíveis no setor de transporte, responsáveis por 30% do consumo da energia global e alimentado em 99% por combustíveis fósseis, segundo a IEA (2004). Dessa forma, a bioenergia, progressivamente, deixa de ser considerada uma energia “antiga” e passa a ser reconhecida como uma forma energética moderna, competitiva e adequada, em condições de proporcionar uma nova revolução tecnológica (BNDES, 2008).

CAPÍTULO 2: BIOCOMBUSTÍVEIS

Atualmente, os combustíveis à base de vegetais e gorduras animais, também conhecidos como biocombustíveis, se apresentam como fortes alternativas no setor de transporte frente ao uso de células a combustível, de gás natural e veículos elétricos. Conforme observa Rajagopal e Zilberman (2007), entre os vários motivos que incentivam seu uso, encontram-se:

- Os biocombustíveis são potencialmente recursos inexauríveis, pois são obtidos de produtos cultivados em terras agrícolas.
- O uso de biocombustíveis aparentemente emite menos carbono que os combustíveis fósseis, sendo considerado muitas vezes como uma solução significativa às mudanças climáticas.
- Os biocombustíveis podem trazer melhorias em termos de segurança energética, uma vez que os países podem produzir seu próprio combustível, reduzindo a dependência externa de energia.
- Os biocombustíveis podem aumentar a renda dos produtores agrícolas e criar mais empregos.
- Os biocombustíveis possuem propriedades físicas e químicas similares ao combustível fóssil que pretendem substituir, no caso a gasolina e o óleo diesel.

Entretanto, muitas destas vantagens têm sido questionadas sob a perspectiva da real sustentabilidade que a produção e o uso poderiam trazer para o cenário energético, ambiental, social e econômico dos países. Neste capítulo serão abordados alguns dos principais conceitos referentes aos biocombustíveis.

2.1. Biocombustíveis: caracterização

Sendo produzidos a partir de vegetais e gorduras animais, os biocombustíveis possuem uma vasta lista de matérias-primas e processos que as tornam passíveis de serem utilizadas para fins energéticos. No entanto, em função das características da matéria-prima e a técnica de conversão utilizada, BiodieselBR (2008) classifica os biocombustíveis em quatro grupos: os de primeira até os de quarta geração, em função do grau de desenvolvimento necessário para produzi-los.

Os biocombustíveis de primeira geração são derivados do açúcar, do amido, de óleos e gorduras animais. Já são usados em larga escala, e aparecem como potenciais competidores com o setor de alimentos, associando-se eventualmente ao desmatamento e diminuição da biodiversidade, cujo ciclo de vida geralmente resulta em medianos indicadores nos balanços de energia e gases estufa, excluindo alguns casos como o etanol de cana-de-açúcar. Este trabalho visa apenas o estudo desta geração de biocombustíveis, que de maneira geral pode

ser exemplificado pelo biodiesel e pelo etanol. As Tabelas 2.1 e 2.2 a seguir apresentam algumas propriedades destes combustíveis frente aos combustíveis fósseis que pretendem substituir.

Tabela 2.1: Características físico-químicas do biodiesel (ésteres metílicos) de várias espécies vegetais e do óleo diesel convencional Tipo C (Adaptado de Knothe e Gerpen, 2006 e MIC,1985)

Parâmetros	Soja	Algodão	Dendê	Sebo	Diesel *
Poder Calorífico (MJ/kg)	37,3 a 40,0	-	39,1	39,9	45,3
Ponto de Névoa (°C)	-2,0 a 3,0	-	8,0	12,0 a 15,6	1,0
Cetanagem	48,7 a 55,9	51,2	56,2	61,8	45,8
Viscosidade (mm ² /s)	4,40 (37,8° C)	6,8 (21° C)	4,50 (37,8° C)	4,99 (40° C)	3,04 (37,8° C)
Ponto de Fluidez (°C)	-3,9 a 0,0	-4,0	6,0	9,0 a 12,8	-
Ponto de Fulgor (°C)	120 a 190,6	110,0	192,0	96,0 a 187,8	-

*Diesel do tipo C: Caracteriza-se, principalmente, por possuir, no máximo, 0,3% de enxofre, cuja temperatura necessária para destilação de 85% do seu volume é menor que 360°C contra 370°C dos demais tipos. Este óleo está disponível desde primeiro de Outubro de 1996, quando foi disponibilizado, pela PETROBRAS para uso nas regiões metropolitanas de Salvador, São Paulo, Aracaju, Santos e Cubatão.

Tabela 2.2: Propriedades da gasolina e do etanol
(Adaptado de API, 1998 e Goldemberg e Macedo, 1994 apud BNDES, 2008)

Parâmetros	Gasolina	Etanol
Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)	43.500	28.225
(kJ/L)	32.180	22.350
Densidade (kg/L)	0,72 – 0,78	0,792
Octanagem RON (Research Octane Number)	90 – 100	102 – 130
Octanagem MON (Motor Octane Number)	80 – 92	89 – 96
Calor latente de vaporização (kJ/kg)	330 – 400	842 – 930
Relação ar/combustível estequiométrica	14,5	9,0
Pressão de vapor (kPa)	40 – 65	15 – 17
Temperatura de ignição (°C)	220	420
Solubilidade em água (% em volume)	~ 0	100

A segunda geração de biocombustíveis é caracterizada pela mudança nas técnicas de bioconversão e por permitirem o uso de todas as formas de biomassa lignocelulósica, como

espécies de grama, árvores, resíduos agrícolas e industriais, livrando-se da aparente competição com o setor de alimentos. Existem duas rotas principais na obtenção do combustível: a rota bioquímica, onde enzimas e/ou microorganismos quebram a celulose e a lignina para obter os açúcares contidos na biomassa, e a rota termoquímica, pela qual a biomassa é convertida por meio da gaseificação e pirólise rápida. Entre os produtos da conversão bioquímica encontram-se o etanol celulósico, e combustíveis gasosos como o biogás e o biohidrogênio, com consideráveis resultados na redução de gases de efeito estufa. Embora se apresentem com grande vantagem, o custo e o estágio de desenvolvimento da tecnologia impedem, por hora, o uso em larga escala.

A terceira geração de biocombustíveis baseia-se na produção avançada de biomassa. O aparecimento de técnicas de procriação rápida e extremamente eficientes (procriação molecular), e os rápidos avanços no campo da engenharia genética prometem resultar em plantas com propriedades que as tornam mais apropriadas para a conversão em biocombustíveis. Os impactos causados por estas culturas são chamativos, pois com altos rendimentos e fácil conversão, menos energia seria necessária para plantar, colher e transformar a biomassa.

Por fim, a quarta geração propõe a modificação genética de vegetais a fim de captar mais dióxido de carbono. Posteriormente estes vegetais são convertidos em biocombustíveis pelos processos típicos da segunda geração, e o carbono emitido é armazenado em campos de óleo e gás exauridos, em veios de carvão não-mineráveis ou em aquíferos salinos, onde ele ficaria bloqueado por centenas a milhares de anos. O desenvolvimento destes biocombustíveis ainda está submetido às bancadas laboratoriais, porém seu uso representaria uma revolucionária alternativa no seqüestro de gases estufa.

Alguns pesquisadores criticam esta classificação por considerá-la imprecisa e arbitrária, uma vez que supostamente colocam os combustíveis de primeira geração no mesmo nível de desempenho. Por exemplo, comparar o desempenho energético e ambiental do etanol de cana e com o etanol de milho consiste num expressivo equívoco, visto a disparidade dos resultados. As conclusões preliminares da Conferência Internacional de Biocombustíveis, ocorrida em 2008 em São Paulo afirmou:

“Os chamados biocombustíveis de primeira geração com elevadas reduções de emissões deveriam ter o mesmo tratamento que biocombustíveis de segunda geração por apresentarem desempenho ambiental comparável” (Biofuels, 2008).

2.2. Matérias-primas para os biocombustíveis

O grande número de matérias-primas passíveis de serem transformadas em biocombustível consiste num dos principais incentivos em produzi-los como alternativa aos combustíveis fósseis. No caso dos biocombustíveis de primeira geração, as matérias-primas podem ser divididas em três grupos:

- *Matérias primas açucaradas*, como a cana-de-açúcar, de onde se extrai a energia do açúcar que a compõe;
- *Matérias primas amiláceas*, como o milho, passíveis de serem convertidas em biocombustível a partir do amido.
- *Matérias-primas oleaginosas*, como óleos vegetais e gorduras animais, passíveis de serem convertidas em biodiesel.

Como o escopo deste trabalho refere-se apenas à produção de biodiesel de soja e de etanol de cana-de-açúcar, a seguir apresentam-se algumas características destas fontes energéticas.

2.2.1. Matérias-primas açucaradas

Pelas estimativas da RFA (2008), aproximadamente 40% do etanol produzido no mundo em 2007, equivalente a 20 bilhões de litros, foi proveniente da cana-de-açúcar, que consiste no principal exemplo de biomassa açucarada, sendo produzida em larga escala no Brasil.

A cana-de-açúcar é um vegetal semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas, oriundas de regiões temperadas quentes e tropicais da Ásia, chegando ao Brasil no século XVI para inaugurar o ciclo do açúcar. A parte aérea da planta é formada, essencialmente, pelos *colmos*, *pontas* e *folhas* que juntos totalizam cerca de 35 toneladas de matéria seca por hectare, conforme estima BNDES (2008) e apresenta a Figura 2.1 seguinte. A composição dos colmos consiste em praticamente fibras, água e açúcares, especialmente sacarose. A concentração deste composto na cana, levemente oscilante ao longo da safra e dependente da variedade cultivada, é de considerável interesse, uma vez que é a principal matéria-prima tanto para a produção de açúcar como para etanol. Por outro lado, a fibra (bagaço), cuja queima garante a auto-suficiência energética de muitas usinas, também oscila entre 8 e 14% da massa dos colmos. Quanto às pontas e folhas, que constituem a palha da cana, antes eram queimadas na etapa pré-colheita, entretanto alguns autores sinalizam novas perspectivas. Donzelli (2005) afirma que se simplesmente a palha for deixada no campo, esta já atua como importante proteção verde do solo. Cortez et al. (1992) atentam para o potencial energético da palha, incentivando a colheita mecanizada de cana crua já que se trata de aproximadamente um terço da energia disponível na cana.

O clima ideal para o cultivo da cana é aquele que apresenta duas estações distintas: uma quente e úmida, para proporcionar a germinação, o perfilhamento e o desenvolvimento vegetativo, seguida de outra fria e seca, para promover a maturação e o conseqüente acúmulo de sacarose nos colmos. Como observa BNDES (2008), a cana não apresenta boa produtividade em climas como o das regiões equatoriais úmidas, por isso faz pouco sentido imaginar que a Amazônia se preste a cultivos comerciais extensivos dessa planta.

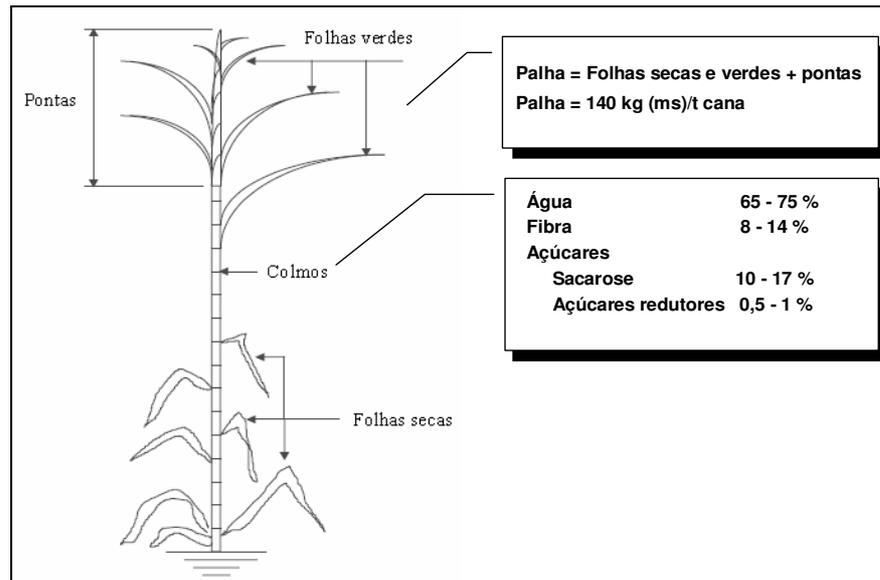


Figura 2.1: Estrutura típica da cana-de-açúcar (Adaptado de Seabra, 2008 e BNDES, 2008)

Em termos pedológicos a cana apresenta bom desenvolvimento em solos profundos, bem estruturados, férteis e com boa capacidade de retenção. Porém, devido a sua rusticidade, também se desenvolvem satisfatoriamente em solos arenosos e menos férteis como os do cerrado. As observações de Agrobayte (2006) confirmam as afirmações de BNDES (2008) ao indicar que solos rasos mal drenados, característicos da região amazônica, não são indicados para a cana. Porém mesmo nas regiões onde a cana é largamente cultivada, o regime de chuvas define o período da colheita.

O ciclo completo da cana-de-açúcar é variável, dependendo do clima local, de variedades e práticas culturais. No Brasil, o ciclo é, geralmente, de seis anos, dentro do qual ocorrem cinco cortes, quatro tratos de soqueiras e uma reforma. Neste caso, o primeiro corte é feito 12 ou 18 meses após o plantio, quando se colhe a chamada cana-planta. A cana-planta de 18 meses possui maior produtividade pois o solo fica alguns meses em descanso após a última colheita, já a cana de 12 meses é plantada pouco tempo após o ciclo anterior, e é usada em cerca de 20% dos casos (CGEE, 2007). Os demais cortes, quando se colhe a cana-soca resultante da rebrota, são feitos uma vez por ano, ao longo dos quatro anos consecutivos, com redução gradual da produtividade, até que se torne economicamente mais interessante reformar o canavial do que efetuar um novo corte. Substitui-se, então, a cana antiga por um novo plantio e inicia-se um novo ciclo produtivo. Nessa reforma do canavial, a área cultivada fica alguns meses em descanso e pode receber outros cultivos de ciclo curto, como leguminosas.

Na Tabela 2.3 seguinte, apresenta-se um ciclo típico da cana, em função de valores médios de cerca de 100 usinas da região Centro-Sul, entre as safras de 1998/99 a 2002/03. Destes valores chega-se a uma produtividade média em área colhida de 82,4 t/ha e em área plantada (5 cortes em seis anos) de 68,7 t/ha.

Tabela 2.3: Produtividade da Cana-de-açúcar (Adaptado de Macedo et al. 2004)

	Corte	Produtividade [t/ha]
1°	Cana-Planta (18 meses)	113
1°	Cana-Planta (12 meses)	77
2°	1ª Soca	90
3°	2ª Soca	78
4°	3ª Soca	71
5°	4ª Soca	67

Sendo usualmente cultivada em regiões tropicais, registrou-se em 2006/07 a produção de aproximadamente 1300 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em mais de 20 milhões de hectares no globo. O Brasil, com uma área plantada de 7 milhões de hectares, foi responsável por cerca de 42% do total produzido, seguido pela Índia, a China, a Austrália e alguns estados sulinos estadunidenses (FAOSTAT, 2008 apud BNDES, 2008).

A produção nacional de cana chegou a 560 milhões de toneladas em 2008, segundo dados IBGE (2009), e conforme mostra a Figura 2.2 seguinte, com uma produtividade média de 76,6 t/ha em aproximadamente 8,4 milhões de hectares, o que equivale a cerca de 1% da área total do país e 10% da área cultivada, perdendo apenas para soja e para o milho (Figura 2.4). A produtividade anual, muito influenciada pela variabilidade climática e pela região produtora, encontra-se geralmente entre 50 e 100 t/ha (peso do colmo úmido). Na região Centro-Sul do Brasil, esses índices estão entre 78 e 80 t/ha, enquanto que no Estado de São Paulo, principal produtor, situam-se na faixa de 80 a 85 t/ha, ambos casos considerando ciclo de cinco cortes (UNICA, 2009).

A região Centro-Sul do país, onde se concentra a maior parte das usinas sucroalcooleiras é responsável por aproximadamente 90% produção nacional, dando-se destaque ao estado de São Paulo que reponde por até 60% da produção (Figura 2.3). Segundo Seabra (2008), atualmente, cerca de 50% da cana produzida no Brasil é destinada à obtenção de açúcar e a outra parte à obtenção de álcool. Na região Centro-Sul este *mix* é de 60% álcool e 40% açúcar.

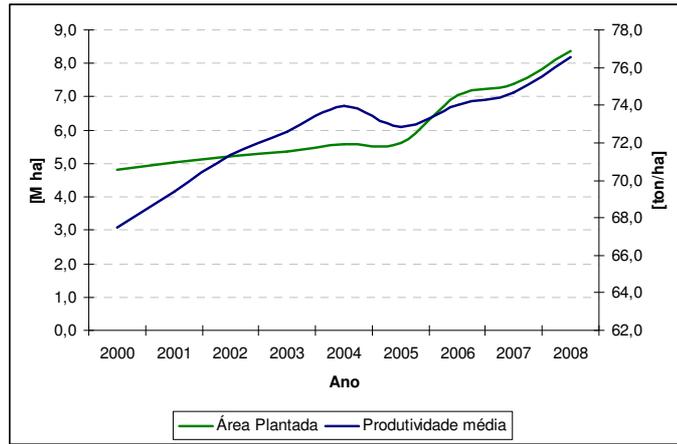


Figura 2.2: Área plantada e produtividade média de cana-de-açúcar no Brasil (Adaptado de IBGE, 2008)

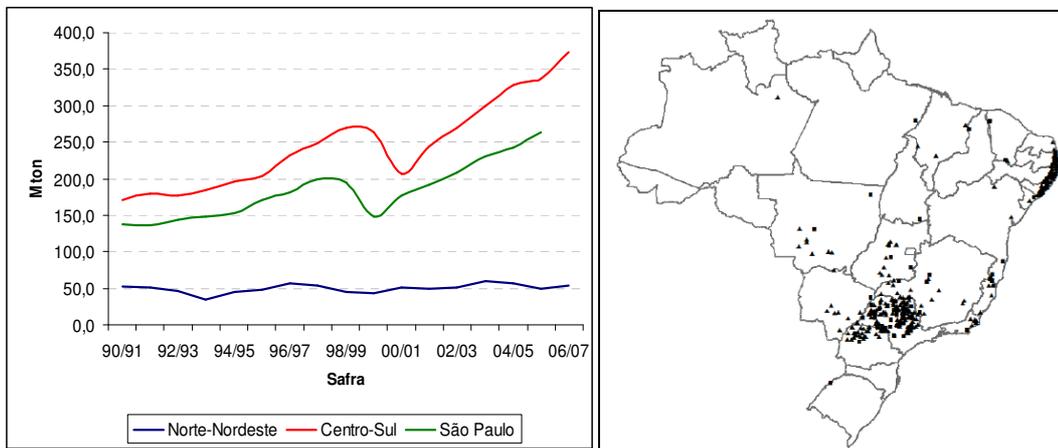


Figura 2.3: Produção de cana-de-açúcar nas regiões brasileiras e localização das usinas (Adaptado de UNICA, 2008 e CGEE, 2007)

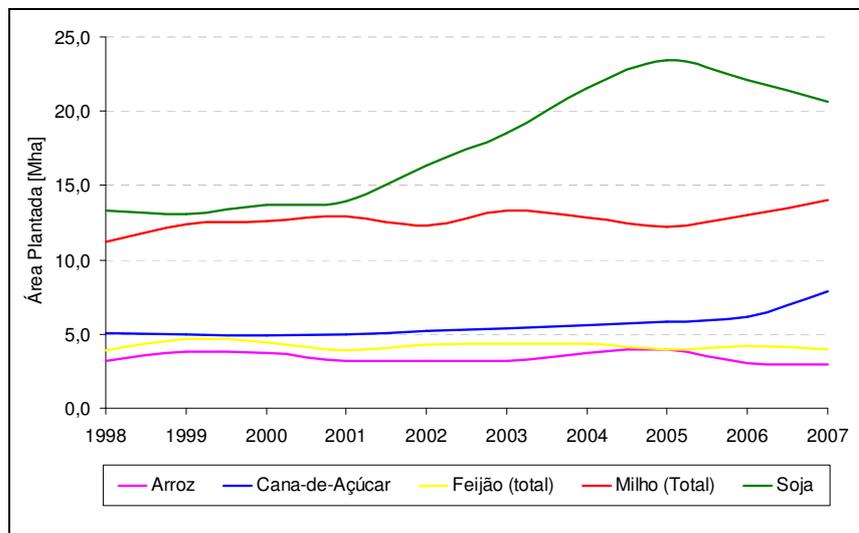


Figura 2.4: Área plantada das principais culturas no Brasil (Adaptado IBGE, 2008)

A expansão da área cultivada de cana no Brasil, que atualmente abrange o oeste de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás, traz preocupação a alguns setores por conta dos eventuais impactos ambientais em relação à biodiversidade e ao uso do solo. Segundo Macedo e Nogueira (2005), estima-se uma disponibilidade de 100 milhões de hectares para espécies de ciclo anual, e adicionalmente espera-se a liberação de mais 20 milhões de hectares por conta da elevação do nível tecnológico na pecuária, com maior lotação por hectare. As estimativas da CGEE (2007), que não consideraram a região amazônica e o Pantanal, sinalizam que a área potencial de cultivo sem irrigação seja quinze vezes maior que a área atual, e com irrigação este valor chegaria a vinte vezes (Figura 2.5). Nessa perspectiva, o aumento da produção com a menor demanda de área, ou a expansão da cultura para áreas menos favoráveis, ressalta uma alternativa que favorece a viabilidade de produção de cana no país em grandes escalas. A disponibilidade de variedades de cana geneticamente melhoradas contribuiu consideravelmente para o aumento da produtividade. Hoje são cultivadas mais de 550 variedades diferentes de cana, sendo que as 20 principais ocupam cerca de 70% da área plantada (Paes, 2005 apud Seabra, 2008).

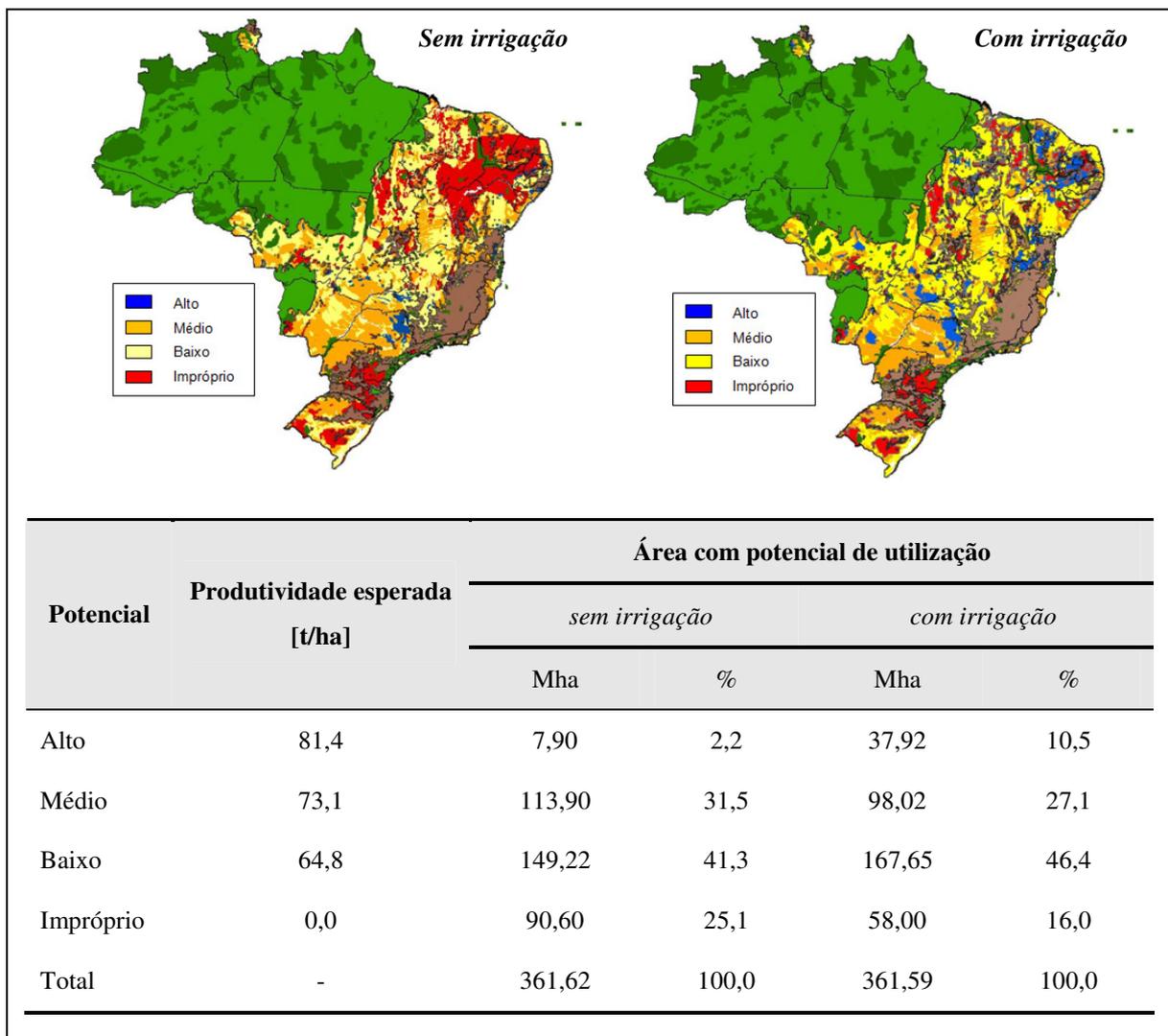


Figura 2.5: Áreas potenciais para o cultivo de cana-de-açúcar (Adaptado CGEE, 2007)

A produção agrícola da cana no Brasil hoje apresenta aspectos ambientalmente interessantes. Usa baixo nível de defensivos e conta com o maior programa de controle biológico de pragas instalado no país, possui um dos menores índices de erosão do solo da agricultura brasileira e recicla todos os resíduos (Rossetto, 2004). A Tabela 2.4 apresenta os principais parâmetros da cultura nas condições praticadas no Centro Sul brasileiro, a partir dos dados publicados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), referente às safras 2005/06. A demanda de fertilizantes para o cultivo da cana é reduzida quando comparada ao uso em outras culturas, em grande parte por conta dos resíduos industriais que são retornados para o campo. O uso de nitrogênio sintético é baixo, e nas áreas onde a vinhaça é aplicada, todo o potássio é provido pela fertirrigação (BNDES, 2008).

Tabela 2.4: Principais parâmetros agrícolas da cultura da cana-de-açúcar (Adaptado de Seabra, 2008)

Parâmetro	Valor
<i>Produtividade</i> [t/ha]	87,1
<i>Colheita de cana crua</i> (sem queimar)	30,8%
<i>Colheita mecanizada</i>	49,5%
<i>Pol %cana</i> (teor de sacarose)	14,22
<i>Fibra %cana</i> (teor de bagaço)	12,73
<i>P₂O₅</i> Cana planta	120 kg/ha
Cana soca sem vinhaça	25 kg/ha
<i>K₂O</i> Cana planta	120 kg/ha
Cana soca sem vinhaça	115 kg/ha
<i>N</i> Cana planta	50 kg/ha
Cana soca com vinhaça	75 kg/ha
Cana soca sem vinhaça	90 kg/ha
<i>Calcário</i>	1,9 t/ha (apenas no plantio)
<i>Herbicida</i>	2,20 kg/ha (valor recomendado)
<i>Inseticida</i>	0,12 kg/ha (valor recomendado)
<i>Outros defensivos</i>	0,04 kg/ha
<i>Aplicação de torta de filtro</i>	5 t (base seca)/ha
<i>Aplicação de vinhaça</i>	140 m ³ /ha

Em unidades produtoras típicas no Centro-Sul brasileiro (utilizando metade da cana para açúcar e metade para etanol) a aplicação da vinhaça representa cerca de 15 a 20 mm em

30% do canavial e praticamente elimina a necessidade da irrigação. Os valores apresentados na Tabela 2.4 acima para aplicação da vinhaça e torta de filtro se referem aos valores recomendados em condições típicas para o estado de São Paulo, atendendo a legislação ambiental (BNDES, 2008).

Apesar de ser uma cultura com alta demanda de água, índices pluviométricos superiores a 800 mm (idealmente entre 1200 a 1500 mm) e adequadamente distribuídos (períodos chuvoso e seco bem definidos) são suficientes para alcançar uma boa produtividade. Por conta disso, a irrigação da cana é mais disseminada na região Nordeste, apresentando um crescimento gradativo no Centro-Oeste e em áreas do Sudeste, especialmente Rio de Janeiro, Espírito Santo e oeste de São Paulo. Usa-se comumente a “irrigação de salvação”, após o plantio a fim de garantir a brotação em diferentes lâminas nas épocas mais críticas do desenvolvimento. Entretanto praticamente toda a cana que é produzida na região Centro-Sul é cultivada sem irrigação (CGEE, 2007). Como observa Rossetto (2004) a própria Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) classifica os impactos das lavouras de cana na qualidade da água no nível 1, isto é, nenhum impacto.

O sistema tradicional de colheita, ainda utilizado em cerca de 70% das áreas cultivadas no Brasil, envolve a queima prévia do canavial e o corte manual da cana inteira. Esse modelo, no entanto, vem sendo progressivamente substituído pela colheita mecanizada da cana crua picada (sem queima), por conta das restrições ambientais às práticas da queima, exemplificadas pelo pela Lei Estadual 11.241 de 19/09/02 em São Paulo e pelo Decreto do Governo Federal n.º 2.661 de 08/07/98. Com os acordos firmados entre o governo os e produtores, espera-se que até 2020 toda a cana seja colhida mecanicamente sem a queima prévia do canavial. Na Tabela 2.5, Macedo e Nogueira (2005) apresentaram dados referentes aos tipos de colheita para a safra de 2003/04. Percebe-se ainda a supremacia da coleta manual e da prática de queima da cana, muito embora esta realidade tende a mudar, por razão dos poluentes emitidos pela queima e na busca de maior eficiência na colheita.

Tabela 2.5: Colheita de cana para a safra 2003/04 e previsões (Adaptado de Macedo e Nogueira, 2005)

Tipo de colheita	Safra	Safra	Projeção Safra
	2003/04	2003/04	2013/2014
	Valores médios	Valores máximos	Valores médios
Produtividade [t/ha]	84,3	108,8	89,0
Pol [% cana]	14,6	16,6	15,1
Manual [%]	66,0	11,0	15,0
Mecânica [%]	34,0	89,0	85,0
Cana queimada [%]	79,0	13,0	20,0
Cana crua [%]	21,0	87,0	80,0

Junto à cana-de-açúcar encontra-se a beterraba como biomassa açucarada, porém bem menos expressiva, e cultivada para fins energéticos especialmente em países da Europa e na Austrália. Esta raiz tuberosa apresenta produtividade que varia entre 50 a 100 t/ha, com teores de açúcar da ordem de 18%, resultando em rendimentos de etanol por hectare cultivado similares aos da cana (RIRDC, 2007). Já o sorgo sacarino ainda encontra-se em baixos níveis de produção e tem sido proposto como potencial fonte de matéria-prima, possivelmente integrado ao ciclo da cana de açúcar.

2.2.2. Matérias-primas oleaginosas

Os óleos vegetais e as gorduras animais consistem nas principais matérias-primas para sintetizar o biodiesel, sendo essencialmente formados por glicerídeos (97% do óleo). Dentre eles, geralmente 95% são triglicerídeos e o restante se divide entre di e monoglicerídeos (Figura 2.6).

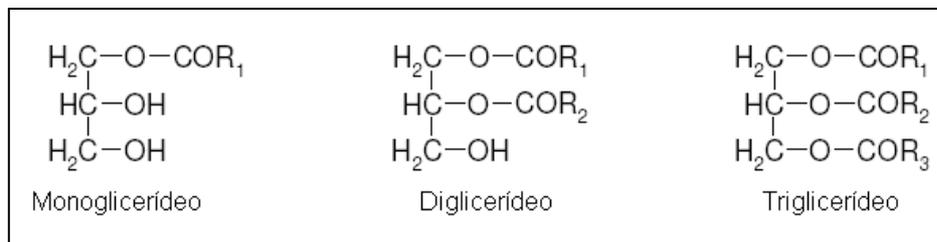


Figura 2.6: Estrutura das moléculas de glicerídeo

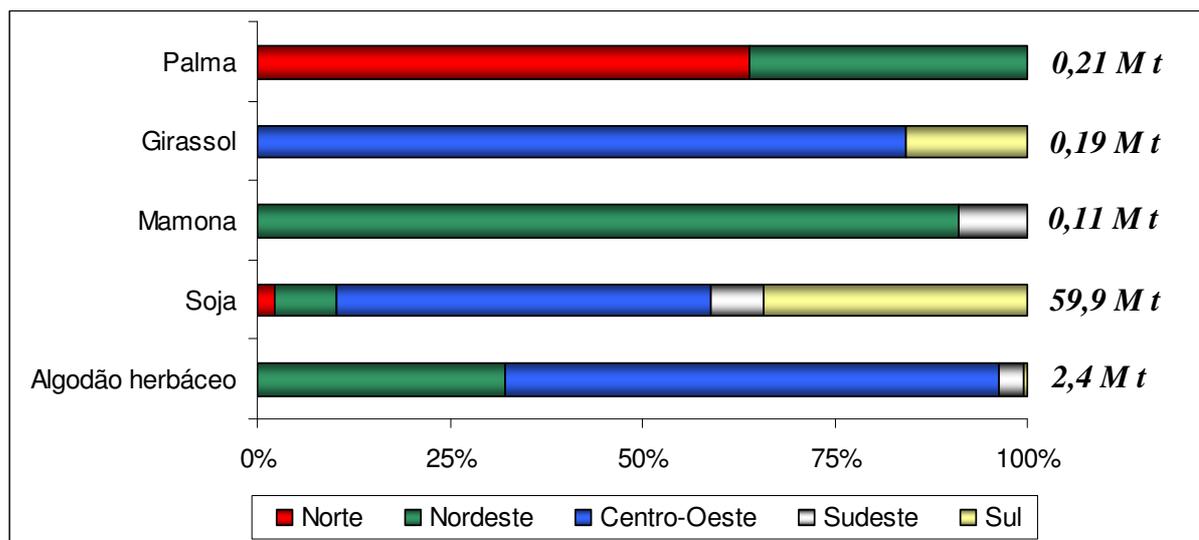
A composição química do óleo, como o tamanho das cadeias R_1 , R_2 e R_3 , e suas respectivas propriedades são de fundamental importância quando se pretende convertê-lo em biocombustível, por conta da influência que provocam nas propriedades físicas do produto obtido, como viscosidade, ponto de fusão, estabilidade térmica e índice de cetano. Da mesma forma, parâmetros como produtividade agrícola, e conteúdo de óleo na cultura geralmente sinalizam a potencial viabilidade de utilizar a espécie para fins energéticos. Na Tabela 2.6 são apresentados os rendimentos agrícolas das principais oleaginosas usadas na produção de biodiesel.

Óleos e gorduras estão entre as principais matérias-primas da agroindústria e usadas no setor de alimentos. Segundo dados da FAO (2005) apud CCAP (2008) a produção de oleaginosas demanda aproximadamente 208 milhões de hectares no mundo, sendo 85% destinados a culturas anuais, como soja, nabo forrageiro e algodão, e 15% com plantações perenes, como palma e oliveiras. Em 2006 a produção mundial de óleos vegetais alcançou 115 milhões de toneladas, e entre os grandes produtores encontram-se o Brasil, China, Índia, Indonésia, Nigéria, Paquistão, Filipinas, Tailândia, Uzbequistão e Estados Unidos, que respondem em conjunto por 80% da produção (CCAP, 2008).

Tabela 2.6: Características de algumas oleaginosas (Adaptado de Macedo e Nogueira, 2005 e CCAP, 2008)

Oleaginosa vegetal		Conteúdo de óleo [% m _{Total}]	Produtividade agrícola [t/ha]
Algodão	<i>Gossypium hirsutum</i>	16 - 18	1,7 - 3,0
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	52 - 60	1,0 - 5,0
Dendê	<i>Elaeis guineensis N.</i>	26	10,0 - 22,0
Girassol	<i>Helianthus annus</i>	38-48	1,5 - 2,0
Mamona	<i>Ricinus communis</i>	43-45	0,6 - 2,5
Nabo Forrageiro	<i>Brassica napus</i>	37 - 46	1,7 - 2,0
Pinhão-Manso	<i>Jatropha curcas</i>	24 -26	1,0 - 5,0
Soja	<i>Glycine Max</i>	17 - 20	1,5 - 3,0

O Brasil é responsável por cerca de 6 a 9% da produção mundial de óleos vegetais, contribuindo com aproximadamente 10,5 milhões de toneladas de óleo na safra 2007/08 que ocupou cerca de 22 milhões de hectares. A soja no Brasil, tipicamente cultivada nas regiões Centro-Oeste e Sul, corresponde a 90% do volume de óleo produzido, e sua produção supera ao longe as outras oleaginosas (Figura 2.7). As outras espécies correspondem a modestos volumes de produção e estão disseminadas em outras regiões. A palma que é típica da região Norte, também é cultivada conjuntamente com a mamona e o algodão na região Nordeste (CONAB, 2009).

Figura 2.7: Produção de oleaginosas nas regiões brasileiras na safra de 2008. (IBGE, 2009).¹

1) A produção da palma é referente à safra de 2007, e foi contabilizado somente os estados que produzem óleo de palma, no caso Bahia e Pará. A produção de algodão herbáceo refere-se ao caroço de algodão. O algodão arbóreo não foi contabilizado e é cultivado apenas no Nordeste.

Além da produtividade agrícola e conteúdo de óleo, outros parâmetros – demanda de nutrientes e de água e intensidade de mecanização – são importantes quando se pretende analisar a sustentabilidade da produção de tais culturas em vista de outros mercados não convencionais como a produção de biocombustíveis. Nos próximos parágrafos descreve-se sucintamente alguns aspectos da cultura de soja no Brasil.

A soja (*Glycine max*), mesmo sendo originária do leste da Ásia e ter sido cultivada no Brasil desde o século XIX na região Sul, atualmente é encontrada em grande escala no Centro-Oeste do país, como visto acima. A espécie é classificada como uma leguminosa de ciclo anual, usualmente com altura menor que 75 cm, e com densa cabeleira radicular. A densidade radicular permite a alocação de nódulos de bactérias, geralmente do gênero *Rhizobium*, responsáveis pela fixação de nitrogênio em valores de até 180 kg/ha, o que torna desnecessário o aporte de adubos nitrogenados na etapa de cultivo da soja (GTZ/FBDS, 2005 apud CCAP, 2008).

De maneira geral, a soja adapta-se bem em vários ambientes, também por conta do sucesso de extensos programas de melhoramento de cultivares. No entanto, condições ótimas de temperatura estariam na faixa de 20 a 35°C, com precipitações anuais bem distribuídas de 700 a 1200 mm (Mourad, 2008). Na região do cerrado, onde a soja é maciçamente cultivada, os solos apresentam elevada acidez, baixa fertilidade e baixos níveis de matéria orgânica, devido às altas concentrações de alumínio. O aporte de calcário, fertilizantes, especialmente fósforo, e o uso da adubação de cobertura como o milheto são exigências a fim de propiciar melhores condições ao desenvolvimento da cultura. A mecanização na etapa agrícola é intensa, e o uso de herbicidas e inseticidas é regular. Na região Centro-Oeste, o ano agrícola da soja vai de abril a outubro, quando são colhidas inúmeras vagens que contém sementes amarelas ou pretas. No Brasil verificou-se no ano passado uma produtividade média de 2800 kg de grão por hectare colhido (IBGE, 2009). Em termos de produção, os Estados Unidos encabeçam a lista dos maiores produtores com 72,9 toneladas de grão na safra de 2007/08, seguido do Brasil, com 60 toneladas de grãos no mesmo período; junto eles são responsáveis por 60% da produção mundial. (Embrapa Soja, 2009).

A finalidade da soja é variada, abrangendo a agroindústria, indústria química e de alimentos. Do esmagamento do grão, já que apenas 18% da massa do grão é constituída de óleo, o produto principal é o farelo, usado largamente usado na alimentação; De acordo com os dados do Banco Mundial (2009) o preço do óleo de soja duplicou no ano passado em relação ao ano de 2007, chegando a valores de US\$ 1300,0/t. Já o farelo de soja teve um crescimento linear no mesmo período chegando a valores de US\$ 435,0/t em meados de 2008.

O processo de extração do óleo depende da capacidade da planta, geralmente plantas com capacidades inferiores a 1500 kg/hora consistem em apenas prensagem mecânica², sendo

2) Informação pessoal fornecida pela Scott Tech. www.scotttech.com.br.

que a extração com solvente (hexano) é típica apenas em plantas maiores. Mesmo assim, etapas como secagem, a fim de evitar a deterioração dos grãos, limpeza, degomagem e neutralização acompanham a extração do óleo de soja. No Brasil, a cadeia de cultivo e produção de óleo de soja já é bem estruturada conferindo ao setor a representatividade de 6% no Produto Interno Bruto e 8% nas receitas advindas da exportação. Atualmente encontra-se uma capacidade de extração de óleo instalada de aproximadamente 150 mil toneladas diárias, localizadas no Paraná, Rio Grande do Sul e Mato Grosso (ABIOVE, 2009). A existência de um setor já estruturado e forte foi um dos principais motivos que incentivaram o uso do óleo de soja na produção de biodiesel, embora o rendimento seja baixo por conta do mínimo conteúdo de óleo extraído do grão, além da possível competição com o setor de alimentos.

Outras oleaginosas como o Nabo Forrageiro (*Brassica napus*) são largamente utilizadas na produção de biocombustíveis na Europa. Por outro lado, espécies como o Pinhão-Manso (*Jatropha curcas*) e o Dendê (*Elaeis guineensis*) tem chamado a atenção por conta do elevado conteúdo de óleo.

2.3. Aspectos de produção dos biocombustíveis

A conversão da biomassa em combustível acontece mediante variados processos industriais, em função das características da matéria-prima e do biocombustível pretendido. Desta forma, a seguir serão apresentadas as características dos processos convencionais de produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel, que são o foco de estudo deste trabalho.

2.3.1. Produção de etanol

Mediante rotas biológicas, o etanol pode ser produzido a partir de qualquer biomassa que contenha quantidades significativas de amido ou açúcares. Hoje em dia há um leve predomínio da produção a partir de materiais amiláceos, como o milho, cujo processo conta com uma etapa adicional onde o amido é convertido em açúcares por meio de enzimas a altas temperaturas (Figura 2.8). Por outro lado, considerando a produção a partir de açúcares, como é o caso da cana e da beterraba, o processo é mais simples, já que os açúcares já estão disponíveis na biomassa. Nos parágrafos seguintes faz-se uma breve descrição do processo de produção do etanol a partir de cana-de-açúcar.

Uma vez na usina, a cana em geral é lavada (somente a cana inteira) e segue para o sistema de preparo e extração. No Brasil este sistema é essencialmente baseado em moendas, isto é, a extração do caldo se realiza sob pressão de rolos, montados em conjuntos com quatro a sete sucessivos ternos. Na moagem, para manter o rendimento da extração adiciona-se água ao bagaço para diluir o caldo residual. Este caldo posteriormente é peneirado e tratado quimicamente, com a adição de sulfito e cal, a fim de decantar as impurezas. Após a decantação, o lodo de fundo resultante é submetido a filtros rotativos à vácuo, de onde se obtém a torta de filtro, e o caldo tratado é então concentrado em evaporadores de múltiplo-efeito e cristalizado. Neste processo, nem toda a sacarose disponível na cana é cristalizada e a

solução residual rica em açúcar (mel) pode retornar mais de uma vez ao processo com o propósito de se recuperar mais açúcar. O mel final, que não retorna ao processo de fabricação de açúcar, recebe o nome de melaço.

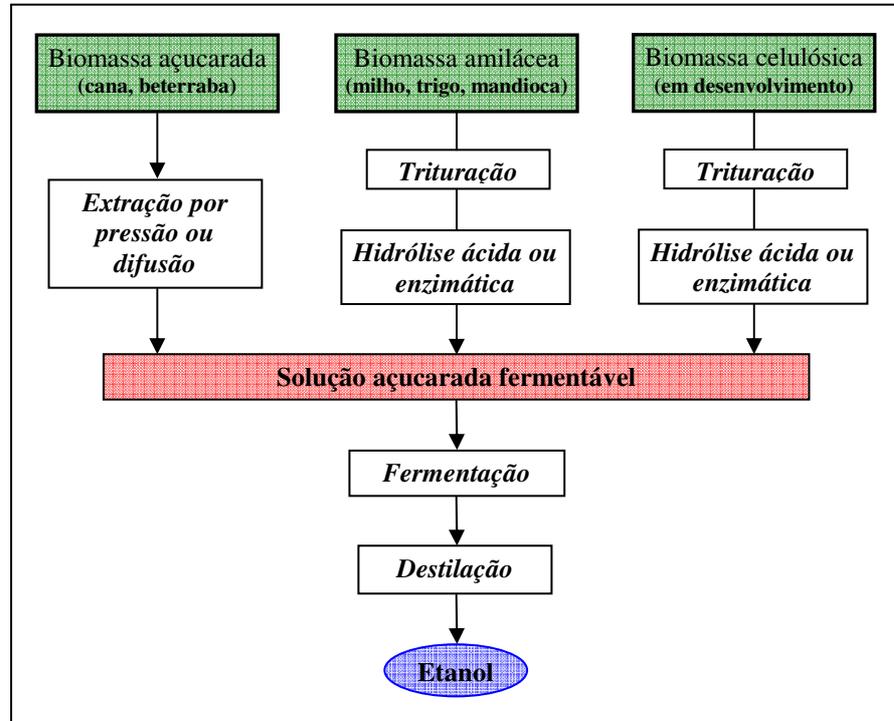


Figura 2.8. Rotas tecnológicas para produção de etanol (Adaptado de BNDES, 2008)

A produção de etanol pode ser baseada na fermentação direta do caldo tratado, ou de misturas de caldo e melaço (mosto), como é mais frequentemente praticada no Brasil. Ao direcionar o mosto ou o caldo para as dornas de fermentação, adicionam-se leveduras (fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisiae*) que promovem a fermentação por um período de 8 a 12 horas, dando origem ao vinho (mosto fermentado, com uma concentração de 7 a 10% de álcool). O processo de fermentação mais utilizado nas destilarias do Brasil é o Melle-Boinot, cuja característica principal é a recuperação das leveduras do vinho mediante sua centrifugação. Assim, após a fermentação, as leveduras são recuperadas e tratadas para novo uso, enquanto o vinho é enviado para as colunas de destilação (BNDES, 2008).

Na destilação, o etanol é obtido inicialmente na forma hidratada, com aproximadamente 96°GL (porcentagem em volume), correspondentes a cerca de 6% de água em peso. Neste processo simultaneamente obtém-se a vinhaça ou vinhoto como resíduo, normalmente numa proporção de 10 a 13 litros por litro de etanol hidratado produzido, e outras frações líquidas que dão origem aos alcoóis de segunda e óleo fúsel. O etanol hidratado pode ainda ser enviado para uma coluna de desidratação que, com a adição de ciclohexano, permite a obtenção do etanol anidro, com aproximadamente 99,7°GL ou 0,4% de água em peso. A desidratação do etanol ainda pode ser feita por adsorção com peneiras moleculares ou pela destilação extrativa com monoetilenoglicol (MEG), que se destacam pelo menor consumo de

energia e também pelos custos mais elevados (BNDES, 2008). O desenho esquemático a seguir apresenta o processo da produção de etanol de maneira geral, e a Tabela 2.7 apresenta os valores típicos do processo.

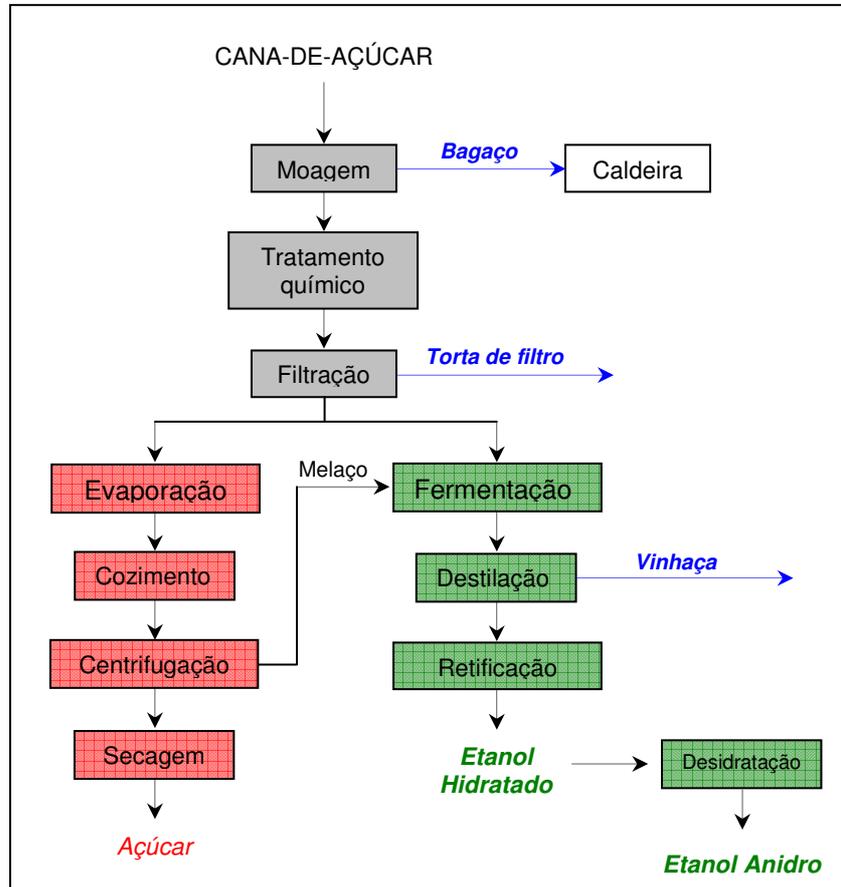


Figura 2.9: Diagrama de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar (Adaptado de Seabra, 2008)

A produção de co-produtos junto à obtenção do etanol confere ao processamento da cana crescente interesse sob várias perspectivas. Entre estes co-produtos enfatiza-se o bagaço, a vinhaça ou vinhoto, e a torta de filtro.

O bagaço, obtido em valores médios de 250 kg com 50% de umidade por tonelada de cana processada, garante a auto-suficiência energética às usinas brasileiras, disponibilizando ainda eletricidade excedente para a rede (Cortez et al., 1992). Isso é possível devido aos sistemas de cogeração, comumente baseados em ciclos a vapor, instalados na planta, que permite a produção simultânea dos diferentes tipos de energia que o processo demanda. De acordo com Seabra (2008), ao assumir a operação de uma usina de açúcar e etanol nas condições típicas do Centro-Sul brasileiro, com uma moagem anual de 2 milhões de toneladas de cana, sistemas de cogeração convencionais a 65 bar e 480 °C correspondem a uma capacidade instalada de 31 MW, enquanto para sistemas otimizados a 90 bar e 520°C, essa potência passa a ser 82 MW, para operação durante a safra. Em termos de emissão de gases estufa, Macedo et al. (2004) estimaram que este co-produto ao ser destinado à geração de

energia é responsável pela redução de 12,5 a 23,3 kgCO_{2eq} por tonelada de cana processada se fosse utilizado óleo combustível para o mesmo fim. A utilização da palha como insumo energético junto ao bagaço pode aumentar em mais de 50% a geração de eletricidade excedente, conforme apresenta os estudos da CGEE (2007). A produção excedente de bagaço, com valores entre 8 e 12%, é comumente destinada às indústrias de papel e celulose, e utilizado regularmente em indústrias cerâmicas e no processamento da laranja (BNDES, 2008).

Tabela 2.7: Principais parâmetros do processamento da cana (Adaptado de BNDES, 2008 e CTC, 2009)

Energia	Açúcar	Etanol Hidratado	Etanol Anidro
Térmica (Vapor saturado 1,5 bar) [kg/t _{cana}]	470 - 500	370 - 410	500 -580
Mecânica [MJ/t _{cana}]	57,6	57,6	57,6
Elétrica [MJ/t _{cana}]	43,2	43,2	43,2
Rendimento	100/0³	0/100	50/50
Açúcar	120 kg/t _{cana}	0	67 kg/t _{cana}
Etanol	0 ⁴	85 L/t _{cana}	62 L/t _{cana}

A torta de filtro e a vinhaça pode ser utilizadas na adubação do canavial, por conta da razoável concentração de nitrogênio, fósforo e, especialmente, potássio na sua composição. Mesmo sendo reconhecido seu valor nutricional desde a década de 50, a aplicação destes resíduos no canavial se intensificou a partir de 1999, pressionada pela questão ambiental e do alto custo de fertilizantes (Agência Embrapa, 2009). Macedo et al. (2004) apresenta uma economia total em massa de aproximadamente 60% de nutrientes na adubação, quando em 30% da área de soqueiras e de reforma aplicava-se vinhaça e torta de filtro.

2.3.2. Produção de biodiesel

Entre as técnicas que visam adequar o uso dos óleos vegetais e gorduras animais como combustível, por meio da diminuição da viscosidade, encontram-se a transesterificação, a pirólise, a diluição e a microemulsão. A transesterificação permite a formação do conjunto de ésteres, que conceitualmente é denominado biodiesel, representando o processo mais utilizado na conversão dos óleos vegetais para fins energéticos. De maneira geral, o processo de transesterificação (Figura 2.10) consiste na reação entre uma molécula de óleo (triglicerídeo) e três moléculas de álcool, no caso metanol, na presença de um catalisador, produzindo um conjunto de ésteres (biodiesel) e glicerina.

3) 100/0 significa que 100% da cana é destinada à produção de açúcar.

4) Se considerar a fermentação do melaço pode-se produzir ainda 7 a 10 litros de etanol.

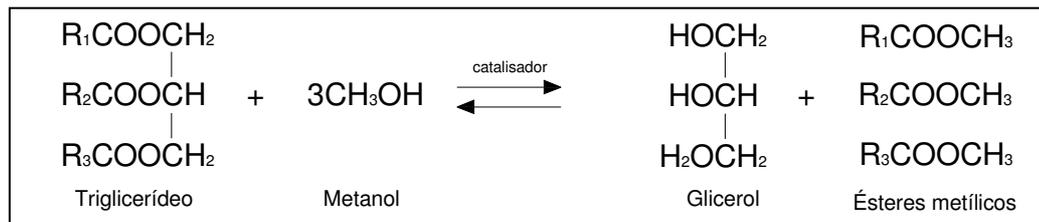


Figura 2.10: Reação de Transesterificação

Ferrari et al. (2005) e outros pesquisadores salientam que o rendimento da reação de transesterificação é influenciado por vários fatores que incluem: o tipo de catalisador, temperatura, razão molar *álcool:óleo* e pureza dos reagentes, especialmente umidade e concentração de ácidos graxos livres (AGL)

O catalisador utilizado na obtenção do biodiesel pode ser de natureza ácida, básica, organometálica ou biológica; e ainda é classificado como heterogêneo, quando não se dissolve com os reagentes, e homogêneo, sendo neste caso necessária sua neutralização e remoção no final do processo. A natureza do catalisador e o tipo de catálise empregada são de fundamental importância no processo de obtenção do biodiesel, pois justificarão a necessidade de etapas adicionais podendo exigir características específicas dos equipamentos utilizados.

O método convencional de produção de biodiesel utiliza catálise alcalina homogênea. Segundo Encinar et al. (2002), o uso deste tipo de catalisador é predominante devido a maior velocidade que confere à reação, maiores rendimentos e menores problemas de corrosão nos equipamentos, trabalhando com menores pressões e temperaturas (25°C a 70°C aproximadamente), e ainda permitindo o uso de menores relações molares *álcool:óleo*. Os catalisadores alcalinos mais usados são o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), metóxido de sódio (CH₃ONa) e metóxido de potássio (CH₃OK). Zhang et al. (2003) reportaram conversões maiores que 95% de óleos com baixo índice de acidez (<0,5%) em ésteres metílicos. A reação durou 1 hora a temperaturas de 60°C a 65°C e pressões de 1,4 atm a 4,1 atm, a partir de uma proporção molar metanol:óleo de 6:1 e uma concentração de catalisador de 0,5 a 2,0% em massa de óleo.

No entanto, uma limitação da catálise básica é sua elevada sensibilidade à umidade e ácidos graxos livres. A elevada quantidade de AGL pode reagir com o catalisador produzindo sabão e água; e a presença de água pode causar saponificação, pois aumenta a acidez. A saponificação não somente consome o catalisador alcalino, mas o sabão resultante forma emulsões, que vêm criar dificuldade na purificação do biodiesel. Freedman et al. (1984) afirmam que a catálise alcalina é comercialmente viável para óleos desidratados com menos de 0,5% de AGL, juntamente com álcool e catalisador anidros. Desta forma, a catálise alcalina de óleos e gorduras residuais, submetidos especialmente a processos de fritura, torna-

se desmotivada à primeira vista devido à elevada acidez e umidade característica destes óleos. Por outro lado, processos de pré-tratamento podem torná-la viável

A catálise ácida no processo de transesterificação não possui a mesma popularidade em aplicações convencionais que a catálise básica, devido principalmente à baixa velocidade que confere à reação. A velocidade da reação pode ser aumentada com a elevação da temperatura, da pressão e da proporção molar *álcool:óleo*. No entanto, é verificado que a catálise ácida possui baixa sensibilidade à presença de AGL, sendo recomendada para processos que utilizam óleos residuais. A catálise enzimática e a catálise heterogênea tem se surgido como alternativas interessantes, porém ainda não estão desenvolvidas ao ponto de se tornarem viáveis para processos industriais.

Entre os alcoóis freqüentemente usados no processo de transesterificação estão o metanol e o etanol. O uso do metanol é mais amplo devido ao baixo custo e suas vantagens físicas e químicas (molécula polar de cadeia curta), reagindo rapidamente com os triglicerídeos, dissolvendo facilmente os catalisadores básicos e ácidos e proporcionando uma clara separação de fases no fim da reação. O uso de etanol no Brasil é de grande interesse, visto a alta produção deste insumo, portanto Candeia et al. (2006), ao comparar duas rotas de obtenção de biodiesel utilizando metanol e etanol, perceberam uma vantagem em termos de rendimento reacional equivalente a 2,1% quando se usou metanol, salientando-se ainda que a rota etílica exigiu o dobro de tempo em relação à rota metílica.

O arranjo do processo convencional de obtenção do biodiesel (Figura 2.11) está fortemente associado às características da matéria-prima, condições reacionais exigidas e a produção demandada. Segundo Knothe e Gerpen (2006), plantas de pequeno porte geralmente utilizam reatores de batelada, mas a maioria das plantas de grande porte (acima de 4000 t/ano) utiliza processos de fluxo contínuo envolvendo reatores de leito agitado ou reatores de fluxo pistonado (*plug-flow*). Pimentel e Patzek (2005) estimaram valores de 972,0 MJ e 5655,5 MJ de eletricidade e vapor para a produção de uma tonelada de biodiesel de soja, sendo que possivelmente este valor já incluía o gasto energético da extração do grão.

De maneira geral, numa planta típica, após a reação de transesterificação, o produto reacional é decantado visando à separação de duas fases. Na fase superior encontra-se principalmente a mistura de ésteres (biodiesel) e na fase inferior encontra-se a glicerina gerada. A purificação da fase inferior remove de catalisador e álcool, que poderá regressar para a reação, obtendo-se a glicerina destilada. A etapa de neutralização da fase superior é necessária para retirar o excesso de catalisador contido nesta fase. Nos processos convencionais que utilizam catalisadores alcalinos, a neutralização pode ser feita por meio da lavagem da fase superior com solução ácida (Ferrari et al., 2005). Segundo Knothe e Gerpen (2006), além de neutralizar o catalisador alcalino, esta lavagem tem o objetivo de remover sais, sabões, metanol ou glicerina livre. Após a lavagem procede-se à secagem do produto para retirar o excesso de água.

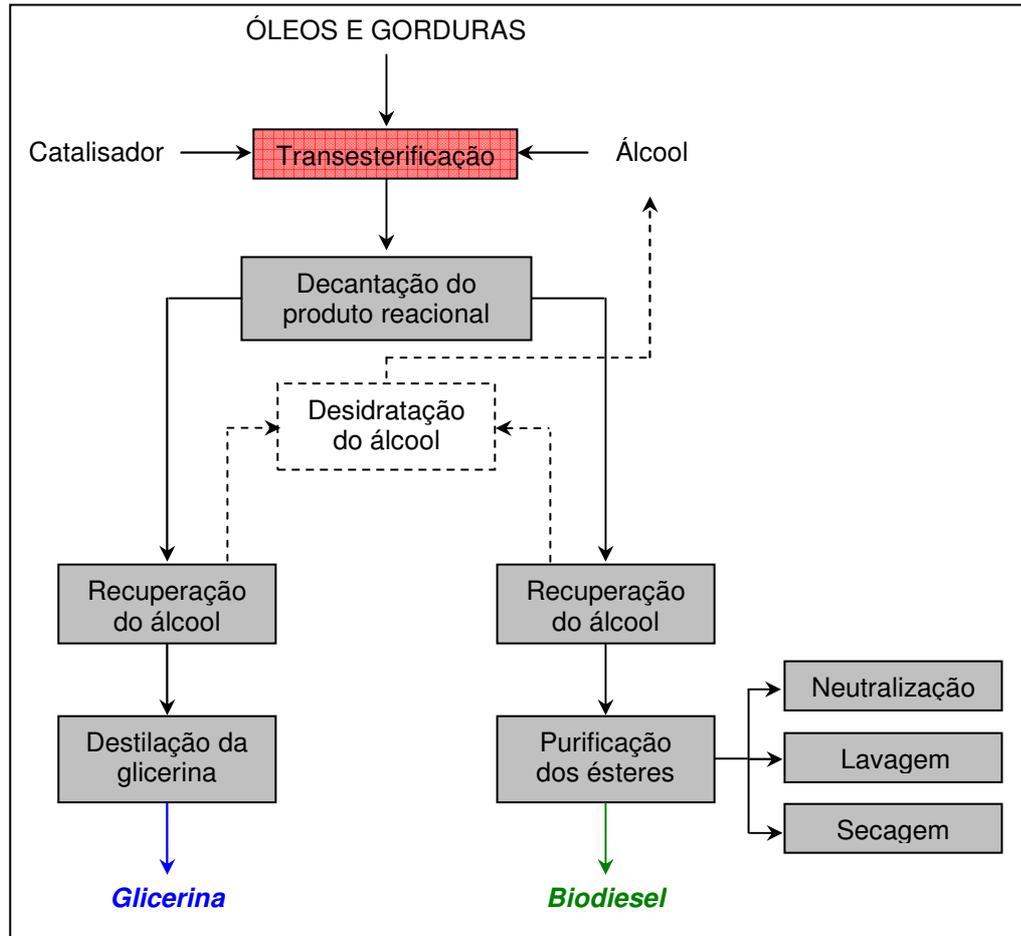


Figura 2.11: Fluxograma do processo de obtenção de biodiesel

A glicerina é um importante co-produto do processamento de óleos e gorduras, sendo encarado muitas vezes como fator preponderante na determinação da viabilidade do projeto, uma vez que o mercado deste co-produto já se encontra bem estruturado, contando com indústrias farmacêuticas e de cosméticos. Em termos gerais, estima-se que 10% da massa de óleo processado transformam-se em glicerina, porém com certo grau de impurezas. O preço da glicerina pura no mercado tem diminuído nos últimos anos especialmente após o início da produção de biodiesel em larga escala. Em 2003 contabilizava-se US\$ 1200,00 a tonelada de glicerina pura; em 2006 este preço estava na ordem de US\$ 600,00 com tendência de cair ainda mais (Miller Klein, 2006).

2.4. Os biocombustíveis no cenário global e no Brasil

Segundo Wilian (2007), em meados de 2007, estimou-se que a produção global de biocombustível triplicou desde 2000, passando de aproximadamente 18,2 bilhões de litros para 60,8 bilhões de litros (Figura 2.12), mas ainda contribuindo com menos de 3% do combustível demandado pelo setor de transporte. De acordo com estes dados, a produção de biodiesel correspondia a aproximadamente 17% deste montante, com cerca de 9,8 bilhões de

litros, sendo o restante associado à produção de etanol (49,2 bilhões de litros). Verifica-se que 90% da produção de biocombustíveis está concentrada nos Estados Unidos, Brasil e União Européia (UE), tendendo a se tornar mais dispersa se os programas em desenvolvimento em outros países, como Malásia e China, obtiverem sucesso.

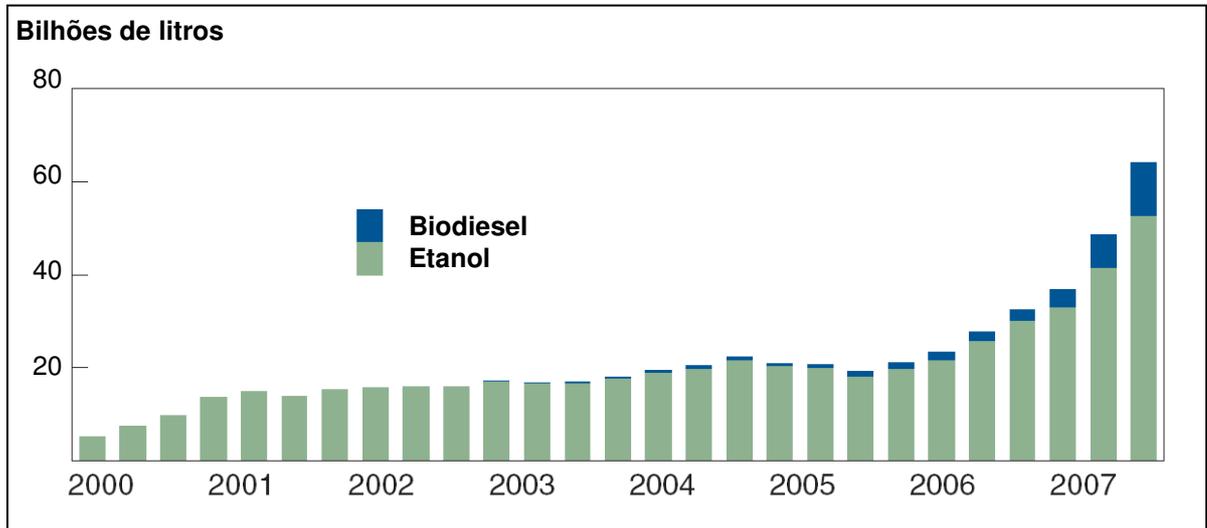


Figura 2.12: Evolução da produção de biocombustíveis (Adaptado de Willian, 2007)

A produção de etanol se concentra especialmente nos Estados Unidos e no Brasil (Figura 2.13), sendo responsáveis por cerca de 89% da produção registrada em 2007. Nos Estados Unidos, o milho é a matéria prima responsável por 98% da produção do etanol. No Brasil, a produção de etanol foi estimada em aproximadamente 22,6 bilhões de litros na safra 2007/08 (14,3 bilhões de litros de etanol hidratado e 8,3 de etanol anidro), sendo totalmente obtido da cana-de-açúcar, e consumido puro ou em misturas de 25% na gasolina (UNICA, 2009). A China tem ocupado o lugar do terceiro maior país produtor de etanol. Na Europa, o trigo e a beterraba têm sido usados na produção de etanol na Inglaterra, Alemanha e França.

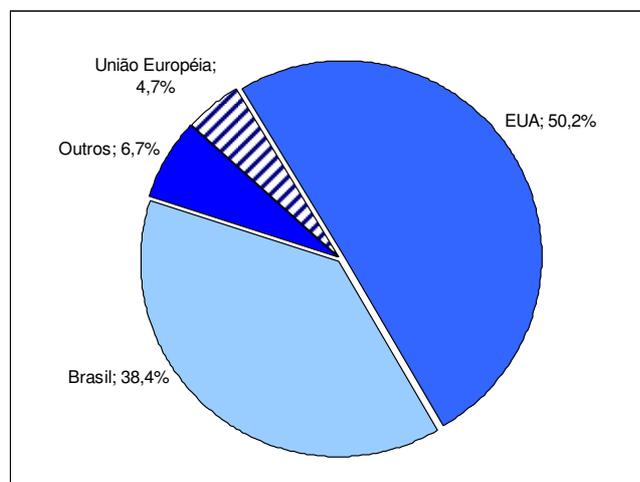


Figura 2.13: Produção de etanol em 2007 por regiões no mundo (Adaptado de Willian, 2007)

A produção de biodiesel, por outro lado, está concentrada na Europa (Figura 2.14). Estima-se que a União Européia foi responsável em 2007 pela produção de 6,6 bilhões de litros de biodiesel, equivalente a aproximadamente 70% da produção mundial. O setor tem apresentado um rápido crescimento desde 2000, mantendo a Alemanha responsável por mais da metade da produção do biocombustível, onde o principal insumo utilizado é a colza (cerca de 80%), seguido da soja e do girassol. Especificamente no Brasil, segundo a ANP (2009) no ano passado verificou-se uma produção de 1,2 bilhões de litros de biodiesel, sendo que aproximadamente 96% é proveniente da soja e do sebo bovino. O país conta com uma capacidade autorizada de produção de 12 milhões de litros por dia, e atualmente já permite a mistura B3 no diesel, isto é, 3% em volume de diesel é biodiesel.

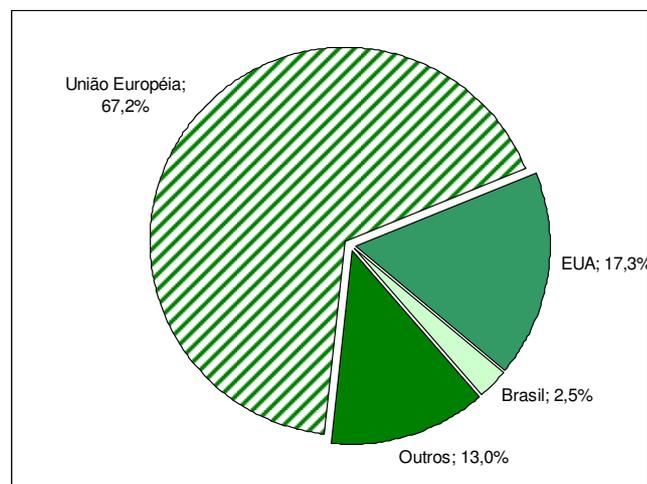


Figura 2.14: Produção de biodiesel em 2007 por regiões no mundo (Adaptado de Willian, 2007)

O aumento da demanda de produtos agrícolas para a produção de biocombustíveis como açúcar, milho, trigo e sementes oleaginosas poderia provocar uma significativa mudança no mercado de commodities alimentares, pois passam a competir com este setor. De acordo com o IMF (2008) o preço do trigo e do milho cresceu aproximadamente 70% desde 2005, junto com 42% do preço da soja e 10% do preço do açúcar. Neste sentido, muito tem se discutido acerca do largo incentivo na produção de biocombustíveis de primeira geração, por conta das grandes conseqüências enquanto contribuem com pequenas proporções na demanda de energia global (Royal Society, 2008). Porém, este tema deve ser tratado com cautela, pois ao apresentar os biocombustíveis de segunda geração como redentores da sustentabilidade, comete-se um grosseiro equívoco alocando os de primeira geração num mesmo nível, uma vez que o etanol de cana, especialmente produzido no Brasil, já atende de forma satisfatória todos os requisitos colocados nestas discussões (BNDES, 2008).

O potencial conflito entre a produção de alimentos e produção de biocombustíveis, por exemplo, não está ilustrado apenas na demanda adicional de matéria-prima pelo setor, mas também se apresenta na demanda de terra para o cultivo de plantações energéticas (*energy crops*), isto é, destinadas exclusivamente a produção de bioenergia, uma vez que a expansão

das plantações energéticas pode provocar o deslocamento de outras culturas, invadindo áreas de preservação, promovendo a monocultura, e desequilibrando o ecossistema. Um dos principais fatores que baliza estas discussões tem sido o rendimento por hectare em biocombustível produzido (Figura 2.15). Entre as culturas usadas como insumos para a produção de biocombustíveis, salientam-se os consideráveis rendimentos da cana-de-açúcar para a produção de etanol frente ao milho, e a supremacia das palmáceas frente as outras culturas para a produção de biodiesel

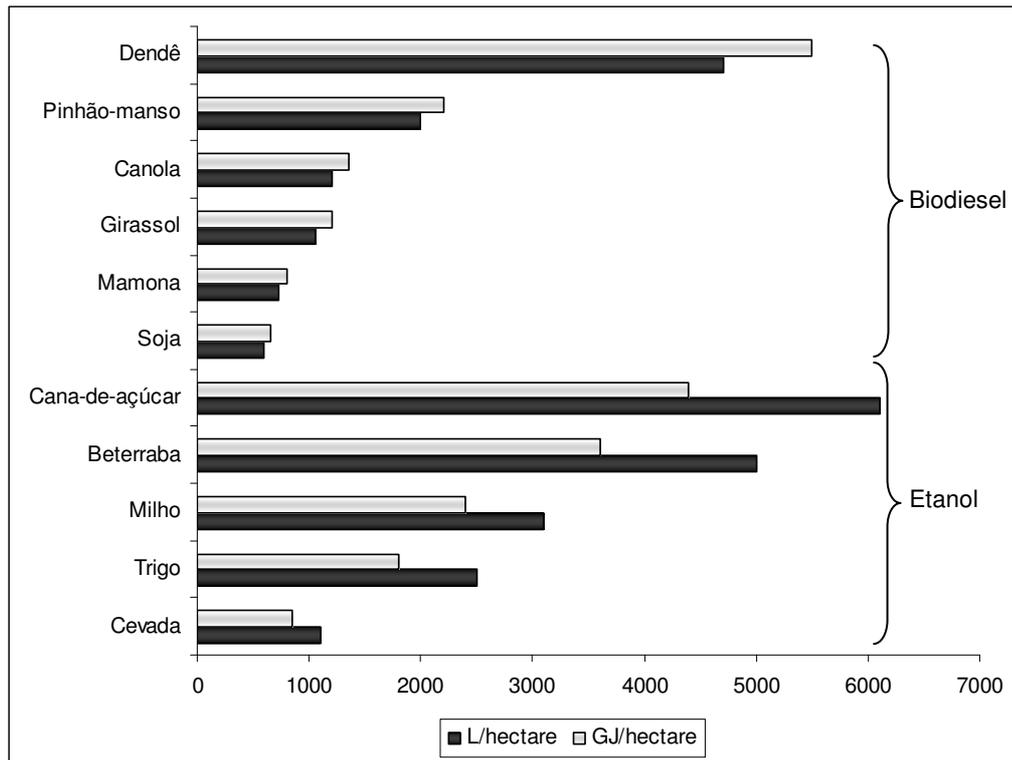


Figura 2.15: Rendimentos de biocombustíveis em termos de volume e energia obtidos por hectare de matéria-prima (Adaptado da Royal Society, 2008)

Muitas análises, como a análise energética, e projeções têm sido feitas nesta perspectiva, porém a questão deve ser tratada com delicadeza, a fim de que a produção e uso de biocombustíveis seja implementada da maneira mais sustentável e menos impactante. De qualquer forma, é pertinente afirmar que nem todos os países têm condições de desenvolver extensos programas de produção de etanol e biodiesel sem causar grandes impactos a nível local e global. Por outro lado, a expansão almejada do setor de biocombustíveis pode se dar nas terras de países “vocacionados” para tal, quer seja pela estrutura física (clima, pedologia, etc.), ou pelo tamanho das áreas disponíveis.

CAPÍTULO 3: ANÁLISE ENERGÉTICA DE PROCESSOS

A análise energética pode ser definida como o estudo sistemático dos fluxos de energia através de um sistema produtivo, permitindo deduzir a quantidade de insumos energéticos requeridos à produção de algum bem, além de identificar e localizar as perdas associadas (Nogueira, 1985). Com este tipo de análise pode-se determinar a energia “embutida” em um determinado produto (*embodied energy*), isto é, a energia consumida para produzi-lo, bem como comparar, no caso de combustíveis, a quantidade de energia líquida entregue pelo produto frente seu custo energético (*net energy analysis*). Além de ser usada como critério para a escolha de processos com menor custo energético, esta análise dá consistência a programas de redução no consumo de energia ou que visem à utilização de fontes renováveis. No âmbito da produção de biocombustíveis, os valores resultantes de análises energéticas têm sido freqüentemente apresentados como parâmetros auxiliares para a seleção das melhores matérias-primas, associadas ao menor impacto ambiental e a menor dependência de insumos energéticos de origem fóssil.

É conveniente salientar que uma análise energética ganha forte respaldo quando complementada com uma análise econômica, a fim de evitar decisões errôneas: sabe-se da existência de processos de conversão energética ou de obtenção de combustíveis que energeticamente são certamente viáveis, porém sem competitividade econômica. No presente capítulo serão apresentados e discutidos os principais conceitos referentes à análise energética, inicialmente apresentando a evolução histórica destes conceitos, seguida de uma discussão acerca dos aspectos metodológicos mais relevantes, como os insumos considerados, a formulação de indicadores e os métodos de análises.

3.1. Evolução dos conceitos de Análise Energética

O interesse na contabilização dos fluxos energéticos aumentou consideravelmente nos anos setenta, sendo incentivado em especial pelo aumento dos preços dos combustíveis fósseis deflagrado pela crise do petróleo. Para o setor industrial tornou-se estratégico quantificar os fluxos energéticos característicos dos processos de produção, verificando a viabilidade das alternativas que diminuíssem perdas ou a dependência dos combustíveis fósseis.

Como apresenta Wilting (1996), vários pesquisadores, na década de setenta e a partir da década de oitenta, passaram a contabilizar os requerimentos energéticos e analisar seus fluxos em diversos setores. Odum (1971) e Odum (1978) foi um dos pioneiros em propor a análise energética como uma alternativa à análise econômica, defendendo que todas as decisões deveriam ser baseadas em aspectos energéticos apenas, o que provocou inúmeras críticas, especialmente por parte de economistas mais ortodoxos. Berry e Fels (1973) estimaram o custo energético de automóveis, por sua vez Chapman (1974) calculou os custos energéticos do cobre e do alumínio, bem como de alguns combustíveis. Wright (1974) e Bullard e Herendeen (1975) determinaram o custo energético de bens e serviços usando análises input-

output. Hannon (1974) comparou intensidades energéticas do setor econômico em função da intensidade de trabalho, e Leach (1976) procurou contabilizar os fluxos energéticos na produção de alimentos.

Logo se percebeu a necessidade de padronizar alguns aspectos da análise energética, permitindo assim que resultados de diferentes estudos fossem facilmente comparados. Neste sentido, a *International Federation of Institutes for Advanced Study*⁵ (IFIAS), então sediada em Estocolmo, na Suécia, organizou duas importantes conferências ocorridas em 1974 e 1976 com a finalidade de discutir os aspectos metodológicos de tais estudos. Segundo Verbraeck (1976), entre os tópicos abordados, encontram-se as seguintes observações, dentre outras:

- Recomendou-se adotar o Joule [J] como unidade de energia em todas as análises energéticas;
- A definição das fronteiras do sistema analisado é de grande importância na análise, sendo preferida a abrangência de todos os recursos até o ponto onde eles são encontrados no solo, nos oceanos ou no ar;
- A análise energética pode ser encarada como uma importante ferramenta econômica, pois permite escolher os processos mais eficientes em termos de custo energético.

A partir das conferências promovidas pela IFIAS, alguns grupos de pesquisa preocuparam-se em publicar trabalhos a fim de compor extensas bases de dados referentes aos requerimentos energéticos de certos setores da economia. Alguns destes trabalhos são ainda utilizados como referências em estudos atuais, este é o caso do trabalho de Pimentel (1980), por exemplo, que realizou um abrangente levantamento em variadas culturas americanas. Por sua vez, os estudos de CCMS (1978) e Boustead e Hancock (1979) contabilizaram os requerimentos do setor industrial.

Simultaneamente a estes eventos, a partir da década de noventa, a *International Organization for Standardization* (ISO) começou a publicar normas a fim de padronizar os processos industriais sob a perspectiva ambiental. Entre estas normas, um grupo delas, encabeçadas pela ISO 14040, versa sobre a Análise do Ciclo e Vida (ACV) de produtos e processos ou *Life Cycle Analysis (LCA)*, sendo inicialmente influenciada pelos pressupostos metodológicos das análises energéticas conduzidas até então. Atualmente, muitos estudos abrangem a análise energética dentro de uma análise mais extensa de ciclo de vida, como se observa em Forsberg (2000), que estudou as cadeias de transporte de bioenergia entre a Suécia e a Holanda, em Yànez (2008), que analisou o ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma, e em Su e Lee (2009), que estudou quatro sistemas de produção de biocombustíveis estimando o consumo líquido de energia por relações input/output.

5) <http://www.ifias.ca/>. Atualmente a secretaria desta entidade está sediada no Canadá.

Independente da metodologia utilizada, a análise energética sempre esteve em meio a discussões conceituais entre economistas, ecólogos e engenheiros, acerca de sua efetiva aplicabilidade. Quando Odum, Constanza, Hannon e outros pesquisadores propuseram, em meados da década de setenta, que a teoria econômica e social de valor fosse baseada em conceitos estritamente energéticos, abriu-se uma acalorada discussão. Por um lado os analistas de energia afirmam a superioridade da análise energética frente à análise econômica, ao justificar que análises unicamente baseadas neste parâmetro estão imunes a imperfeições de mercado que distorcem valores e diminuem a consistência dos resultados. Da mesma forma, a quantificação de externalidades ambientais, como a emissão de poluentes, provém de análises energéticas, fornecendo um novo enfoque acerca da viabilidade ao escolher uma determinada alternativa. Por outro lado, muitos economistas afirmam que os resultados destas análises são sensíveis às circunstâncias do mercado, uma vez que dependem da tecnologia, da indústria crescente e da taxa de desconto. Segundo Huettner (1976) apud Cleveland (2008), a análise energética de uma tecnologia específica, tal como o ciclo do combustível nuclear e suas técnicas de manutenção, depende dos preços dos insumos, das taxas de desconto, e de outras condições. Ao longo do tempo, os preços obrigam a substituição de materiais e insumos utilizados na fabricação da tecnologia como aço, cobre e cimento, causando variações nos resultados finais.

Não obstante estes embates teóricos, percebe-se que grande parte dos analistas de energia não se mostra adepta de uma teoria de valor baseada apenas nos insumos energéticos diretos e indiretos embutidos no produto, e ainda sugere a análise energética como um complemento aos resultados da análise econômica padrão. Da mesma forma, no levantamento de indicadores de sustentabilidade, a análise energética é utilizada muitas vezes como apenas um dos indicadores que compõem os resultados finais.

Outras perspectivas têm aparecido, de forma ainda limitada, quando se pretende contabilizar o fluxo de energia e massa de processos. Alguns autores têm sugerido análises empregando conceitos termodinâmicos mais avançados, como a Exergia, baseada na Segunda Lei da Termodinâmica, ou conceitos não convencionais, como é o caso da Emergia, como se verifica em Berthiaume et al. (2000), que discutiram a renovabilidade dos biocombustíveis sob os conceitos exergéticos e emergéticos.

3.2. Aspectos metodológicos da Análise Energética

Até o momento presente não se encontra uma metodologia consolidada de análise energética e que seja utilizada largamente. Por conta disso, comumente são apresentados resultados diferentes para um mesmo produto ou um mesmo processo, em função de como são abordados vários fatores, tais como as fronteiras do sistema, os níveis de regressão dos insumos contabilizados, a mão-de-obra, o transporte, entre outros. Ainda assim a norma ISO 14040, ao sistematizar análises do ciclo de vida, sinaliza alguns aspectos metodológicos que tem auxiliado análises estritamente energéticas.

3.3.1. Pressupostos metodológicos da ACV segundo a norma ISO 14040

A ACV é um procedimento de análise de processos que pode ser usada para evidenciar o consumo de recursos naturais, e particularmente a emissão de poluentes, auxiliando na tomada de decisões para a minimização dos impactos ambientais. Esta análise se baseia na contabilização sistemática das entradas e saídas do processo estudado, a partir das quais os impactos ambientais são qualificados e quantificados, fornecendo uma interpretação comparativa das alternativas analisadas.

Em termos cronológicos, a ACV consiste numa ampliação da análise energética, quando nos anos oitenta foram sugeridos estudos além dos insumos energéticos, como se observa em Boustead e Handcock (1979), incluindo os estágios de uso final e gestão de resíduos na cadeia de processos (Costa, 2007). Atualmente, o conjunto de normas internacionais ISO 14000 apresenta um grupo de normas específicas a fim de padronizar os termos e os critérios para a elaboração e divulgação dos resultados da ACV. Este grupo é composto pelas seguintes normas:

ISO 14040: Estabelece as diretrizes e estrutura para a ACV (criada em 1997).

ISO 14041: Estabelece a definição do escopo e análise do inventário do ciclo de vida (1998).

ISO 14042: Estabelece a avaliação do impacto do ciclo de vida (2000).

ISO 14043: Estabelece a interpretação do ciclo de vida (2000).

ISO 14048: Estabelece o formato da apresentação de dados (2002).

ISO TR 14047: Fornece exemplos para a aplicação da ISO 14042 (2003).

ISO TR 14049: Fornece exemplos para a aplicação da ISO 14041 (2000).

Com a finalidade de facilitar a aplicação, as normas 14040, 14041, 14042 e 14043, foram reunidas em apenas dois documentos (14041 e 14044). De acordo com Costa (2007), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a versão da ISO 14040 com as ISO 14040, 14041 e 14042, segundo as quais definem a ACV como uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, mediante:

- a compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto;
- a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas;
- a interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo.

Entende-se por *sistema de produto* os processos que, segundo o modelo definido para o estudo, compõe o ciclo de vida do produto em questão. Numa caracterização mais detalhada, uma ACV obedeceria as seguintes etapas:

1) *Definição do objetivo e do escopo:*

Nesta etapa apresentam-se as metas e a extensão do estudo pretendido. A definição das fronteiras segue as seguintes categorias: *Fronteiras em relação ao sistema natural* cujos limites indicam onde se inicia e termina o ciclo de vida em relação ao meio natural; *Fronteiras em relação a outros sistemas*, cujos limites abrangem os sistemas de produto associado aos insumos; *Fronteiras geográficas* que definem localidade onde será realizado o estudo; *Fronteira temporal* que considera o momento para o qual os dados levantados terão validade, ou seja, se será estudada uma situação atual, passada ou ainda cenários de futuro, e *Fronteiras de bens de capital* que determina se serão incluídas ou não no estudo as infra-estruturas necessárias para a realização dos processos (edifícios das fábricas, estradas, etc).

Também nesta etapa se define a unidade funcional do estudo, isto é, a unidade de medida da função anteriormente estabelecida, que define a quantificação das funções do sistema, provendo uma referência segundo a qual as quantificações das entradas e saídas do sistema serão normalizadas.

2) *Inventário do Ciclo de Vida*

Nesta etapa contabilizam-se quali-quantitativamente os insumos considerados na análise em função das fronteiras definidas anteriormente. Da mesma forma, estes insumos são dispostos numa mesma base de cálculo a partir da unidade funcional considerada. Deve-se atentar para o método de coleta de dados, procedimentos de alocação, e se necessário se alterar as fronteiras do sistema para garantir uma maior qualidade do estudo.

3) *Análise do impacto ambiental do Ciclo de Vida*

Segundo Costa (2007) esta etapa visa compreender a relevância ambiental de todos os fluxos de entrada e saída. A Avaliação do Impacto refere-se à identificação e avaliação em termos de impactos potenciais ao meio ambiente que podem ser associados aos dados levantados no inventário, a partir da classificação e da quantificação dos mesmos.

4) *Interpretação dos resultados da Análise do Ciclo de Vida*

A interpretação dos resultados de ACV é uma das etapas mais sensíveis, porque as hipóteses estabelecidas durante as fases anteriores, assim como as adaptações que ocorreriam em função de ajustes necessários, podem afetar o resultado final do estudo. A interpretação descreve uma serie de averiguações necessárias às conclusões do estudo.

Muito embora, como observado, a norma ISO 14040 tenha procurado padronizar análises de processos e produtos, e tenha fornecido um referencial metodológico para análises

energéticas, ainda subsistem certos parâmetros que justificam a divergência entre estudos acerca de um mesmo sistema produto. Um estudo realizado pela ECOBILAN (2006) versa sobre os parâmetros responsáveis pelas divergências entre os balanços energéticos e emissões de gases estufa em sistema de produção de biocombustíveis. Este estudo comparou três grandes análises feitas por consultorias européias, e observou que a definição das fronteiras do sistema, os critérios usados para a alocação e a formulação dos indicadores finais foram os principais parâmetros que justificaram as diferenças verificadas. Estes parâmetros serão abordados nos tópicos seguintes.

3.2.2. Fronteiras do sistema analisado

A definição das fronteiras do sistema analisado é de fundamental importância para a análise energética, sendo realizada a partir de duas perspectivas: as fronteiras físicas do sistema produtivo e os níveis de regressão dos fluxos energéticos considerados.

As fronteiras físicas do sistema referem-se às etapas do ciclo de vida do produto, com seus processos característicos, que serão consideradas no estudo. Várias denominações são atribuídas às variações das fronteiras consideradas. A análise “do berço ao túmulo” (*Cradle to Grave*) abrange todo o ciclo de vida do produto, ou seja, desde a etapa de obtenção das matérias-primas usadas no processamento, até a disposição dos resíduos gerados pelo uso final. A análise “do berço ao portão” (*Cradle to Gate*) considera apenas a etapa de obtenção da matéria-prima até o processamento do produto desejado, neste caso, a análise de biocombustíveis ficaria restrita apenas à etapa agrícola e à etapa industrial, por exemplo. Já a “análise portão-portão” (*Gate to Gate*), usada quando se pretende estudar processos mais específicos, considera apenas uma etapa no ciclo de vida. A Figura 3.1 seguinte apresenta claramente os limites das fronteiras consideradas numa análise energética.

Conforme observa CEPA (2009), particularmente no estudo do ciclo de vida de combustíveis são utilizadas outras denominações, mas que seguem a mesma lógica da figura seguinte. Nestes termos, a análise WTT (*Well-To-Tank*) abrange o ciclo de vida do combustível entre a produção da matéria-prima e a disponibilização do produto final para o consumidor. Alguns autores usam esta análise até a obtenção do produto final, sem considerar a etapa de distribuição, ou seja, WTG (*Well-To-Gate*). A análise TTW (*Tank-to-Wheel*) estuda apenas uso do combustível no automóvel. Estas duas análises juntas configuram a então análise WTW (*Well-To-Wheel*) que abrange todas as etapas do ciclo de vida de um combustível, desde sua produção até seu uso final, isto é, “do berço ao túmulo”.

A maioria das análises da produção de biocombustíveis é do tipo “berço ao portão”, ou WTT, contabilizando apenas a energia consumida no cultivo da biomassa e no seu processamento, e talvez distribuição do combustível. Porém podem-se encontrar estudos que são limitados apenas em uma destas fases por conta do enfoque do trabalho. De qualquer forma, a delimitação clara da fronteira do sistema é de considerável importância, sendo

imediatamente perceber que análises de um mesmo produto considerando fronteiras diferentes possivelmente resultarão em indicadores diferentes.

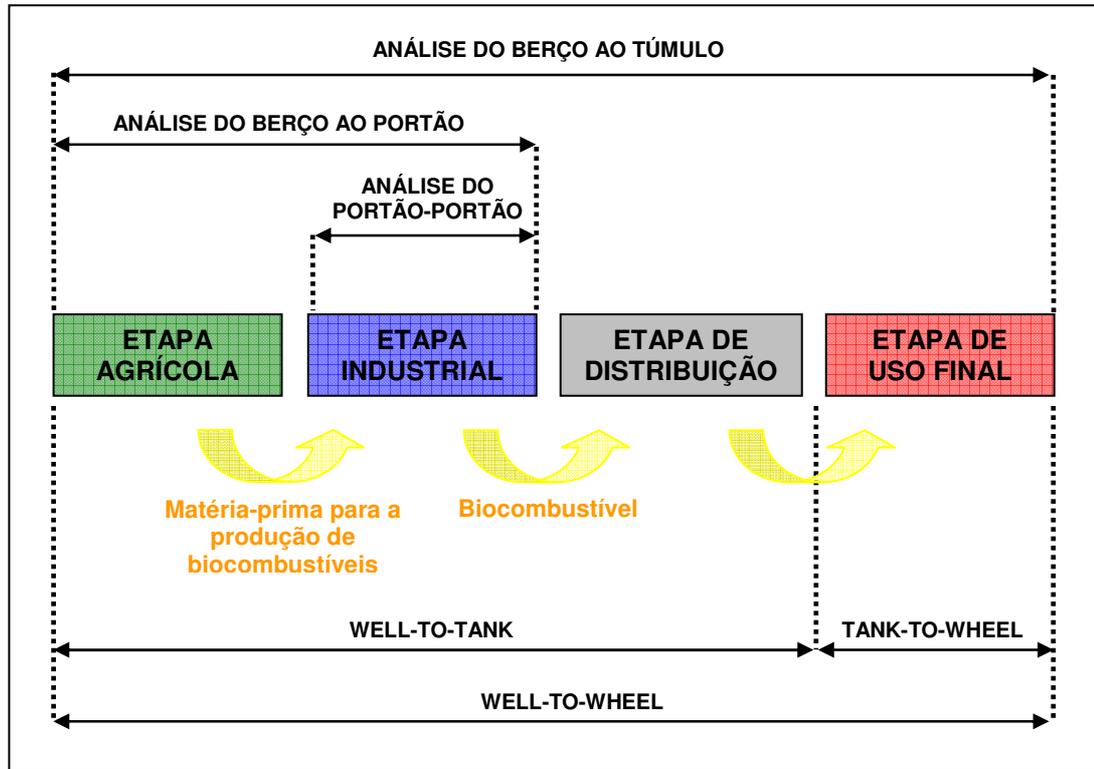


Figura 3.1: Fronteiras de um sistema de produção de biocombustíveis

Os níveis de regressão da análise referem-se à extensão dos fluxos energéticos contabilizados dentro das fronteiras físicas do sistema. Em síntese, podem ser definidos os níveis de regressão a seguir, esquematicamente representados na Figura 3.2. Nos primeiros estudos de fluxos energéticos contabilizavam-se apenas os insumos diretos requeridos, isto é, eletricidade e calor. No entanto, a crescente preocupação com os impactos causados pelo uso da energia, a tentativa de localizar e minimizar as perdas ao longo do processo, e a busca insistente de alternativas aos combustíveis fósseis estendeu a análise energética para a contabilização de requerimentos energéticos indiretos, isto é, na energia embutida nos insumos químicos e equipamentos.

- **Nível 1:** São considerados apenas os insumos de energia direta, aplicados ao processo, geralmente em termos de eletricidade e vapor.
- **Nível 2:** Em adição ao nível 1, é considerado o aporte energético referente aos insumos indiretos. Num sistema de produção de biocombustíveis, contabiliza-se neste nível, a energia embutida nos fertilizantes e defensivos, consumo de diesel, e combustíveis usados nas caldeiras que produzem o vapor usado no processo, por exemplo.
- **Nível 3:** Inclui-se a energia usada na produção de equipamentos de processo.

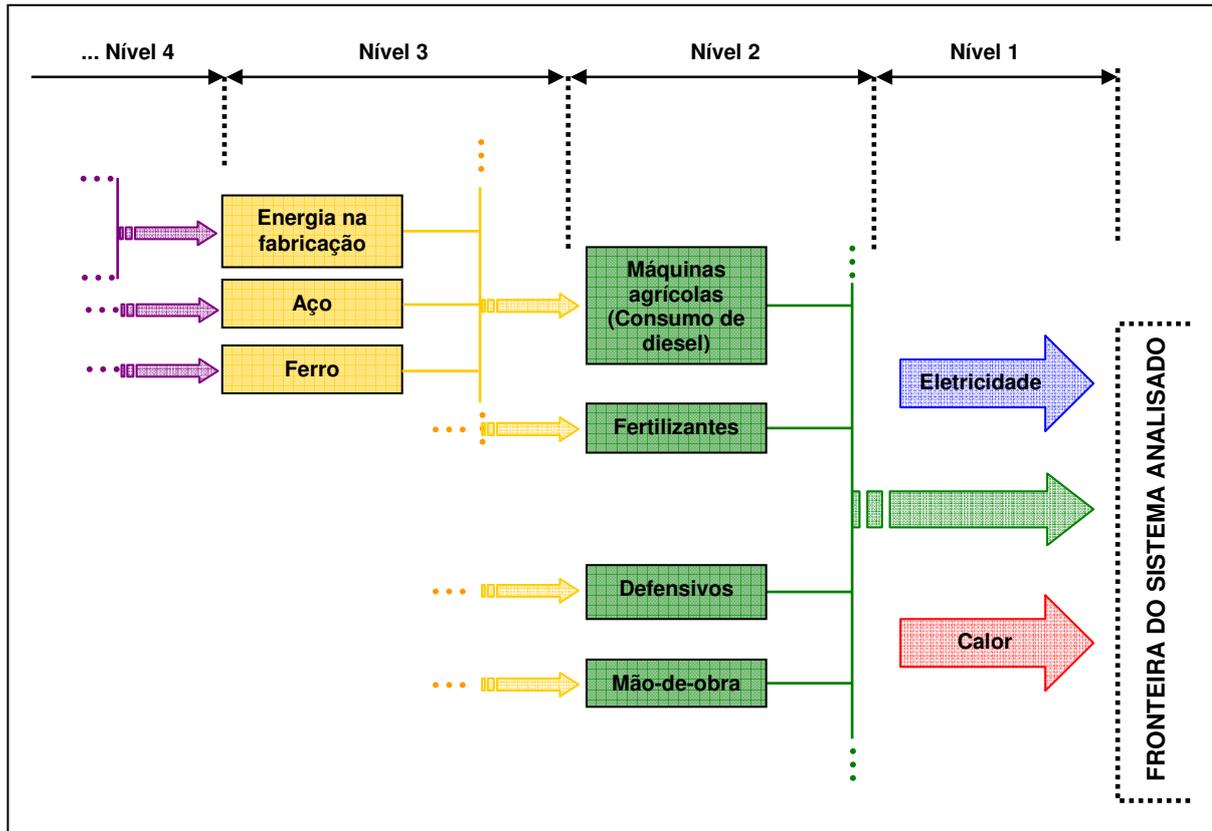


Figura 3.2: Níveis de regressão num sistema de produção de biocombustíveis

Segundo Wilting (1996), a consideração apenas dos requerimentos diretos no processo pode resultar em valores distantes da realidade, pois não aloca requerimentos energéticos importantes como transporte e os insumos gastos na produção da matéria-prima utilizada. No entanto, geralmente numa análise energética não se passa do terceiro nível de regressão, uma vez que a contribuição dos níveis mais elevados vai se tornando insignificante. Os documentos publicados pela IFIAS (1975) apud Baird et al (1997), por conta das conferências organizadas na década de setenta a fim de homogeneizar as análises energéticas, estimaram a contribuição energética dos quatro primeiros níveis de regressão (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Contribuição energética dos níveis de regressão (Adaptado de IFIAS, 1975 apud Baird et al., 1997)

Nível	Contribuição energética nas análises	Definição
Nível 1	Tipicamente menor que 50%	Somente a energia direta envolvida no processo
Nível 2	Geralmente em torno de 40%	Energia envolvida na obtenção dos insumos energéticos diretos
Nível 3	Raramente excede 10%	Energia requerida para produzir os equipamentos
Nível 4	Geralmente muito baixa	Energia requerida para produzir as máquinas que produzem os equipamentos

Davis et al. (2008), com a comparação de vários ACV's de biocombustíveis, concluíram que a definição das fronteiras do sistema analisado e os níveis de regressão são as principais causas de variações dos resultados para um mesmo produto. Segundo os autores pode-se verificar variações da energia líquida contabilizada (NEV)⁶ acima de 90% para o etanol do milho e discrepâncias de até 75% das emissões causadas pelo uso de fertilizantes no cultivo de capim elefante.

3.2.2. Contabilização de Insumos na Análise Energética

Os insumos considerados na análise energética correspondem aos níveis de regressão e às fronteiras do sistema analisado: se a análise energética de um biocombustível abrange a fase agrícola, os fertilizantes são importantes insumos a serem considerados, junto aos reagentes químicos na fase industrial.

Dois parâmetros são fundamentais quando se pretende incluir tais insumos num estudo desta natureza: a quantidade utilizada de insumo e a energia embutida nele. O termo *embodied energy* (energia embutida), como explicitado acima, refere-se ao montante de energia consumida para se obter aquele determinado insumo, sendo também denominado de Coeficiente Energético. Este valor é geralmente retirado de estudos específicos referentes ao ciclo de vida do insumo. A multiplicação destes dois parâmetros permite calcular a contribuição energética do insumo para a respectiva análise.

A Tabela 3.2 seguinte apresenta quatro análises energéticas referentes à produção de biocombustíveis, bem como os coeficientes energéticos considerados para os insumos contabilizados. A disparidade existente entre os coeficientes energéticos de um mesmo insumo é justificada pelo mesmo fato destes coeficientes resultarem de estudos distintos, e terem sido realizados em condições específicas. Conforme observam Cherubini et al. (2009), esta disparidade também responde pelas diferenças existentes entre análises energéticas de um mesmo produto, principalmente quando certos insumos são responsáveis por grande contribuição energética. Em Yànez (2008) verifica-se que os fertilizantes podem consistir em até 29% do total de energia requerida para se produzir um kg de biodiesel de palma, ou 22% da energia fóssil utilizada no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar, segundo Seabra (2008).

Além da variação entre os coeficientes adotados justificarem divergências entre estudos com objetivos semelhantes, salienta-se a preocupação dos resultados refletirem com precisão a realidade estudada. Como se observa na tabela acima, a maioria dos estudos atuais baseia-se em coeficientes estimados há vários anos sob realidades distintas do Brasil. Pode-se pressupor que muitos dos resultados até hoje apresentados, especialmente em análises energéticas de biocombustíveis, tenham razoáveis mudanças ao se considerarem coeficientes atuais e

6) NEV = *Net Energy Value* (Valor de Energia Líquida). Representa a razão entre a energia produzida por um biocombustível e a energia gasta para produzi-lo.

processos típicos e convencionais no país. A diferença existente entre os coeficientes energéticos de edificações (prédios, escritórios e oficinas) tabelados por Pimentel (1980) referente à realidade americana, e os resultados encontrados por Tavares (2006) apud Seabra (2008) para a realidade brasileira ilustra esta constatação.

Tabela 3.2: Coeficientes energéticos dos insumos considerados em algumas análises energéticas

Autores	Yanèz (2008)	Seabra (2008)	Pimentel e Patzek (2005)	Sheehan et al. (1998)
Nitrogênio (N)	48,9 ^a	56,3 ^c	66,5 ^f	66,80 ⁱ
Fósforo (P ₂ O ₅)	17,4 ^a	7,5 ^c	17,4 ^g	12,8 ⁱ
Potássio (K ₂ O)	10,4 ^a	7,0 ^d	13,6 ^g	4,6 ⁱ
Cal	2,3 ^a	0,1 ^d	1,2 ^h	-
Herbicidas	245,6 ^b	355,6 ^d	418,0 ^g	263,7 ⁱ
Inseticidas	184,7 ^b	358,0 ^d	418,0 ^g	
Prédios	7117,6 ^b	1800,0 ^e	-	-
Escritórios	18840,6 ^b	2400,0 ^e	-	-
Oficinas	7117,6 ^b	1200,0 ^e	-	-

Os insumos agrícolas estão expressos em MJ/kg. Os insumos referentes às construções civis estão expressos em MJ/m². **a)** Patyk et al. (2003) apud Yanèz (2008); Patik et al. (1997) apud Yanèz (2008). **b)** Pimentel (1980), em MJ/m² para prédios, escritórios e oficinas. **c)** IPT (1985) apud Seabra (2008). **d)** EBAMM (2005) apud Seabra (2008); GREET (2006) apud Seabra (2008). **e)** Tavares (2006) apud Seabra (2008), em MJ/m². **f)** Patzek (2004) apud Pimentel e Patzek (2005). **g)** Pimentel e Patzek (2005). **h)** Pimentel e Pimentel (1996) apud Pimentel e Patzek (2005). **i)** Sheehan et al. (1998).

No entanto observam-se alguns ajustes metodológicos em certos estudos que buscam refletir as condições do local onde está sendo conduzida a análise. Para estimar o consumo de energia fóssil no ciclo de vida do biodiesel de soja, Mourad (2008) multiplicou a quantidade de eletricidade requerida na produção de biodiesel de soja por um fator de 17%, que corresponderia ao percentual de geração de eletricidade no Brasil de fontes térmicas. Seabra (2008) preferiu não considerar a eletricidade na análise energética pela baixa contribuição deste insumo e por ser obtida majoritariamente de fonte renovável. Por sua vez, Pimentel e Patzek (2005) atribuíram à eletricidade um consumo de energia fóssil equivalente a 10,3 MJ/kWh, e Karimi et al. (2008), constatando que a eletricidade para irrigação responde por 43% da energia requerida para produzir etanol de cana-de-açúcar no Irã, associaram a ela um custo energético de 12,7 MJ/kWh de energia fóssil.

Existem ainda certos insumos, que aparentemente forneceriam uma contribuição diferencial na interpretação dos dados, e que tipicamente não são considerados, seja pela

dificuldade em fazê-lo, ou por conta de pressupostos metodológicos convencionais. Entre estes insumos encontram-se a *radiação solar* e a *mão-de-obra*.

3.2.3. Contabilização da Radiação Solar

A radiação solar corresponde ao fluxo energético fundamental na produção de biocombustíveis, pois sem ela não haveria fotossíntese e acúmulo de energia nos vegetais. O aporte deste insumo geralmente não é considerado, pois estaria embutido indiretamente nos valores de produtividade do vegetal. Porém a baixa incidência de luz solar, por conta da localização do sistema produtivo analisado, pode justificar a necessidade do aporte massivo de fertilizantes ou a adoção de técnicas alternativas para manter a produtividade, o que poderia resultar no maior consumo de energia fóssil, diminuindo a renovabilidade do produto. A Tabela 3.3 seguinte compara os resultados obtidos por Pimentel e Patzek (2007) quando foi analisada a produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil e nos Estados Unidos.

Tabela 3.3: Parâmetros energéticos para na produção de cana-de-açúcar (Adaptado de Pimentel e Patzek, 2007)

Localização do sistema	Produtividade [ton/ha]	Fertilizantes [kg/ha]	Radiação Solar Incidente ^a [MJ/m ² .dia ⁻¹]	Energia Total requerida ^b [GJ/ha]	Balanco energético ^c
Brasil	77,0	157,3	5,3	16,5	5,78
Estados Unidos	88,0	499,0	4,0	56,2	4,32

a) Dados retirados da planilha SWERA. <http://swera.unep.net/>. b) Energia contabilizada apenas na etapa agrícola. c) Razão entre a quantidade de energia obtida [kJ] do combustível e energia fóssil gasta [kJ] para produzi-lo.

A partir dela pode-se supor que o uso de três vezes mais fertilizantes nos Estados Unidos também ajuda a manter os valores de produtividade maiores do que verificado no Brasil, uma vez que a radiação solar incidente média nos Estados Unidos não favorece este fato, o que implicaria num maior aporte de energia fóssil na etapa agrícola. Estas observações são discutíveis, muito embora, poderia ressaltar a idéia de que apenas alguns países são vocacionados a produzirem biocombustíveis de maneira sustentável.

3.2.4. Contabilização da Mão-de-obra

Por sua vez, a contabilização do input energético associado à mão-de-obra sempre foi um tema controverso na análise energética. Segundo Wilting (1996), além da dificuldade de contabilizá-la, muitos pesquisadores não consideram sua contribuição por resultar em baixos valores frente a outros insumos, ou ainda pelo fato da análise energética se dispor a apenas contabilizar o gasto energético para a produção de insumos usados no processo, e não o consumo secundário de outros produtos, isto é, um trabalhador contribui energeticamente para o processo, mas também gasta energia em outras atividades como passear, viajar e estudar, o

que provocaria dificuldades metodológicas. De acordo com Cleveland (2008), o gasto energético com a mão-de-obra pode ser composto por três parâmetros:

- a) O valor calórico do alimento consumido pelos trabalhadores;
- b) A energia direta e indireta requerida para produzir o alimento consumido pelos trabalhadores;
- c) A energia consumida devido outras finalidades como viagem, estudo.

A energia, estritamente associada ao exercício da respectiva atividade laboral, é denominada energia biológica e pode ser medida por um respirômetro a partir da taxa de oxigênio consumida e calorias queimadas. A medição do gasto energético com esta técnica pode ser de difícil aplicabilidade, pois as funções dos trabalhadores na empresa podem mudar ao longo do tempo e a maneira que são exercidas. Desta forma, numa análise mais rigorosa, pode-se estimar a energia embutida no alimento consumido pelo trabalhador, e a energia demandada pelo trabalhador em outros níveis como o consumo de eletricidade de sua casa, o combustível gasto no transporte até a fábrica, a energia embutida em suas roupas, automóveis, casas e cursos profissionalizantes. Neste caso, porém, discute-se se considerar o gasto energético que não está associada diretamente à atividade laboral, causaria um viés superestimando indicadores. Facilmente pode-se perceber que as discussões centram-se em qual porção da energia total usada pelo trabalhador deveria ser incluída como custo energético no ciclo de vida daquele determinado produto. Observa-se que neste contexto a maioria das decisões ainda são arbitrárias e geram divergências entre estudos.

A partir de Nogueira (1985), que estimou um input energético de 7,87 MJ/t_{cana} associado à mão-de-obra, Pimentel e Patzek (2007) publicaram contribuições da mão-de-obra no input de energia fóssil de 4% e 12% respectivamente na produção de cana-de-açúcar no Brasil e nos Estados Unidos. Os mesmo autores publicaram em 2005 análises energéticas de quatro matérias-primas usados na produção de etanol e biodiesel, nos quais foi contabilizado o aporte energético associado à mão-de-obra (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Contribuição energética da mão-de-obra no cultivo de algumas matérias-primas usadas para a produção de biocombustível (Adaptado de Pimentel e Patzek, 2005)

Matéria-Prima	Tempo de trabalho [h / ha]	Input Energético da Mão-de-obra [GJ /ha]	Input Energético Total da fase agrícola [GJ / ha]	Contribuição percentual
Milho	11,4	1,90	34,0	5,7%
Capim-Elefante	5,0	0,84	11,5	0,7%
Soja	7,1	1,19	15,7	7,6%
Girassol	8,6	1,44	25,6	5,6%

Neste estudo os autores assumiram que uma pessoa trabalha 2000 horas por ano com um consumo equivalente de 8000 litros de petróleo por ano, muito embora os resultados encontrados ainda sinalizem que a contribuição energética da mão-de-obra geralmente não ultrapassa 10% do input total de energia fóssil. Já Macedo et al. (2004) não contabilizou a mão-de-obra justificando que os valores atuais respondem por uma contribuição insignificante devido a mecanização do setor agrícola na produção de cana-de-açúcar. Por sua vez, ao efetuar o balanço energético do cultivo do algodão em sistemas familiares, Romero et al. (2007) utilizaram a metodologia proposta por Carvalho et al. (1974) e as adaptações necessárias propostas por Bueno (2002) a fim de detalhar o aporte energético referente a mão-de-obra. Foram levantadas características quanto ao gênero, massa, altura e idade de cada agricultor, relacionado-os a cada operação por eles desenvolvida. Com estes dados determinou-se o Gasto Energético no Repouso (GENR) de cada agricultor. Mesmo com este preciosismo metodológico, a mão-de-obra contribuiu apenas com 0,7% da energia gasta no cultivo. Alguns defendem que a contabilização da mão-de-obra seria mais adequada a estudos que tivessem enfoques sociais, embora a intensa mecanização do setor agrícola também poderia ser interpretada como responsável por uma maior dependência da energia fóssil, com maiores emissões de gases de efeito estufa.

3.2.5. Alocação dos gastos energéticos nos produtos obtidos

Quando se obtém mais de um produto do sistema analisado, torna-se interessante saber qual foi a exigência energética ou a emissão de poluentes específica associada apenas a um determinado produto. Por exemplo, no processamento de óleos para a obtenção de biodiesel, além do biodiesel obtém-se conseqüentemente a glicerina, porém quando se pretende determinar o aporte energético para se obter exclusivamente o biodiesel é sugerida a alocação da energia total consumida no sistema entre os diferentes produtos, a partir de relações que os associam entre si por meio de critérios de partição ou de alocação, o que pode influenciar consideravelmente os resultados finais, segundo Bernesson et al. (2004), Cherubini et al. (2009) e Winrock (2009). Os métodos para a alocação são apresentados a seguir, de acordo com Nogueira (1985) e Cleveland (2008), e ilustrados na Figura 3.3.

1. Atribuir toda a exigência energética ao produto de interesse, e dar aos subprodutos uma exigência energética nula;
2. Distribuir as exigências energéticas em função do valor monetário de cada bem produzido;
3. Distribuir as exigências energéticas em função de alguma propriedade física, isto é: volume, massa, poder calorífico.
4. Alocar uma exigência energética substituta aos subprodutos, ou seja, a exigência energética que uma rota convencional demandaria para obter o subproduto.

O primeiro critério de partição é o mais simplista, porém pode camuflar inúmeras possibilidades de sinalizar o aproveitamento dos subprodutos gerados no processo, isto é,

quando se utiliza este critério numa análise energética da produção do etanol, assume-se que todo o aporte de energia na etapa agrícola e industrial foi utilizado para a produção exclusiva de etanol, a partir disso, considera-se que não houve gasto energético na produção do bagaço, da vinhaça e do açúcar, produtos geralmente gerados no processo.

A aplicação do segundo critério é relativamente fácil, porém dá margem a dúvidas conceituais. Sabe-se que a variação dos preços dos produtos no mercado, neste caso, causaria a variação das exigências energéticas, o que não faria sentido. Da mesma forma, como observa Kodera (2007), a variação das exigências energéticas devido às variações do preço não altera o efeito dos impactos ambientais associado a geração de co-produtos, como a emissão de gases poluentes. Muito embora os estudos que usam este critério na alocação procuram usar valores médios verificados em intervalos de tempo: Kim e Dale (2002) usaram a média dos valores de mercado do etanol de milho e seus co-produtos contabilizados em dez anos, Baral (2006) usou os valores médios anuais da venda por atacado do etanol de milho.

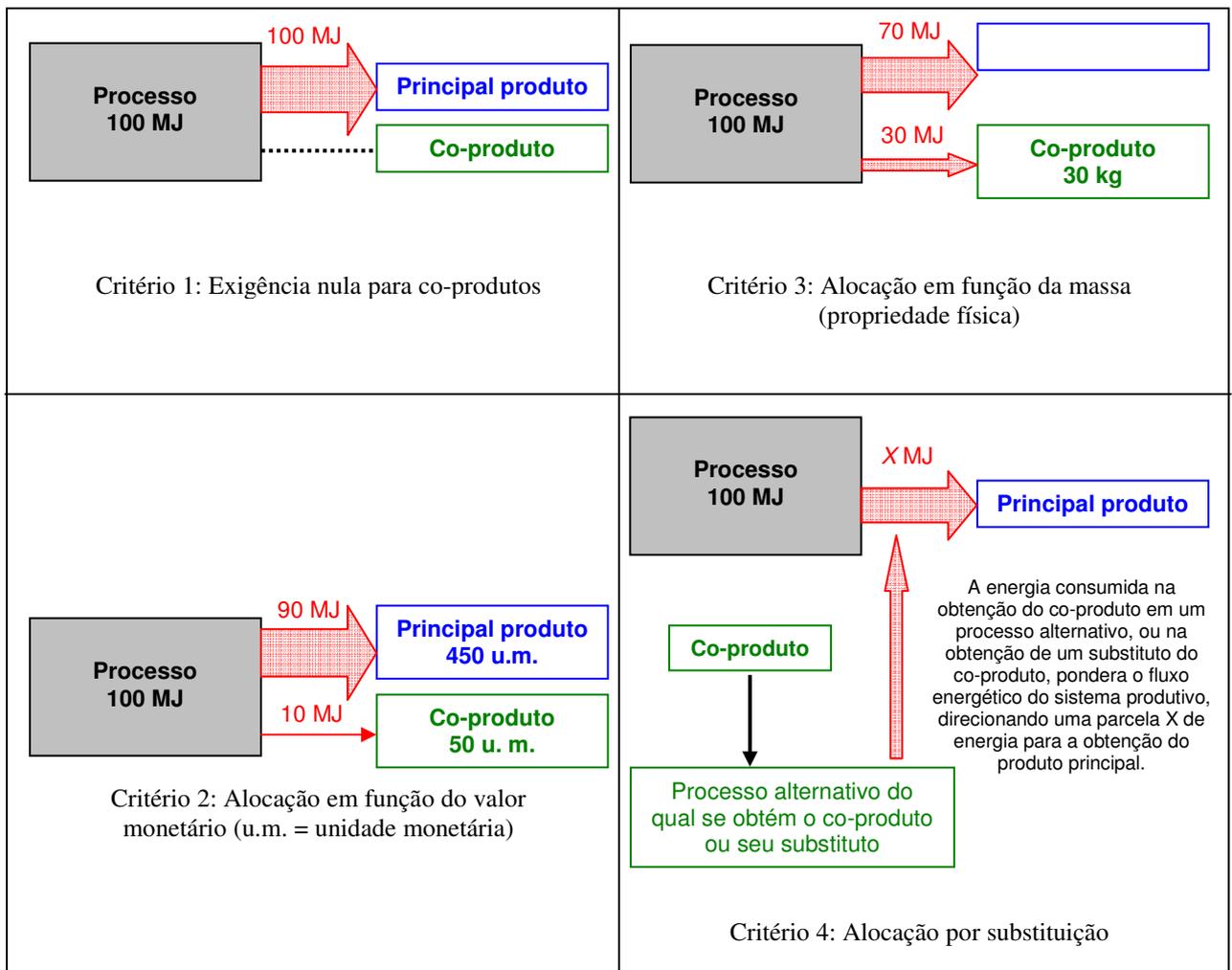


Figura 3.3: Critérios de alocação em sistemas produtivos com múltiplos produtos

De acordo com Wilting (1996), muito embora a IFIAS tenha sugerido a alocação pelo terceiro critério este critério, é pouco razoável usar uma base comparativa idêntica para produtos com finalidade, estado físico e densidades diferentes, o que poderia levar a resultados sem lógica, quando as exigências energéticas de um subproduto chegam a ser menor que seu poder calorífico, segundo Cleveland (2008). Certos estudos preferiram realizar a alocação baseada no poder calorífico dos produtos, porém Kodera (2007) já sinaliza que esta preferência seria coerente somente se todos os produtos fossem queimados como combustível. Ressalta-se que a alocação baseada em propriedades físicas, como a massa, não pode ser aplicada em análises energéticas de fluxos puros de energia como uma planta de cogeração.

Por fim o quarto critério, embora mais sofisticado, é recomendado pela norma ISO 14041 (1998), antes de outros métodos. Este critério, denominado como “Expansão do Sistema” ou “Substituição”, é aplicado da seguinte maneira: sabe-se que na produção de etanol obtém-se o bagaço, e na produção de biodiesel, a glicerina. Se o bagaço fosse destinado para a obtenção de celulose, seu valor energético seria equivalente à energia consumida para produzir celulose a partir de um processo alternativo. Já a glicerina, poderia ser valorada energeticamente a partir da energia consumida em processos convencionais para a sua obtenção. Desta forma, o valor energético dos co-produtos, estimado a partir deste método, ponderaria o fluxo de energia no sistema. Este método fornece à análise uma visão mais clara dos afeitos ao se exportarem os co-produtos para outro processo. Para Nogueira (1985), ao se atribuir uma exigência energética substituta, consegue-se uma base comum e aceitável de comparação. No entanto, Kodera (2007) salienta que na aplicação deste critério os dados referentes à substituição devem ser precisos, isto é, deve-se conhecer o processo alternativo a fim de determinar a exigência energética da matéria-prima que será substituída. Isso pode ser complicado e provocar um maior tempo de análise.

Todos os critérios de alocação possuem vantagens e desvantagens, muito embora se perceba que as preferências de certos autores são justificadas pela facilidade de aplicação ou pelos objetivos do trabalho. Nesta perspectiva, Kim e Dale (2002) e Malca (2004) apud Kodera (2007) apresentaram análises de sensibilidade para cada um dos métodos de alocação selecionados (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Sensibilidade dos métodos de alocação em diferentes sistemas produtivos
(Adaptado de Kim e Dale, 2002 e Malca, 2004 apud Kodera, 2007)

Matéria-Prima	Substituição	Massa	Conteúdo Energético	Valor econômico
Milho (<i>dry</i>)	80,0%	49,0%	61,0%	76,0%
Milho (<i>wet</i>)	80,0%	48,0%	57,0%	70,0%
Trigo	85,6%	37,0%	54,2%	44,8%
Beterraba	48,0%	42,1%	47,5%	44,0%

Pode-se observar que a sensibilidade dos critérios selecionados varia para cada matéria-prima por conta das divergências entre os estudos até aqui discutidas, como também devido ao perfil de cada cultura e de cada processo. Entretanto, o critério de substituição se apresenta como o mais sensível em todos os casos, diferentemente da massa, possivelmente pelo fato de que a substituição do co-produto gerado em rotas convencionais permite a consideração de variadas alternativas com características específicas.

Lopes (2006) ao estudar a viabilidade da produção de biodiesel a partir do sebo bovino, computou as exigências energéticas para se obter exclusivamente o biodiesel a partir da massa total gerada na reação, ou seja, de glicerina e biodiesel⁷. Percebe-se da Tabela 3.6 a variação do balanço energético⁸ quando se considerou a partição com base no primeiro critério (*sem alocação de massa*) e no segundo critério (*com alocação de massa para biodiesel*). Neste estudo, quando toda a exigência energética está associada à produção de biodiesel apenas, o valor resultante do balanço tende a ser menor, pois não se considera que a obtenção da glicerina tenha consumido energia; diferentemente quando se associa, por algum critério, apenas uma parcela da energia total requerida à massa de biodiesel gerada.

Tabela 3.6: Balanço energético da obtenção de biodiesel a partir do sebo bovino em função de diferentes rendimentos reacionais (Adaptado de Lopes, 2006)

Rendimento Reacional	O/I <i>sem alocação de massa para biodiesel</i>	O/I <i>com alocação de massa para biodiesel</i>
85%	5,70	7,13
90%	6,01	7,19
95%	6,32	7,24

Menichetti e Otto (2009) apresentaram um estudo onde foi avaliada a influência do critério de alocação nos resultados de balanço energético da produção de etanol de trigo. Na Tabela 3.7 é perceptível esta influência, quando a adoção de métodos de partição pode resultar em diferenças de até sete vezes entre os valores. Geralmente quanto menos exigência energética é associada ao etanol, seu balanço energético tende a ser maior.

Conseqüentemente, a escolha de como alocar os co-produtos também influencia consideravelmente o balanço de emissões de gases de efeito estufa. Winrock (2009) reconhece que o tratamento dos co-produtos na análise é a principal decisão metodológica em estudos desta natureza e apresenta as possíveis variações em estudos da mesma matéria-prima que alocam os co-produtos de diferentes maneiras.

7) Massa do biodiesel = 75,51% do total; Massa da glicerina = 13,32% do total; Massa residual = 11,17% do total.

8) Razão entre energia do combustível (medida pelo seu poder calorífico) e energia de combustível fóssil requerida no processo.

Tabela 3.7: Balanço energético da obtenção de etanol a partir do trigo em função de diferentes critérios de alocação (Adaptado de Gnansounou and Dauriat, 2005 apud Menichetti e Otto, 2009)

Método de Alocação	Alocação [%]		Balanço Energético
	<i>Etanol</i>	<i>Resíduo da fermentação</i>	[MJ _{comb.} /MJ _{consumido na produção}]
Sem alocação	100	0	0,70
Valor econômico	95	5	1,80
Extensão do sistema	81	19	1,21
Conteúdo energético	61	39	1,54
Massa	12	88	5,01

3.3. Indicadores resultantes da Análise Energética

Como toda análise, os dados computados na análise energética geralmente são resumidos em indicadores. Pode-se observar na Tabela 3.8 abaixo como o cálculo destes indicadores, no caso, denominados de balanço *Output/Input*, faz a comparação entre as matérias-primas ficar mais clara. Porém, além do que foi discutido até aqui, a maneira como estes indicadores são formulados, isto é, quais foram as parcelas consideradas no seu cálculo, pode inviabilizar a comparação direta dos sistemas produtivos.

Tabela 3.8: Balanço energético do ciclo de vida de vários biocombustíveis (Adaptado de IEA, 2004)

	Matéria-prima	Balanço energético (Output/Input)	Fonte
Etanol	Trigo	0,90	Levington, 2000
		1,03	Comissão Eur., 1999
	Milho	0,67	Levelton, 2000
		1,30	Pimentel, 1991
	Cana-de-açúcar	8,3 – 10,2	Macedo et al., 2003
	Beterraba	0,65	GM et al, 2002
	Gramma	1,37	Wang, 2001
Biodiesel	Soja	1,42	Embrapa, 2005
	Palmáceas (Macaúba)	4,2	Embrapa 2005
	Palmáceas (Dendê)	5,6	Embrapa 2005
	Colza	0,40	Levington, 2000
		0,82	ETSU, 1996
	Diesel (Eucalipto) Pirólise	3,31	Novem, 1999
	Diesel (Eucalipto) Gaseificação	1,48	Novem, 1999

De acordo com EUCOBILAN (2006), vários indicadores podem ser definidos a fim de medir o desempenho energético do sistema analisado. Sendo variada, a formulação dos indicadores depende do enfoque do estudo. Conforme Wilting (1996), as conferências organizadas pela IFIAS na década de setenta, definiram importantes indicadores cujos conceitos são ainda utilizados, embora com outras denominações e formulações específicas. Um dos indicadores definidos foi denominado de GER (*Gross Energy Requirement*) que expressa a quantidade de energia requerida pelo processo para se obter uma unidade física de algum bem ou serviço, sendo estimada em termos de “MJ/kg de aço”, ou “MJ/kg de cimento”, por exemplo. Atualmente este indicador é também conhecido como Energia Embutida (*Embodied Energy*), como foi apresentado na Tabela 3.2 acima, e usado largamente em análises energéticas permitindo contabilizar o aporte energético dos insumos no sistema, como fertilizantes ou mão-de-obra, a partir da massa demandada o processo.

Ao se estimar a quantidade de energia necessária para produzir uma unidade monetária, em função da obtenção de um determinado produto, a IFIAS já utilizava o termo *Intensidade Energética* para expressar tal relação, embora alguns autores, como Romanelli (2007) apresentem esta denominação relacionando a quantidade de energia consumida para produzir uma unidade de produto, assemelhando-se ao GER descrito acima.

Outro indicador apresentado pela IFIAS foi o ERE (*Energy Requirement for Energy*), definido como a razão entre o montante de energia primária requerida para entregar uma unidade de energia secundária (Eq. 2). Embora esta denominação não seja muito usada, a idéia de contabilizar o fluxo energético nos termos da energia que entra no sistema e a energia que sai, gerando um número adimensional, é extensamente utilizada, pois fornece uma boa base de comparação entre alternativas e interpretação.

$$ERE = \frac{\sum E_{primária}}{1E_{secundária}} \quad (\text{Eq.2})$$

Outros indicadores como EROI (*Energy Return On Investment*) e o BE (*Balço Energético*) foram definidos no fim da década de setenta por pesquisadores como David Pimentel, Charles Hall e Cutler Cleveland, ao se disporem estudar a sustentabilidade de sistemas agrícolas (Romanelli, 2007). O EROI associava a energia entregue pelo processo e a energia requerida pelo mesmo (Eq. 3), e o BE apresentava a contabilização líquida da energia no sistema, subtraindo a energia de entrada pela energia de saída, o que também é conhecido como Valor Líquido de Energia (*NEV - Net Energy Value*) (Eq. 4). Alguns autores usam para o BE a mesma formulação usada inicialmente pelo EROI, denominando-o muitas vezes como Balço *Output/Input* ou Relação de Energia (Eq. 5).

$$EROI = \frac{E_{entregue}}{E_{solicitada}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$BE = E_{entrada} - E_{saída} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$RE = \frac{\sum E_{output}}{\sum E_{input}} \quad (\text{Eq. 5})$$

A partir da Eq. 5 é possível construir várias formulações com denominações distintas, caracterizadas unicamente pelas parcelas de energia que são consideradas no input e no output do sistema analisado. Mourad (2008), por exemplo, calculou o balanço Output/Input da obtenção de biodiesel a partir da soja considerando na parcela de output ora apenas o combustível obtido, ora os co-produtos gerados. No mesmo estudo, também foi utilizado o Fator de Renovabilidade (FR), definido pela Eq. 5, que considera na parcela de input apenas a energia fóssil demandada pelo sistema produtivo. Os resultados são apresentados na Tabela 3.9 seguintes. Verifica-se facilmente como os resultados variam em função do indicador utilizado.

$$FR = \frac{E_{output}}{E_{fossil}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Tabela 3.9: Balanço energético da cadeia do biodiesel (Adaptado de Mourad, 2008)

Parâmetros	Output/Input	FR
Contribuição energética apenas do biodiesel	0,58	0,70
Contribuição energética dos co-produtos	1,70	2,23

Outros autores usaram a Eq. 4 na íntegra, considerando no balanço energético a contabilização de todos os inputs, expressos em energia fóssil ou não, e de todos os outputs, isto é, considerando o valor energético do combustível gerado e os co-produtos (Tabela 3.10). Neste caso a diferença entre os valores para um mesmo produto é justificada pelas considerações feitas em relação aos outros parâmetros como fronteiras do sistema, níveis de regressão, coeficientes energéticos dos insumos e outros.

Tabela 3.10: Balanço energético da obtenção de biocombustíveis

Matéria-prima/ Biocombustível	Nogueira (1985)	Farrell et al. (2006)	Gazzoni et al. (2006)	Yanèz (2008)	CCAP (2008)	Seabra (2008)
Palma / Biodiesel				5,3 – 5,9	3,5	
Girassol / Biodiesel			2,69			
Soja / Biodiesel			4,75		3,0	
Sebo bovino / Biodiesel					6,3	
Cana-de-açúcar / Etanol	8,8 – 12,3					8,3 – 12,7
Milho / Etanol		1,20				

3.4. Métodos de análise energética

Até o presente momento neste trabalho afirmou-se várias vezes a inexistência de uma metodologia consolidada de análise energética que fosse usada largamente. Muito embora pode-se agrupar as análises realizadas em função de como são inventariados e dispostos os dados considerados. Nesta perspectiva tem-se a Análise de Processos e a Análise Input-Output.

A *Análise de Processos* foi desenvolvida por técnicos e engenheiros, este método consiste na contabilização sistemática e detalhada dos insumos energéticos diretos e indiretos ao longo do ciclo de vida do produto analisado, porém está sujeito a certos fatores que, se não bem gerenciados, poderão resultar em erros consideráveis. Dentre eles, Nogueira (1985) enumera quatro: a clara definição dos limites das fronteiras do sistema analisado, obtenção de valores confiáveis, especialmente relacionados aos insumos indiretos, coerência ao escolher o nível de regressão pretendido, atentando para a contribuição dos insumos indiretos de cada nível, e identificação e quantificação de certos insumos como transporte e mão-de-obra. Embora seja um método de elevada precisão e geralmente usado em análises energéticas, Baird et al (1997) apresentam o tempo e o esforço demandado como algumas desvantagens deste método. Por sua vez, a *Análise Input-Output* foi adaptada das matrizes de Leontief até então usadas para análise macroeconômica, permitindo a quantificação do fluxo de energia em um sistema e a contribuição de cada setor (Nogueira,1985). A possível generalização, resultante da agregação dos dados pode ser encarada como uma desvantagem segundo Baird et al (1997), no entanto Cleveland (2008) a classifica como mais compreensiva que o método anterior. Baird et al (1997) e Nogueira (1985) apresentam outros tipos de análise. A Análise Estatística propõe a determinação do custo energético dos insumos e dos produtos a partir de tratamentos estatísticos, o que pode resultar em desvios consideráveis dependendo do universo considerado. Por sua vez, a *Análise Híbrida* configura uma metodologia composta pelos três métodos acima e aparenta ser mais confiável, sendo muito adotada pelos estudos desta natureza.

Atualmente encontram-se vários modelos computacionais de análise energética que convertem os dados fornecidos em indicadores a partir dos limites considerados no estudo. Um dos modelos mais robustos de ACV é o GREET⁹ (*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*), desenvolvido pelo Laboratório Nacional Argonne, e que tem sido usado para estimar o uso de energia e a emissão de poluentes na produção de vários biocombustíveis. Da mesma forma, o EBAMM¹⁰ (*ERG Biofuel Analysis Meta-Model*), desenvolvido pelo Grupo de Energia e Recursos da UC Berkeley, publicou em 2006 um artigo onde, a partir de seis estudos referentes ao balanço energético do etanol do milho, ajustou os coeficientes usados, propondo uma homogeneização nas análises do respectivo sistema produtivo.

9) Disponível em: http://www.transportation.anl.gov/modeling_simulation/GREET/

10) Disponível em: <http://rael.berkeley.edu/ebamm/>

PARTE II

ESTUDOS DE CASO: DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA

Visando discutir de forma aplicada os aspectos conceituais e os principais parâmetros que conduzem uma análise energética, este trabalho estudou os fluxos energéticos de dois sistemas produtivos de biocombustíveis: biodiesel de soja e etanol de cana-de-açúcar. A escolha destas alternativas baseou-se no fato de serem as principais matérias-primas utilizadas no Brasil para a obtenção de biocombustíveis, quando todo o etanol brasileiro é proveniente da cana de açúcar, e cerca de 80% do biodiesel é proveniente da soja. Nos itens seguintes serão definidos os principais parâmetros considerados neste estudo, como as fronteiras do sistema, coeficientes energéticos dos insumos e formulação dos indicadores.

4.1. Estudos de caso: Informações gerais e base de dados

Para justificar a confiabilidade dos dados utilizados – a primeira condição para que um estudo expresse a realidade analisada – este trabalho baseou-se em dados levantados em campo ou que constam nos relatórios de acompanhamento realizados periodicamente por empresas do setor. No entanto, não se importou em conferir à análise, num primeiro momento, uma representatividade nacional. Preocupou-se especialmente em apresentar a realidade de sistemas produtivos de biocombustíveis em determinadas localidades no país, destacando-se o estado de Mato Grosso como o maior produtor de soja, que finalizou a safra de 2008 com mais de 17 milhões de toneladas de grãos e produtividade acima de 3000 kg/ha, e o estado de São Paulo, que é responsável por cerca de 60% da produção nacional de cana (390 milhões de toneladas).

4.1.1. Biodiesel de Soja

Os dados referentes à etapa agrícola de produção da soja foram provenientes do levantamento das safras de 2007/08 e 2008/09 no estado de Mato Grosso, realizado pelo Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária (IMEA)¹¹. Embora estes levantamentos, os únicos realizados até o momento pela instituição, tenham sido feitos a fim de calcular o custo de produção do grão, os dados foram registrados sistematicamente a partir de visitas em campo e entrevistas com os produtores de três cidades: Campo Novo do Parecis, Sapezal e

11) Disponível em: www.imea.com.br/

Diamantino (Figura 4.1). De acordo com a metodologia do IMEA, com os dados fornecidos pelos produtores de cada cidade projetou-se um sistema agrícola de soja típico daquela localidade, conforme está apresentado no Anexo A. O sistema agrícola de soja utilizado neste trabalho consistiu em uma média geral dos valores contabilizados em cada localidade e em cada safra.

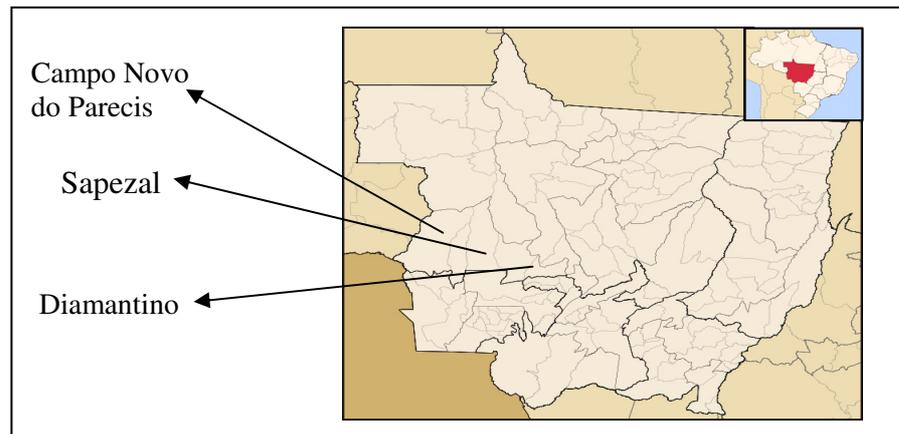


Figura 4.1: Localização das cidades produtoras de soja consideradas no levantamento dos dados

Para o transporte dos grãos de soja até a usina, foi considerado apenas transporte rodoviário numa modalidade única de carga: carreta com capacidade para 10 toneladas. Por sua vez, a etapa industrial do processamento dos grãos e obtenção do biodiesel considerou a extração e a transesterificação do óleo de soja, a partir do levantamento dos dados junto a empresas do setor. Em relação à etapa de extração consultou-se a DeSmet Ballestra do Brasil¹² tendo como referência uma planta de 1500 t_{grão}/dia que produz óleo de soja degomado. Já para a etapa de obtenção do biodiesel foram obtidas informações pessoais da Dedini S/A Indústrias de Base¹³, considerando uma planta de 100 mil t/ano de biodiesel de soja, trabalhando em regime full time.

4.1.2. Etanol de Cana-de-açúcar

Os dados referentes à etapa agrícola e produção de etanol anidro foram provenientes de informações pessoais fornecidas pelo Centro de Tecnologia Canavieira¹⁴, e constam nos relatórios internos de acompanhamento da empresa, referentes às safras de 2007/08 e 2008/09 das usinas localizadas no Estado de São Paulo. Pelo fato de não ter sido possível o acesso completo a estes relatórios, alguns valores foram adotados de estudos similares que utilizaram a mesma base de dados referentes a safras anteriores. Na etapa industrial considerou-se os parâmetros apresentados no trabalho de Macedo et al. (2004).

12) Disponível em: www.desmet.com.br/

13) Disponível em: www.dedini.com.br/

14) Antiga Copersucar e disponível em: www.ctc.com.br/

4.2. Níveis de regressão e Fronteiras do sistema

A análise energética proposta se estendeu apenas a três níveis de regressão, a saber:

- **Nível 1:** Contabilização da demanda eletricidade e de insumos para a geração de vapor;
- **Nível 2:** Contabilização da energia embutida nos insumos químicos, na mão-de-obra, e o consumo de diesel nas máquinas agrícolas e no transporte;
- **Nível 3:** Contabilização da energia embutida nos equipamentos, meios de transporte e edificações.

As fronteiras do sistema foram definidas do “*Berço ao Portão*” ou *Well-to-Gate* (WTG), isto é, o sistema produtivo abrangeu a etapa agrícola e a etapa industrial, considerando também o transporte da matéria-prima até a usina, e a extração do óleo na produção de biodiesel. A fim de facilitar a comparação entre os sistemas produtivos, no balanço energético dos sistemas produtivos, a unidade funcional foi $kJ/MJ_{biocombustível}$ produzido, considerando a densidade do biodiesel de soja e do etanol anidro de cana igual a 0,8 kg/L. A Figura 4.2 apresenta os insumos considerados na análise e os parâmetros levantados para caracterizar a etapa agrícola e a industrial.

Na etapa agrícola além dos insumos contabilizados pelos níveis de regressão, considerou-se o aporte de radiação solar, a partir da média de incidência de radiação solar no território brasileiro, disponível no Atlas Solarimétrico do Brasil¹⁵. No caso do etanol de cana, além da adubação convencional, considerou-se a utilização de torta de filtro e vinhaça em 30% na área de planta, e 35% na área de soqueiras, respectivamente. O peso das máquinas e implementos agrícolas, bem como dos caminhões e carretas utilizados no transporte da matéria-prima foram estimados a partir de catálogos de fabricantes. Alguns destes valores, já publicados por Macedo et al (2004), foram adotados para o sistema produtivo da cana.

Na etapa industrial, não foi levado em conta equipamentos e edificações referentes a outros processos que não estivessem ligados diretamente à obtenção do biocombustível, como estação de tratamento de efluentes, oficinas e laboratórios. Contabilizou-se apenas a energia embutida em moendas, destiladores, reatores, tanques para armazenamento e prédios industriais. Na produção de etanol incluiu-se o gasto energético na fabricação das caldeiras, que consomem grande parte do bagaço para geração de vapor e eletricidade.

15) Disponível em: www.cresesb.cepel.br/publicacoes/atlas_solar.htm

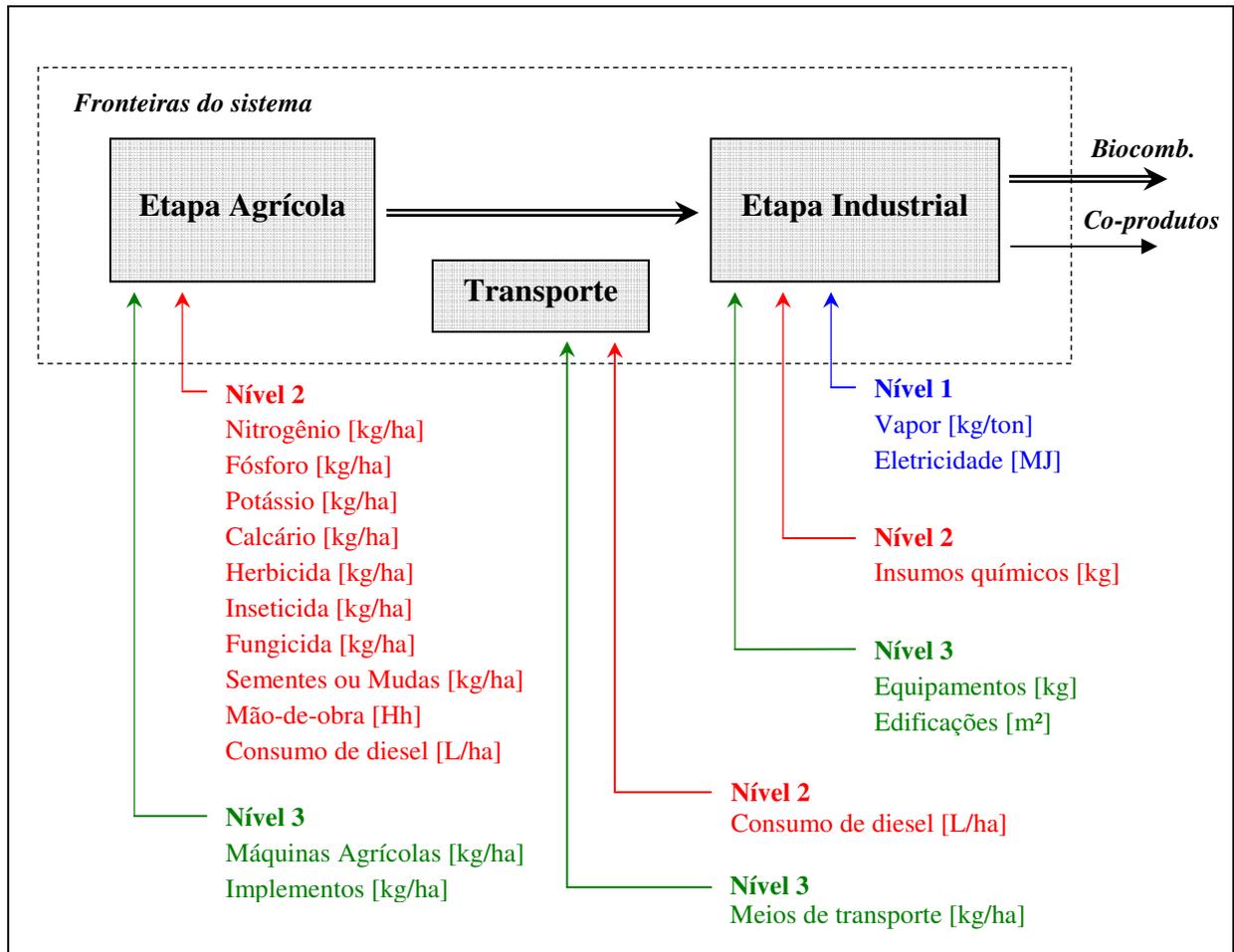


Figura 4.2: Fronteiras do sistema produtivo analisado

4.3. Coeficientes energéticos

Entre os insumos contabilizados na etapa agrícola, os coeficientes energéticos referentes aos fertilizantes e defensivos foram retirados de seis estudos analisados no trabalho de Farrel et al. (2006), que usou o modelo EBAMM para ajustá-los. Cada estudo apresentou um coeficiente energético específico para cada insumo, cujos valores médios, usados no balanço energético proposto, máximos e mínimos, usados na análise de sensibilidade, estão listados na Tabela 4.1 seguinte¹⁶. A contribuição energética do calcário foi depreciada ao longo do tempo, por conta do poder residual do mesmo: na produção de soja foi considerada uma nova aplicação a cada 4 anos, e na aplicação de cana, uma nova aplicação a cada 2 anos. De acordo com os dados do BEN (2008), referente ao consumo energético do setor químico, foi considerado que 73% da energia embutida nestes insumos corresponde à insumos fósseis.

16) Para os fungicidas, considerou-se o coeficiente energético de 97,2 MJ/kg (Pimentel, 1980).

Tabela 4.1: Coeficientes energéticos (CE) dos fertilizantes e defensivos químicos utilizados na etapa agrícola
(Adaptado de EBAMM, 2009)

Insumos	CE_{mínimo} [MJ/kg]	CE_{médio} [MJ/kg]	CE_{máximo} [MJ/kg]
Nitrogênio	50,9	56,5	66,9
Fósforo (P ₂ O ₅)	1,9	9,5	20,3
Potássio (K ₂ O)	4,6	7,5	13,6
Calcário	0,1	1,0	1,8
Herbicidas	245,6	308,3	418,4
Inseticidas	184,7	305,5	418,4

Para os outros insumos considerados na etapa agrícola foram usados os coeficientes apresentados na Tabela 4.2. Não foram considerados coeficientes de outras referências para as sementes de soja e as mudas de cana. A fim de homogeneizar a análise, quanto à mão-de-obra considerou-se apenas a colheita, e não foram listados outros coeficientes devido à pequena participação deste insumo no sistema produtivo. O coeficiente associado ao óleo diesel expressa além de seu poder calorífico, a energia consumida na sua produção, transporte e processamento, com uma participação de 91% de energia fóssil, por conta do ajuste dos dados de Sheehan (1998) à realidade brasileira, sugerida no trabalho de Mourad (2008). Para as sementes de soja, também a partir do trabalho de Mourad (2008), adotou-se a participação de 78% de energia fóssil, considerando o cultivo e a secagem dos grãos. Este valor foi adotado para as mudas de cana.

Tabela 4.2: Coeficientes energéticos dos outros insumos utilizados na etapa agrícola

Insumos	Coeficiente energético	Fonte
Sementes de soja [MJ/kg]	33,5	Gazzoni et al. (2006)
Mudas de cana	3% do consumo total	Macedo et al. (2004)
Mão-de-obra [MJ/h]	2,28	Braga (2008)
Diesel [MJ/L]	47,8	Macedo et al. (2004)

Para o cálculo da contribuição energética em função das máquinas agrícolas e implementos, foi utilizada a metodologia apresentada em Macedo et al. (2004), que considera a depreciação energética do equipamento ao longo de sua vida útil – correspondente a 82% de sua vida total – cujos coeficientes são apresentados na Tabela 4.3 seguinte.

Tabela 4.3: Coeficientes energéticos dos equipamentos utilizados na etapa agrícola (Macedo et al., 2004)

Insumos	Energia do material (EM) [MJ/kg]	Energia de fabricação (EF) [MJ/kg]	Energia de reparos [Fração de EM + EF]	Vida útil [anos]
Trator e Colhedeira	49,5	13,8	0,297	9
Implementos agrícolas	62,8	8,6	0,309	10
Caminhões	62,8	14,6	0,202	10

Na etapa industrial, os coeficientes energéticos dos insumos usados no processamento da biomassa estão listados na Tabela 4.4 abaixo. Na geração de vapor – input considerado apenas no sistema produtivo da soja por conta da utilização do bagaço para este fim no caso do etanol de cana – foram contabilizados apenas dois combustíveis: o óleo combustível na etapa de transesterificação, e a lenha na etapa de secagem dos grãos e extração do óleo, de acordo com as informações de empresas do setor.

Quanto à parcela de energia fóssil nos insumos, manteve-se a participação de 73% da energia embutida nos insumos químicos. Para a eletricidade considerou-se apenas 17%, segundo os dados do BEN (2008). Quanto ao óleo combustível associou-se uma participação de 91%, pelos mesmos motivos dados acima para o diesel. À lenha associou-se uma participação de apenas 2%, como sugeriu Mourad (2008), devido ao pequeno gasto energético na colheita e no transporte relativamente ao poder calorífico da biomassa (13,0 MJ/kg).

Tabela 4.4: Coeficientes energéticos dos insumos utilizados na etapa industrial

	In sumos	Coeficiente energético	Fonte
SOJA	Lenha [MJ/kg]	13,0	Mourad (2008)
	Óleo combustível [MJ/kg]	47,8	Sheehan et al. (1998)
	Hexano [MJ/kg]	44,5	Sheehan et al. (1998)
	Metanol [MJ/kg]	22,7	Sheehan et al. (1998)
	Catalisador [MJ/kg]	39,1	Sheehan et al. (1998)
CANA	Ácido sulfúrico [MJ/ t cana]	3,10	Macedo et al. (2004)
	Ciclo Hexano [MJ/ t cana]	0,54	Macedo et al. (2004)
	Soda em escamas [MJ/ t cana]	0,75	Macedo et al. (2004)
	Lubrificantes [MJ/ t cana]	0,71	Macedo et al. (2004)
	Cal [MJ/ t cana]	1,26	Macedo et al. (2004)

Para o processamento da cana foi usado o dimensionamento apresentado por Macedo et al. (2004) referente a uma usina de 120000 L_{etanol} /dia, funcionando 180 dias por ano. Segundo o mesmo autor, a Tabela 4.5 lista o consumo energético referente aos equipamentos industriais para a mesma usina. No processamento da soja, foi considerado que todos os equipamentos eram de aço carbono, com um coeficiente energético de 83,4 MJ/kg segundo Macedo et al. (2004), com uma vida útil de 25 anos. Em ambos os casos, foi utilizada a mesma metodologia de depreciação energética do equipamento ao longo de sua vida útil com um consumo adicional de 4% da energia em função de manutenção.

Para as edificações, considerou-se apenas a energia embutida em prédios industriais (Tabela 4.6) a fim de homogeneizar a análise, isto é, por conta da variabilidade do layout da planta de biocombustível, as informações obtidas a respeito das edificações não consideravam laboratórios, oficinas e escritórios. Adotou-se a participação da energia fóssil referente aos equipamentos e às edificações em parcelas de 65% e 60% respectivamente, de acordo com Seabra (2008).

Tabela 4.5: Coeficientes energéticos dos equipamentos no processamento de cana (Macedo et al., 2004)

Edificação	Coeficiente energético [MJ/kg]	Vida útil [anos]
Esteiras	58,7	25
Moendas, turbinas e mesa de lavagem	104,2	25
Caldeiras	130,0	15
Destilaria	109,7	15

Tabela 4.6: Coeficientes energéticos das edificações na etapa industrial (Adaptado de Tavares, 2006)

Edificações	Coeficiente energético [MJ/m ²]
Prédios	1800,00
Escritórios	2400,00
Oficinas	1200,00

Por fim, a Tabela 4.7 apresenta os coeficientes associados aos produtos e co-produtos considerados no processo, a saber:

Sistema produtivo da soja: Farelo (gerado na extração); Cascas (gerado na extração); Biodiesel de soja (gerado na transesterificação) e Glicerina (gerado na transesterificação).

Sistema produtivo da cana: Etanol de cana; Bagaço excedente (gerado na moagem e não utilizado na caldeira) e Eletricidade excedente (gerada na planta e não utilizada no processo).

Para o biodiesel e o etanol anidro foi utilizado o respectivo PCI como referência. Para a glicerina adotou-se o PCI da glicerina pura decrescido em 25% devido às impurezas. Não foram listados os coeficientes energéticos dos outros co-produtos da cana, como a vinhaça e a torta de filtro, pois a análise considera o seu uso na adubação do canavial.

Tabela 4.7: Coeficientes energéticos dos produtos e co-produtos contabilizados na análise energética

	Produtos e Co-produtos	Coeficiente energético	Fonte
SOJA	Biodiesel de soja [MJ/kg]	39,95	PCI (Sheehan et al., 1998)
	Grão de Soja [MJ/kg]	16,80	Cavalett (2008)
	Farelo de soja [MJ/kg]	15,00	Mendes (2004) apud Mourad (2008)
	Cascas de soja [MJ/kg]	13,80	Fos Engineering (2008) apud Mourad (2008)
	Óleo de soja degomado [MJ/kg]	39,60	Domalski et al. (1986) apud Cavalett (2008)
	Glicerina (85%) [MJ/kg]	12,20	Mourad (2008)
CANA	Etanol de Cana-de-açúcar [MJ/kg]	28,22	PCI (BNDES, 2008)
	Bagaço de cana (50% umid.) [MJ/kg]	7,50	PCI (AALBORG, 2009)

4.4. Indicadores

Conforme apresentado anteriormente, a análise energética geralmente resulta em indicadores que expressam a relação dos fluxos contabilizados, cuja formulação permite diferentes interpretações. Os indicadores utilizados neste trabalho foram divididos em quatro grupos, apresentados na Tabela 4.8 seguinte.

Os Indicadores por nível de regressão [I_{NR}] contabilizam a influência acumulada dos níveis. Os Indicadores por fronteiras do sistema [I_{FR}] contabilizam o balanço energético em cada etapa do sistema produtivo, considerando as entradas e saídas de energia e massa. Não foi considerada a etapa de transporte da matéria-prima até a usina, e na etapa industrial, no caso da soja, separou-se a extração do óleo e a transesterificação. Entre estes indicadores foi considerado o aporte energético da radiação solar na etapa agrícola a fim de verificar a degradação deste recurso energético ao longo da produção da biomassa. Os Indicadores por alocação da energia [I_A] permitem alocar a energia consumida exclusivamente para produzir o biocombustível. Foram utilizados três critérios de alocação apresentados na Figura 3.3. E por fim, o Indicador líquido dos fluxos [I_L] consiste numa subtração simples das entradas pelas

saídas de energia, revelando a obtenção de energia líquida do sistema produtivo analisado em relação a energia consumida.

Tabela 4.8: Indicadores de balanço energético da obtenção de biocombustíveis

Parâmetros		Formulação	
Nível de Regressão	Nível de Regressão 1	$I_{NR1} = \frac{E_{Biocomb.} + E_{Co-prod.}}{E_{NR1}}$	$E_{Biocomb.}$: Energia embutida no biocombustível $E_{Co-prod.}$: Energia embutida nos co-produtos E_{NR1} : Energia consumida no nível de regressão 1
	Nível de Regressão 2	$I_{NR2} = \frac{E_{Biocomb.} + E_{Co-prod.}}{E_{NR1} + E_{NR2}}$	E_{NR2} : Energia consumida no nível de regressão 2
	Nível de Regressão 3	$I_{NR3} = \frac{E_{Biocomb.} + E_{Co-prod.}}{E_{NR1} + E_{NR2} + E_{NR3}}$	E_{NR3} : Energia consumida no nível de regressão 3
Fronteiras do sistema	Fronteira Agrícola	$I_{FRa} = \frac{E_{Biomassa}}{E_{Agrícola}}$	$E_{Biomassa}$: Energia embutida no produto do sistema agrícola (cana ou grão) [MJ/kg]; $E_{Agrícola}$: Energia consumida na etapa agrícola
	Aporte da Radiação Solar	$I_{FRs} = \frac{E_{Biomassa}}{E_{Agrícola} + E_{Sol}}$	E_{Sol} : Aporte de energia solar na etapa agrícola
	Fronteira na Extração	$I_{FRe} = \frac{E_{Matéria-prima} + E_{Co-prod.}}{E_{Biomassa} + E_{Extração}}$	$E_{Matéria-prima}$: Energia embutida na matéria-prima do processo $E_{Co-prod.}$: Energia embutida nos co-produtos $E_{Extração}$: Energia consumida na etapa de extração do óleo
	Fronteira Industrial	$I_{FRi} = \frac{E_{Biocomb.} + E_{Co-prod.}}{E_{Matéria-prima} + E_{Indústria}}$	$E_{Indústria}$: Energia consumida na etapa de conversão da biomassa
Critério de alocação	Exigência nula	$I_{An} = \frac{E_{Biocomb.}}{E_{NR3}}$	$E_{Biocomb.}$: Energia embutida no biocombustível E_{NR3} : Energia consumida no nível de regressão 3
	Alocação por massa	$I_{Am} = \frac{E_{Biocomb.}}{E_{massa} \cdot E_{NR3}}$	E_{massa} : Energia alocada em função da massa
	Alocação por energia	$I_{Ae} = \frac{E_{Biocomb.}}{E_{energia} \cdot E_{NR3}}$	$E_{energia}$: Energia alocada em função da energia
	Alocação por valor monetário	$I_{Avm} = \frac{E_{Biocomb.}}{E_{valor} \cdot E_{NR3}}$	E_{valor} : Energia alocada em função do valor monetário
Fluxo	Indicador de fluxo líquido	$I_L = \frac{E_{Saída} - E_{Entrada}}{E_{Entrada}}$	$E_{Entrada}$: Energia consumida no sistema produtivo a partir dos três níveis de regressão $E_{Saída}$: Energia produzida pelo sistema produtivo a partir do biocombustível e co-produtos

4.5. Análise de sensibilidade

A fim de observar a variação dos indicadores por conta dos aspectos considerados para os sistemas produtivos estudados, a análise de sensibilidade baseou-se nos seguintes parâmetros:

1) *Coefficientes energéticos*: Quanto aos fertilizantes e defensivos foi considerado os valores máximos e mínimos listados na Tabela 4.1. Além do coeficiente apresentado para o diesel, (Tabela 4.2), foi utilizado seu respectivo Poder Calorífico Inferior (PCI) de 38,7 MJ/L.

2) *Quantidade dos insumos*: Foi considerada uma variação de $\pm 50\%$ para a demanda de fertilizantes e defensivos agrícolas, $\pm 50\%$ para a produtividade e $\pm 90\%$ da distância entre o campo e a usina. Para a cana, ainda foi considerada variações de $\pm 50\%$ para a mecanização da colheita, $\pm 10\%$ para rendimento em etanol e $\pm 30\%$ para excedente de bagaço e eletricidade.

4.6. Valoração energética dos co-produtos

Para enfatizar este aspecto, propôs-se verificar a amplitude dos desvios nos resultados finais quando o valor energético dos co-produtos fosse alterado. Não foram estimados coeficientes específicos em função de outros processos e finalidades distintas, mas apenas alocaram-se, arbitrariamente, variações $\pm 100\%$ na energia associada aos co-produtos.

CAPÍTULO 5. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

Neste capítulo são caracterizados os dois sistemas produtivos analisados, a partir das etapas que os compõe. Em cada etapa apresentam-se os inputs energéticos associados aos insumos em função da produção de biomassa ou de biocombustível.

5.1. Etapa Agrícola

5.1.1. Produção da Soja

Como explicitado anteriormente, a etapa agrícola de produção da soja baseou-se na realidade de três cidades que refletem bem o perfil característico do estado do Mato Grosso. O ciclo da soja dura de três a seis meses, com preparo e plantio entre setembro e outubro. Na entressafra, geralmente cultiva-se milho e milheto (uma espécie de gramínea) em parcela da área, que posteriormente é usado como adubação de cobertura no plantio da soja. As produtividades e a área de plantio registradas nas últimas safras (2007/08 e 2008/09) em propriedades típicas destas localidades são apresentadas na Tabela 5.1 seguinte. A partir da média destes dados, desenhou-se uma propriedade modelo de 2100 ha com produtividade esperada de 3150 kg/ha, a qual foi usada como referência neste trabalho.

Tabela 5.1: Perfil das unidades produtoras de soja nas últimas safras

Parâmetro	Safra	Campo Novo do Parecis	Sapezal	Diamantino
Área [ha]	2007/08 e 2008/09	2300	2500	1500
Produtividade [kg/ha]	2007/08	3120	3300	3120
	2008/09	3120	3120	3120

O uso de fertilizantes e defensivos agrícolas registrados em cada unidade produtora resultou em valores médios considerados na propriedade modelo, e apresentados na Tabela 5.2 abaixo. Junto à quantidade de insumo demandada por hectare, também se apresenta a contribuição energética de cada insumo para a produção de uma tonelada de grão, a partir dos coeficientes médios da Tabela 4.1 e 4.2.

A baixíssima demanda de nitrogênio, por conta da fixação biológica dos nódulos radiculares, fez com que o aporte de fósforo e potássio tivesse maior peso, 11,0 e 9,5% respectivamente, o que não é comum em outras culturas devido ao elevado coeficiente energético deste insumo. Outras oleaginosas apresentaram perfis distintos na etapa agrícola: para a palma, Costa (2007) relata um consumo de 765 kg/ha de fertilizantes na etapa adulta da palma cultivada na região amazônica, correspondendo a aproximadamente 3000 MJ/kg_{biodiesel} (84% da energia consumida). Para o algodão, Albuquerque et al. (2007) contabilizaram uma

demanda de fertilizantes 250 kg/ha (20% da energia consumida); e para o girassol, Gazzoni et al. (2006) consideraram o consumo de NPK em 40 kg/ha, 18 kg/ha e 33 kg/ha, respectivamente, sendo que o nitrogênio corresponde a aproximadamente um quarto da energia total contabilizada nesta etapa.

Tabela 5.2: Aporte energético e mássico de insumos na produção da soja

Parâmetros	Aporte mássico	Energia Total [MJ/t _{grão}]
Nitrogênio [kg/ha]	1,0	17,9 (0,8%)
Fósforo (P ₂ O ₅) [kg/ha]	77,5	233,7 (11,0%)
Potássio (K ₂ O) [kg/ha]	84,4	200,9 (9,5%)
Calcário [kg/ha]	520,8	165,3 (7,8%)
Herbicidas [kg/ha]	1,7	165,9 (7,8%)
Inseticidas [kg/ha]	1,0	100,7 (4,8%)
Fungicidas [kg/ha]	0,7	20,5 (1,0%)
Sementes [kg/ha]	50,8	540,9 (25,6%)
Equipamentos [kg/ha]	47,5	119,2 (5,6%)
Diesel [L/ha] ^a	36,3	551,0 (26,0%)
Mão-de-obra [h/ton.H] ^b	0,4	0,9 (0,04%)
Total	-	2116,9 (100%)

a) L/ha. Volume de diesel demandado nas operações agrícolas em um hectare.

b) h/ton.H significa o número de horas que um homem gasta para produzir uma tonelada de soja, com jornada de trabalho de 8 horas por dia.

O uso de calcário, geralmente contabilizado entre 2000 e 2500 toneladas por hectare em função da acidez do solo, foi depreciado ao longo de quatro anos sucessivos da cultura por conta do poder residual deste insumo, conforme verificado pelo IMEA junto aos produtores consultados, correspondendo em cerca de 7,8% da energia total. As pequenas quantidades de herbicidas e inseticidas, ao ser considerado apenas o princípio ativo destes insumos, determinaram aportes energéticos na ordem de 12% no total, devido aos seus elevados coeficientes. No entanto, foram as sementes de soja que atribuíram à etapa agrícola considerável demanda de energia, cerca de 25% do total consumido. A energia contabilizada na produção de um kg de sementes, geralmente considera o consumo no preparo, armazenamento, e eventualmente no transporte até o campo. Em análises futuras, poder-se-ia atentar para o consumo energético ao longo de intensos programas de melhoramento genético que conferem, entre outras características, elevadas produtividades às culturas. Outros autores como Sheehan (1998) e Mourad (2008) aferiram a contribuição energética das sementes de

soja considerando 150% da energia demandada na etapa de plantio e secagem do grão. Mourad (2008) apresentou uma contribuição de 3,0 MJ/kg_{semente}, o que neste estudo corresponderia a 152,4 MJ/t_{grão} (70% a menos que o valor estimado).

Ao todo, neste trabalho foi calculado um consumo de aproximadamente 2117 MJ/t_{grão} na etapa agrícola da soja em plantio semi-direto, sendo que o uso de fertilizantes (junto ao calcário), de sementes e de diesel responde por mais 80% do total. Gazzoni et al. (2006) publicaram valores próximos de 2775 MJ/t_{grão} para a soja em plantio direto, onde os equipamentos são responsável por 13,4% do total e a mão-de-obra em cerca de 9,5%, as outras parcelas apresentaram valores proporcionais aos deste trabalho, conforme apresenta o Gráfico 5.1 abaixo. No caso do girassol, os mesmos autores encontraram valores próximos a 5800 MJ/t, com os fertilizantes e o calcário responsáveis por 40% da energia consumida. Para o algodão Albuquerque et al. (2007), registraram um consumo de 3900,0 MJ/t_{algodão}, sendo que os uso de defensivos correspondiam a 39,5% do total.

Como pode ser observado no gráfico seguinte, o consumo energético referente ao maquinário agrícola alcançou maiores valores no estudo de Gazzoni et al. (2006), mesmo tendo registrado uma densidade de apenas 20 kg/ha, ou seja, duas vezes menor que o contabilizado neste trabalho (42,5 kg/ha). Aspectos metodológicos e a adoção de coeficientes distintos podem justificar esta diferença, ressaltando uma das primeiras limitações em análises, onde os resultados finais sofrem razoáveis influências por conta dos pressupostos metodológicos que cada estudo utiliza. Da mesma forma, o consumo de sementes contabilizado por Gazzoni et al. (2006) é discretamente menor que o registrado neste trabalho, embora tenha sido utilizado o mesmo coeficiente energético. Porém, neste caso, a produtividade considerada nos estudos, que diferem entre si em 900 kg/ha de grão, justifica a pequena diferença.

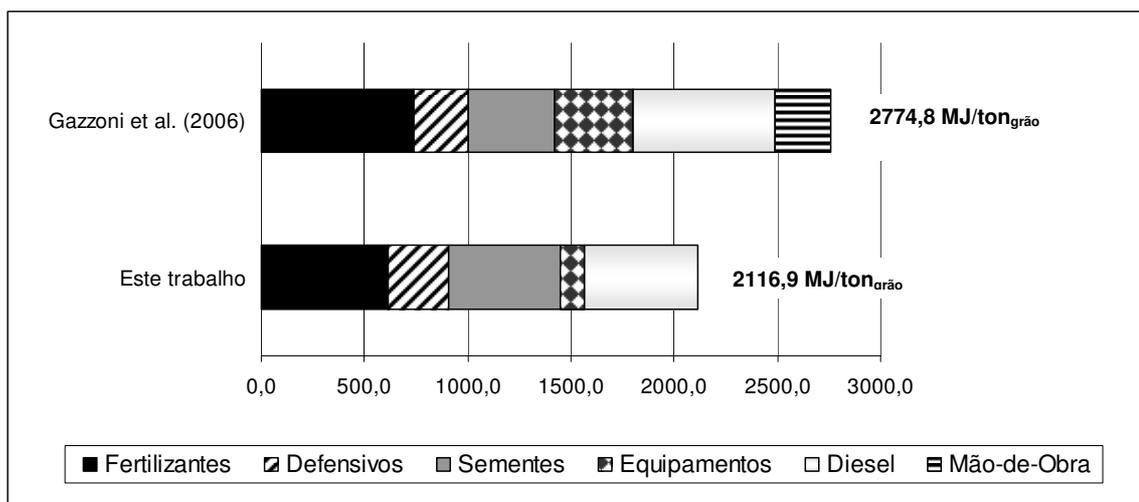


Gráfico 5.1: Contribuição energética total dos insumos contabilizados na etapa agrícola da soja

Por sua vez, ao saber que a contribuição energética associada à mão-de-obra é um tema controverso, conforme comentado no item 3.2.4 acima, neste trabalho não se atentou para a atividade executada em si, mas o número de horas gastas por um trabalhador em um hectare. Nos três casos analisados para a produção da soja, praticamente todas as atividades eram mecanizadas, inclusive a colheita, resultando num pequeno quadro de trabalhadores que se alternavam entre tratoristas e ajudantes. Este quadro correspondeu em média a 4,2 trabalhadores para 2100 ha, cuja contribuição energética foi da ordem de 0,04% do consumo total. Verifica-se que Costa (2007) e Yànez (2008), ao estudarem a produção de biodiesel da palma, estimaram valores de contribuição semelhantes. Mesmo Albuquerque et al. (2007), que utilizou uma metodologia mais detalhada revelando o Gasto Energético no Repouso (GER) de cada agricultor, relatou uma contribuição de 0,2% do consumo total de energia na produção de algodão em sistemas familiares. Já Pimentel e Patzek (2005) estimaram valores para mão-de-obra de 7,5% e 5,6% do consumo total na etapa agrícola de produção da soja e de girassol, respectivamente. Independente da diversidade de metodologias utilizadas para este fim, observa-se que a contribuição energética da mão-de-obra não ultrapassa 10% do consumo na etapa agrícola, sinalizando que a contabilização sistemática e rigorosa deste insumo eventualmente contribuiria mais para indicadores de sustentabilidade social e viabilidade econômica.

5.1.2. Produção da Cana-de-açúcar

De acordo com os dados das safras 2007/08 e 2008/09 registrados no Estado de São Paulo, a etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar apresentou uma produtividade média de 85,0 t/ha, a partir das médias de produtividade de cana planta e de cana soca, com ciclo abrangendo um corte de planta, e quatro cortes de soqueiras, ao longo de seis anos.

De maneira geral, comparativamente com a cultura da soja, a cana demanda em média mais insumos por hectare (Tabela 5.3). No entanto, em termos energéticos, verifica-se que os valores associados à cana ficam bem abaixo dos encontrados na soja, particularmente por conta da elevada produtividade da cultura: enquanto era demandado aproximadamente 2117 MJ para se produzir uma tonelada de soja, consome-se em média 160 MJ para se obter uma tonelada de cana.

Dos parâmetros considerados, observa-se que os fertilizantes e o consumo de diesel com as operações agrícolas (sem considerar o transporte da cana até à usina) responde pela maior quantidade do gasto energético nesta etapa. O consumo médio de insumos verificado nestas safras considerou dois casos: o primeiro com adubação mineral, e o segundo com a aplicação de vinhaça em 35% da área de soqueiras, e torta de filtro em 30% na área de planta. De acordo com estes dados, observa-se que quando a vinhaça e a torta são aplicadas no campo a demanda de fertilizantes, e conseqüentemente, a contribuição energética destes insumos, diminuiu razoavelmente. Por outro lado, neste cenário, o aporte energético referente aos equipamentos e consumo de diesel aumenta por conta das operações adicionais de aplicação destes resíduos, o que não faz que o consumo energético total nesta etapa varie

consideravelmente, ficando entre 160,8 MJ/t_{cana} e 159,9 MJ/t_{cana}. Vale salientar que no caso onde foi considerado a aplicação de resíduos industriais na adubação de parcela do canavial, foram utilizados os mesmos valores apresentados por Nogueira (1985) e Macedo et al. (2004): 50 kg/ha de fósforo e 80 kg/ha de potássio na cana planta, e valores nulos para a cana soca. Os valores referentes aos defensivos agrícolas foram mantidos de estudos anteriores, embora pudessem ser menores em função da colheita de cana crua, cuja palha ao ser deixada no campo serve também para controle de pragas, como observa Donzelli (2005).

Tabela 5.3: Aporte energético e mássico de insumos na produção da cana-de-açúcar

Parâmetros	Aporte mássico (sem vinhaça)	Energia Total (sem vinhaça)		Aporte mássico (com vinhaça)	Energia Total (com vinhaça)	
			[MJ/t _{cana}]			[MJ/t _{cana}]
Nitrogênio [kg/ha]	68,0	45,2	(28,1%)	50,0	33,2	(20,8%)
Fósforo (P ₂ O ₅) [kg/ha]	36,8	4,1	(2,5%)	8,3	0,9	(0,6%)
Potássio (K ₂ O) [kg/ha]	96,2	8,5	(5,3%)	13,3	1,2	(0,8%)
Calcário [kg/ha]	960,0	11,3	(7,0%)	958,3	11,3	(7,1%)
Herbicidas [kg/ha]	2,2	8,0	(5,0%)	2,2	8,0	(5,0%)
Inseticidas [kg/ha]	0,2	0,6	(0,4%)	0,2	0,6	(0,4%)
Mudas [kg/ha]	-	4,8	(3,0%)	-	4,8	(3,0%)
Equipamentos [kg/ha]	54,2	5,0	(3,1%)	70,7	7,3	(4,6%)
Diesel [L/ha]	127,6	71,8	(44,7%)	161,9	91,0	(57,1%)
Mão-de-obra [h/ton.H]	0,7	1,5	(0,9%)	0,7	1,5	(0,9%)
Total	-	160,8	(100%)	-	159,9	(100%)

Quanto ao uso de equipamentos, repetiram-se os dados apresentados por Macedo et al. (2004). Além das operações agrícolas, procurou-se contabilizar a energia embutida nos caminhões usados na adubação de vinhaça e torta, considerando que parcela do input energético associava-se a tal fim, e o restante ao transporte da cana até a usina (Anexo C). Nas próximas safras acredita-se que serão associados maiores valores às máquinas agrícolas e ao consumo de diesel por conta da utilização, ainda incipiente, de plantadoras, segundo informações fornecidas pelo CTC.

O consumo de diesel na etapa agrícola, parâmetro de grande importância nestas análises, manteve-se abaixo do estudo realizado por Seabra (2008), que apresentou consumos de 164 L/ha e 230 L/ha. Estes valores se aproximam aos encontrados neste trabalho, quando considerado o diesel consumido no transporte de cana até à usina (20 km), contabilizando-se um input adicional de 39 MJ/t_{cana}, que resultou valores de 162,0 L/ha, no primeiro caso, e

196,6 L/ha, quando se pressupõe o uso de vinhaça e torta. A diferença entre estes valores ressalta a existência de atividades específicas em cada usina que não são identificadas ou que não se relacionam diretamente à produção de etanol, como o transporte de açúcar, a criação de gado, o manejo de outras culturas, etc. Como salienta Seabra (2008), espera-se que num futuro próximo informações completas e homogêneas quanto ao consumo de diesel seja incorporada à base de dados das usinas.

No Gráfico 5.2 seguinte, comparou-se este trabalho aos resultados apresentados por Nogueira (1985) e Macedo et al. (2004), dos quais foram considerados o transporte da cana até a usina e apenas o caso da adubação convencional – sem aplicação dos resíduos industriais no campo. De maneira geral verifica-se que os parâmetros correspondentes aos maiores inputs energéticos nesta etapa são os usos de fertilizante e diesel. No entanto, neste trabalho puderam ser alcançados gastos totais menores por conta da atualização dos coeficientes energéticos, e especialmente pelo aumento da produtividade da cultura. Esperava-se que o aporte energético correspondente às máquinas agrícolas aumentasse neste trabalho devido o aumento da produtividade, porém ao adotar valores de estudos anteriores, verificou-se este decréscimo. Seabra (2008) relata a tendência de aumento do consumo de energia nesta etapa, para colheita praticamente mecanizada, publicando valores de 238,5 MJ/t_{cana} para projeções em 2020. No presente trabalho já é observado o aumento do consumo de diesel na etapa agrícola, em relação ao outros estudos, a partir da mecanização de 50% da colheita. Os resultados estimados por Pimentel e Patzek (2007), referentes à produção de cana no Brasil (77,0 t/ha), diferem deste e dos outros trabalhos em muitos aspectos. Os mesmos estimaram uma demanda de 610 MJ/t_{cana} nos estados americanos, considerando uma produtividade de 88,0 t/ha. Em outras culturas destinadas à obtenção do etanol, verificam-se valores bem distintos, Pimentel e Patzek (2005) estimaram valores acima de 3000 MJ/t_{milho}.

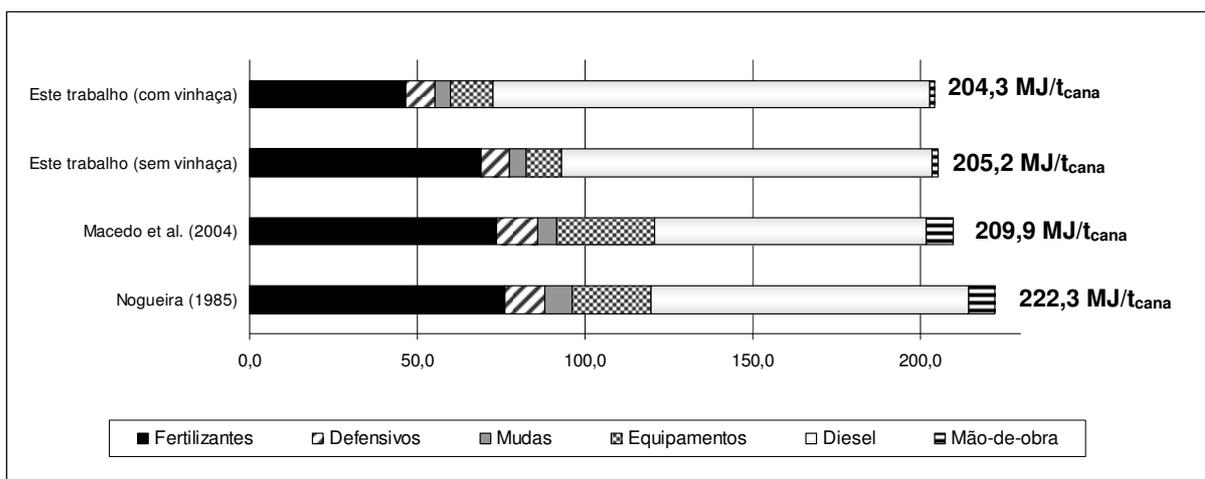


Gráfico 5.2: Contribuição percentual dos insumos em outros estudos

Em Nogueira (1985) e Macedo et al. (2004), o aporte energético da mão-de-obra foi contabilizado em cerca de 8,0 MJ/t_{cana}, de acordo com Silva (1976) apud Nogueira (1985). No presente trabalho, lançou-se mão do mesmo coeficiente energético usado para a soja chegando

a um valor de 1,5 MJ/t_{cana} para cada trabalhador, a partir do corte de 12 t_{cana}/dia (Alves, 2006). O uso do mesmo coeficiente energético é pertinentemente questionável, uma vez que as atividades laborais são claramente mais intensas no corte manual da cana que na colheita mecanizada da soja; mesmo assim, a contribuição energética deste insumo ainda ficaria entorno de 6%. Se fosse considerada a colheita 100% mecanizada, o gasto com a mão-de-obra seria bem depreciado, porém o consumo de diesel subiria em mais de 25%.

5.2. Etapa Industrial

5.2.1. Produção de Biodiesel de soja

A partir dos dados fornecidos por empresas especializadas em plantas de extração e transesterificação, a Tabela 5.4 seguinte lista o consumo mássico e energético verificado, considerando grãos de soja com 18% de óleo em média, e um rendimento reacional acima de 98%, isto é, produz-se uma tonelada de biodiesel de soja para a entrada de 1018 kg de óleo de soja degomado com 1% de acidez.

Tabela 5.4: Aporte energético e mássico na etapa industrial da soja

	Parâmetros	Aporte mássico	Aporte energético [MJ/t _{biodiesel}]	Aporte energético [kJ/MJ _{biodiesel}]
Extração do óleo	Hexano [kg]	1,0	251,9	6,3 (4,5%)
	Eletricidade [MJ]	-	713,2	17,9 (12,6%)
	Lenha [kg]	62,5	4598,8	115,1 (81,5%)
	Equipamentos [t]	1600,0	57,7	1,4 (1,0%)
	Edificações [m ²]	13000,0	24,2	0,6 (0,4%)
	Total	-	5638,7	141,1 (100,0%)
Conversão em biodiesel	Metanol [kg]	224,0	5084,8	127,3 (72,2%)
	Catalisador [kg]	8,0	312,5	7,8 (4,4%)
	Eletricidade [MJ]	-	72,0	1,8 (1,0%)
	Óleo combustível [kg]	32,5	1553,5	38,8 (22,0%)
	Equipamentos [t]	500,0	17,4	0,4 (0,2%)
	Edificações [m ²]	3000,0	1,4	0,03 (0,0%)
	Total	-	7041,6	176,2 (100,0%)

O input energético na extração do óleo de soja foi estimado tendo como base uma usina de extração de 1500 t_{grão}/dia, que prevê a entrada do grão e a saída de óleo de soja degomado, alcançando valores próximos a 141,3 kJ/MJ_{biodiesel} produzido. O consumo lenha na geração de vapor (saturado a 12 bar) correspondeu a maior contribuição de energia, cerca de 80%, seguido do consumo de eletricidade e hexano, que é usado apenas em extratoras com capacidade maior que 1500kg_{grão}/h. Já na etapa de transesterificação, o input energético correspondente ao uso de metanol e de catalisador registrou os maiores valores (75% da energia consumida nesta etapa), por conta da quantidade utilizada e dos elevados coeficientes energéticos associados a estes insumos. Geralmente usa-se o dobro do volume estequiométrico do metanol, isto é, seis mols de álcool para um mol de óleo a fim de acelerar a reação, e o excesso de catalisador permite a neutralização dos ácidos graxos livres presentes no óleo (Ferrari et al., 2005). Em síntese, enquanto este trabalho estimou o consumo total de 641,9 kJ/MJ_{biodiesel} na conversão da biomassa, outros autores como Pimentel e Patzek (2005) e Gazzoni (2006) não contabilizaram os insumos químicos na etapa industrial, apresentando valores de 102,6 kJ/MJ_{biodiesel} e 150,2 kJ/MJ_{biodiesel} respectivamente, para a obtenção do biodiesel de soja.

Quanto aos equipamentos e edificações, torna-se difícil contabilizar a área construída e o peso dos mesmos quando o layout da planta geralmente é ajustado às exigências do cliente. No entanto, já se esperava que as contribuições energéticas destes insumos fossem bem menores comparadas aos outros (cerca de 1% no total), por conta da depreciação ao longo da vida útil dos mesmos. Na etapa de extração ao considerar uma maior área por conta do armazenamento dos grãos, estimou-se um input maior para estes parâmetros.

Em termos comparativos, o Gráfico 5.3 abaixo apresenta o consumo energético em todas as etapas constituintes da produção de biodiesel de soja, explicitando a contribuição de fontes fósseis, que chegou a 62% é do total.

A etapa agrícola e a industrial são praticamente iguais quando o consumo de energia na extração é somado ao consumo na transesterificação. No entanto, verifica-se que a participação de fontes fósseis na etapa industrial é menor, apresentando valores próximos a 75% na transesterificação e 8% na extração, por conta da utilização de lenha para a geração de vapor. O transporte, cuja contribuição energética registra os valores mais baixos (23,7 kJ/MJ_{biodiesel}), é composta em cerca de 80% de energia fóssil, considerando um percurso de 20 km entre a propriedade agrícola e a usina de extração/transesterificação, realizado por uma carreta de com capacidade para 10 toneladas com consumo específico de 2,5 km/L. O aumento da distância implica em aportes energéticos expressivos nesta etapa: para 50 e 80 km, os valores subiriam em 40% e 90% respectivamente.

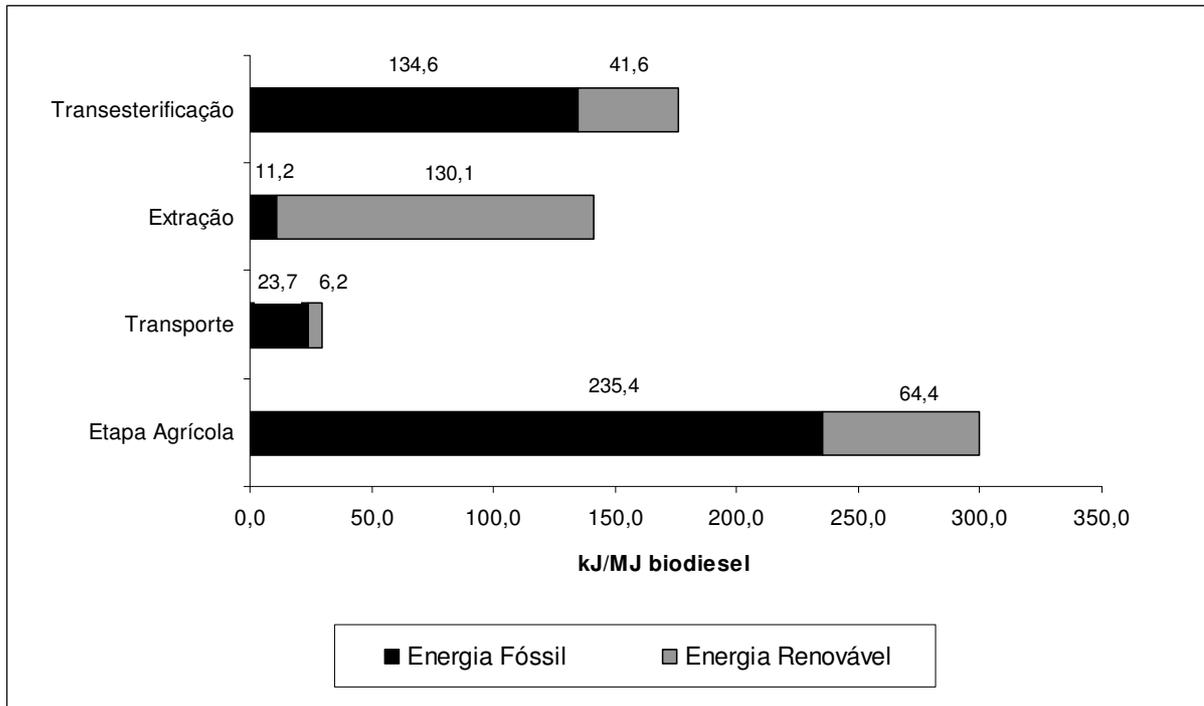


Gráfico 5.3: Contribuição energética de cada etapa na produção de biodiesel de soja

Os produtos e co-produtos gerados no processo estão listados na Tabela 5.5 a seguir, totalizando uma saída de 2771,2 kJ/MJ_{biodiesel}. Além destes produtos, Mourad (2008) contabilizou a produção de lecitinas, durante a degomagem do óleo, e de sabões durante a transesterificação, que pela baixa geração, foram desconsiderados neste trabalho. Atenta-se para a expressiva produção de farelo de soja no processo, devido ao baixo conteúdo de óleo no grão, justificando o fato de muitos especialistas, consultados durante este trabalho, definir o óleo de soja como um co-produto, uma vez que o principal motivo em se construir usinas extratoras consiste na produção de farelo (torta), comumente usada na alimentação animal. As cascas dos grãos de soja, produzidas em pequenas quantidades comparadas ao farelo também pode ser usada na composição de dietas de rebanhos suínos. Na transesterificação, a glicerina com 85% de pureza foi garantida pelo processo considerado, sendo gerada numa proporção de cerca de 11% de massa de biodiesel produzido, e destinada comumente para o setor fármaco ou cosmético. A proporção entre os produtos e co-produtos pouco se alteram para uma mesma matéria-prima, porém para outras oleaginosas os valores podem variar. Gazzoni (2006) apresenta uma produção de torta de girassol na ordem de 600,0 kg/ton_{grão} e CCAP (2008) considerou a produção de 590,0 kg/t_{grão} de torta de mamona. Aqui se sinaliza uma expressiva limitação das análises energéticas, a partir do momento que os co-produtos gerados no processamento do biodiesel são destinados para fins não necessariamente energéticos, uma vez que valorá-los segundo seu poder calorífico resulta numa comparação ineficaz e incentiva interpretações distorcidas. No capítulo seguinte estes conceitos voltarão a ser discutidos.

Tabela 5.5: Produtos e co-produtos gerados no processamento do grão de soja

Etapa	Co-produto	Massa gerada	Energia embutida [kJ/MJ _{biodiesel}]
Extração	Farelo de soja [kg/ton _{grão}]	785,0	1668,2
	Cascas de soja [kg/ton _{grão}]	35,0	68,4
Transesterificação	Biodiesel [kg/ton _{óleo}] ^a	1000,0	1000,0
	Glicerina [kg/ton _{óleo}] ^a	113,0	34,4

a) Neste caso foi considerado que 1018,0 kg de óleo de soja degomado produzem 1000 kg de biodiesel

5.2.2. Produção de Etanol de cana-de-açúcar

Neste trabalho foi considerada uma destilaria autônoma a partir da qual foram contabilizados os inputs energéticos em função dos parâmetros listados na Tabela 5.6 seguinte. Sabe-se que o rendimento do processo de obtenção do etanol está intimamente ligado ao teor de açúcares nos colmos da cana e a eficiência de retirá-los. Deste modo, os dados referentes às safras consideradas neste estudo apresentaram valores de *Pol* (teor de sacarose) e *Fibra* (bagaço) próximos de 14,26% e 12,79% respectivamente, a partir dos quais foi considerado um rendimento de 86,5 L_{etanol}/t_{cana}, com um processo com cogeração pura de ciclos a vapor (a 22 bar), e produção excedente de 11,2% de bagaço e 54,0 MJ/t_{cana} de eletricidade (Tabela 5.7).

Tabela 5.6: Aporte energético e mássico de insumos na produção de etanol

Parâmetros	Aporte mássico	Aporte energético [MJ/t _{etanol}]	Aporte energético [kJ/MJ _{etanol}]
Insumos químicos	-	92,0	3,3 (21,6%)
Eletricidade [MJ]	0,0	0,0	0,0 (0,0%)
Vapor [kg]	0,0	0,0	0,0 (0,0%)
Equipamentos [t]	1323,0	323,6	11,5 (75,2%)
Edificações [m ²]	9000,0	13,3	0,5 (3,3%)
Total	-	428,9	15,3 (100%)

Os insumos químicos, já expressos por Macedo et al. (2004), corresponderam a apenas 21,6% to total de energia consumida nesta etapa, porém são os equipamentos que respondem pelo maior aporte energético nesta etapa alcançando valores de 323,6 MJ/t_{etanol}. Isso também já foi verificado por Nogueira (1985), Pimentel e Patzek (2007) e Seabra (2008).

Além dos coeficientes energéticos divergirem em cada análise, a escala da usina considerada em análises energéticas implica em distorções nos resultados finais. Enquanto este trabalho chega a um consumo de 428,9 MJ/t_{etanol} na etapa industrial, considerando uma usina de 120000 L/dia com rendimento de 86,5 L/ton_{cana}, a partir dos dados de Seabra (2008) estima-se um consumo de 341,8 MJ/t_{etanol} para uma usina com capacidade de 860000 L/dia, com rendimento de 86,3 L/t_{cana}.

Os co-produtos gerados no processo, bagaço e eletricidade, foram expressos nos valores médios fornecidos pela CTC para as usinas de São Paulo. Além de garantir a auto-suficiência energética da usina, a produção de bagaço excedente em 11,2% de 280 kg/t_{cana} e 12 kWh/t_{cana} melhora os indicadores finais, pois – ao incluir a caldeira dentro das fronteiras do sistema analisado – anulam o input energético associado ao vapor e a eletricidade, que são responsáveis por expressivas contribuições no processamento do biodiesel. As mesmas observações feitas acima acerca da valoração dos co-produtos gerados no processo também valem para o sistema produtivo do etanol. No entanto, contabilizar a energia associada ao bagaço a partir de seu poder calorífico, não causaria tantas distorções quando se faz o mesmo para o farelo de soja, uma vez que o bagaço é comumente usado como combustível no setor cerâmico e na indústria da laranja, segundo BNDES (2008).

Tabela 5.7: Produtos e co-produtos gerados no processamento da cana

Co-produto	Geração	Energia embutida [kJ/MJ _{etanol}]
Etanol [kg/t _{cana}]	69,2	1000,0
Bagaço excedente [kg/t _{cana}]	31,4	120,4
Eletricidade excedente [MJ/t _{cana}]	43,2	22,1

Como observado no sistema produtivo do biodiesel, observa-se no Gráfico 5.4 que a etapa agrícola demanda mais energia que nas outras etapas, mas estando bem abaixo do input registrado no sistema produtivo de biodiesel, que consome cerca de cinco vezes mais a fim de se obter o mesmo conteúdo energético em biocombustível.

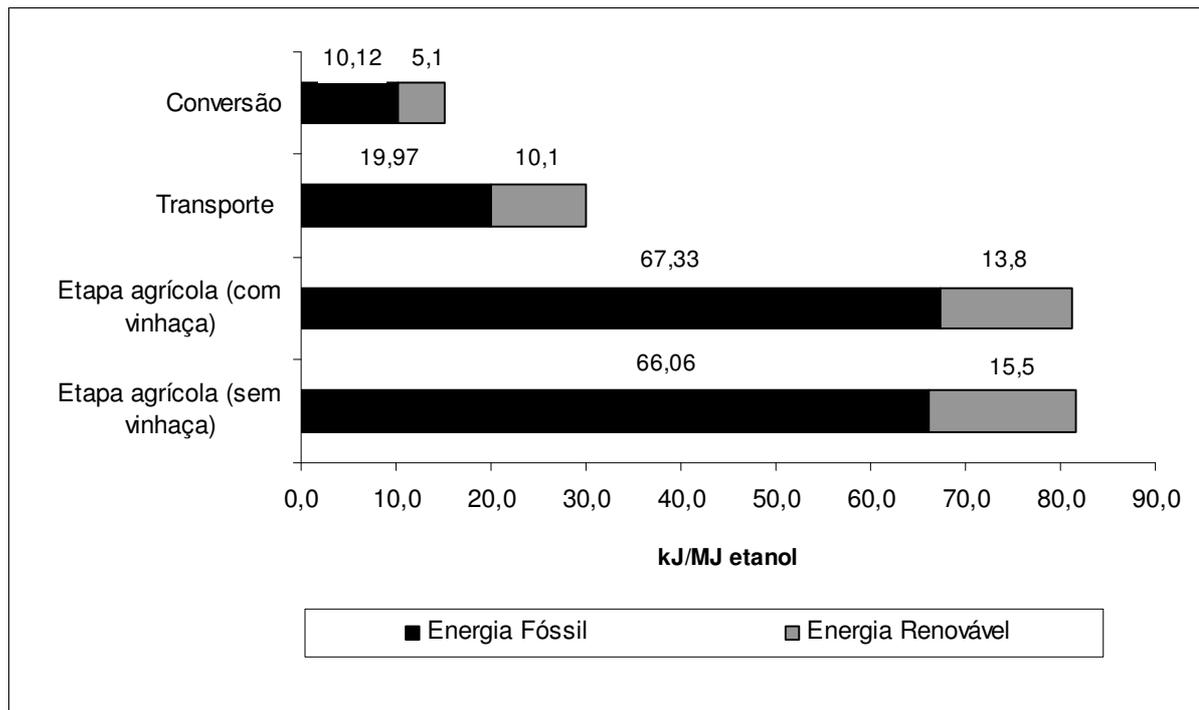


Gráfico 5.4: Contribuição energética de cada etapa na produção de etanol de cana

De maneira geral, o input energético do sistema produtivo do etanol foi contabilizado em $120,3 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$, onde a energia fóssil compõe 80% deste total. O setor de transporte, contribuindo em $22,7 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$, possui a maior participação de fontes fósseis com aproximadamente 90%. Na etapa agrícola verificaram-se valores muito próximos de $82,3 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$ (80% fóssil) e $81,9 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$ (83% fóssil) para adubação convencional e supondo aplicação de resíduos da usina no canavial, respectivamente. A etapa industrial apresenta os menores valores (66%), devido a utilização do bagaço em lugar de óleo combustível para gerar vapor e eletricidade, e pelo elevado input energético de equipamentos, que conta com apenas 60% de energia fóssil.

CAPÍTULO 6. BALANÇO ENERGÉTICO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

Após a caracterização dos sistemas produtivos, neste capítulo serão ilustrados os fluxos de energia e massa dentro das fronteiras do sistema, enfatizando a contribuição energética de cada insumo pelos níveis de regressão considerados. Posteriormente são apresentados os indicadores resultantes da análise, bem como a sensibilidade a que estão sujeitos mediante a variação de alguns parâmetros. Por fim, disserta-se sobre os limites da análise energética verificados ao longo deste estudo.

6.1. Fluxo de energia e massa

Nos Gráficos 6.1 e 6.2 seguintes observam-se os respectivos fluxos nos sistemas produtivos analisados. Em termos mássicos verifica-se que apenas 5,7 kg de soja são necessários para se obter 1,0 kg de biodiesel, e 14,5 kg de cana para se obter 1,0 kg de etanol. Unicamente sob esta perspectiva, produzir biodiesel de soja apresentaria mais vantagens ao etanol de cana, uma vez que, mesmo sendo destinados a diferentes modalidades de transporte, demanda-se menos biomassa para tal, acarretando supostamente menores pressões ao meio. Por outro lado, sob uma perspectiva energética, cabe analisar aonde e como o restante da biomassa foi alocado. Enquanto para o biodiesel, cerca de 82% da massa do grão corresponde ao farelo e às cascas, sendo destinados à alimentação animal e valorados pelos seu poder calorífico, na produção de etanol mais de 80% do bagaço gerado é consumido no próprio processo, tornando nula a contribuição energética do primeiro nível de regressão neste caso. No caso da soja, este nível apresenta valores próximos a $174 \text{ kJ/MJ}_{\text{biodiesel}}$, cerca de 30% do consumo total de energia no sistema. Mesmo assim, uma avaliação mais abrangente do valor energético dos co-produtos, avaliando de forma criteriosa o destino do farelo, poderia acarretar em observações um tanto diferentes.

Na etapa agrícola, atenta-se para a razoável discrepância entre o input energético dos fertilizantes e defensivos registrado na cultura de soja em relação à cana, cujos valores se distanciam ainda mais quando se supõe a aplicação de vinhaça e torta na adubação. A produtividade das culturas (cerca de $3,0 \text{ t}_{\text{grão}}/\text{ha}$ e $85,0 \text{ t}_{\text{cana}}/\text{ha}$) e conseqüente rendimento da biomassa em biocombustível (cerca de $425,0 \text{ L}/\text{ha}_{\text{soja}}$ e $7350,0 \text{ L}/\text{ha}_{\text{cana}}$) justificam tal fato. Da mesma forma os valores referentes às máquinas agrícolas, que na cultura da cana corresponde a uma maior densidade por hectare cultivado e colhido, ao serem balizados em função destes dois parâmetros faz com que seja verificada uma contribuição energética até seis vezes menor associada a este parâmetro.

A contribuição energética da mão-de-obra no cultivo da soja foi contabilizada em valores inferiores ao cultivo da cana. Sabendo que foi adotado o mesmo coeficiente energético em ambos os casos, isto se deu por conta da eficiência de produção dos trabalhadores ($0,7 \text{ hora}/\text{t}_{\text{cana.Homem}}$ e $0,4 \text{ hora}/\text{t}_{\text{grão.Homem}}$) e o rendimento da biomassa em biocombustível. Conforme comentado acima, validar a análise a partir de um mesmo coeficiente para atividades bem distintas, enquanto o cultivo da soja é mecanizado e 50% da

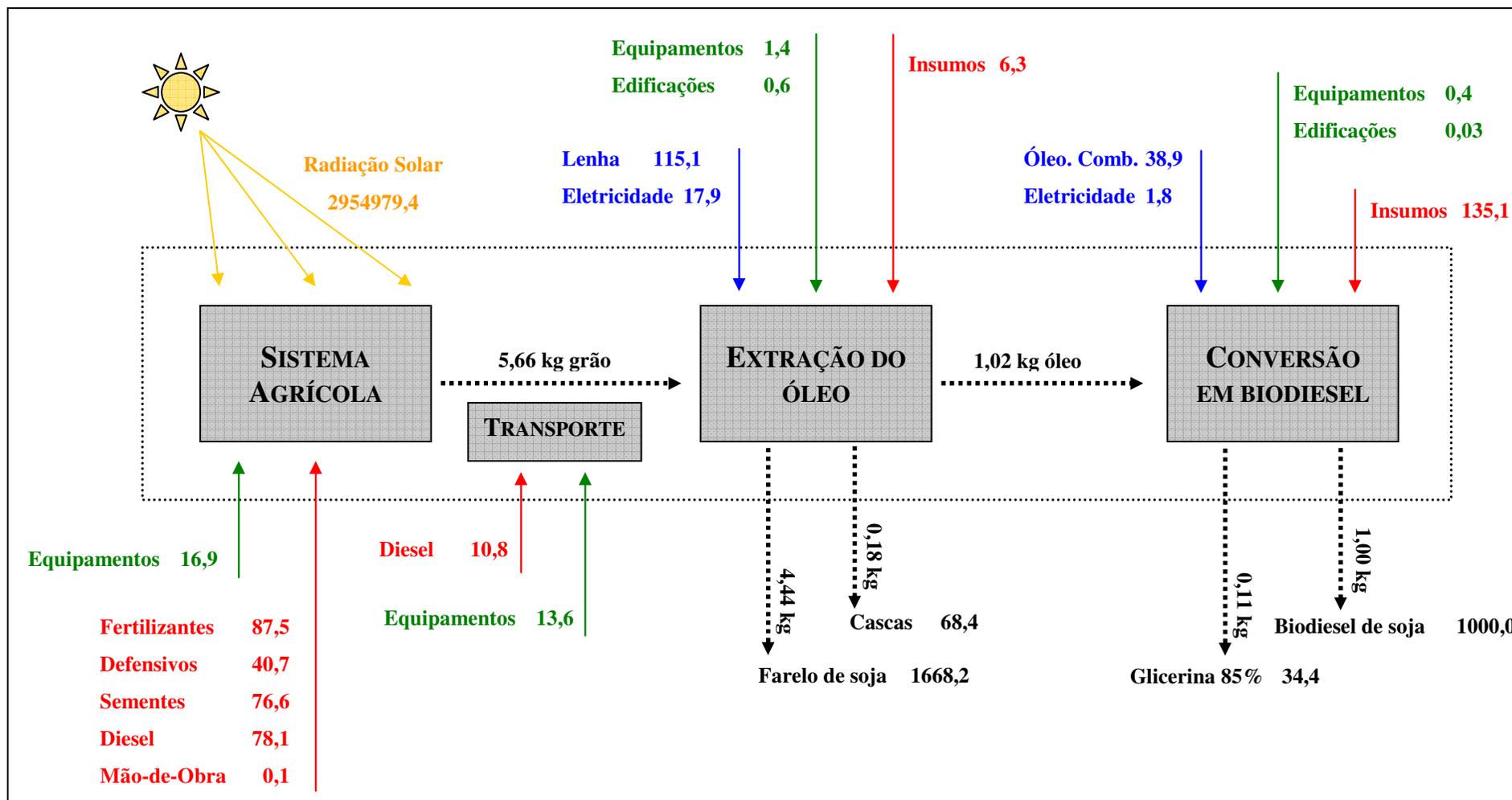


Gráfico 6.1: Fluxo de energia total num sistema de produção de Biodiesel de Soja (Valores em kJ/MJ_{biodiesel})

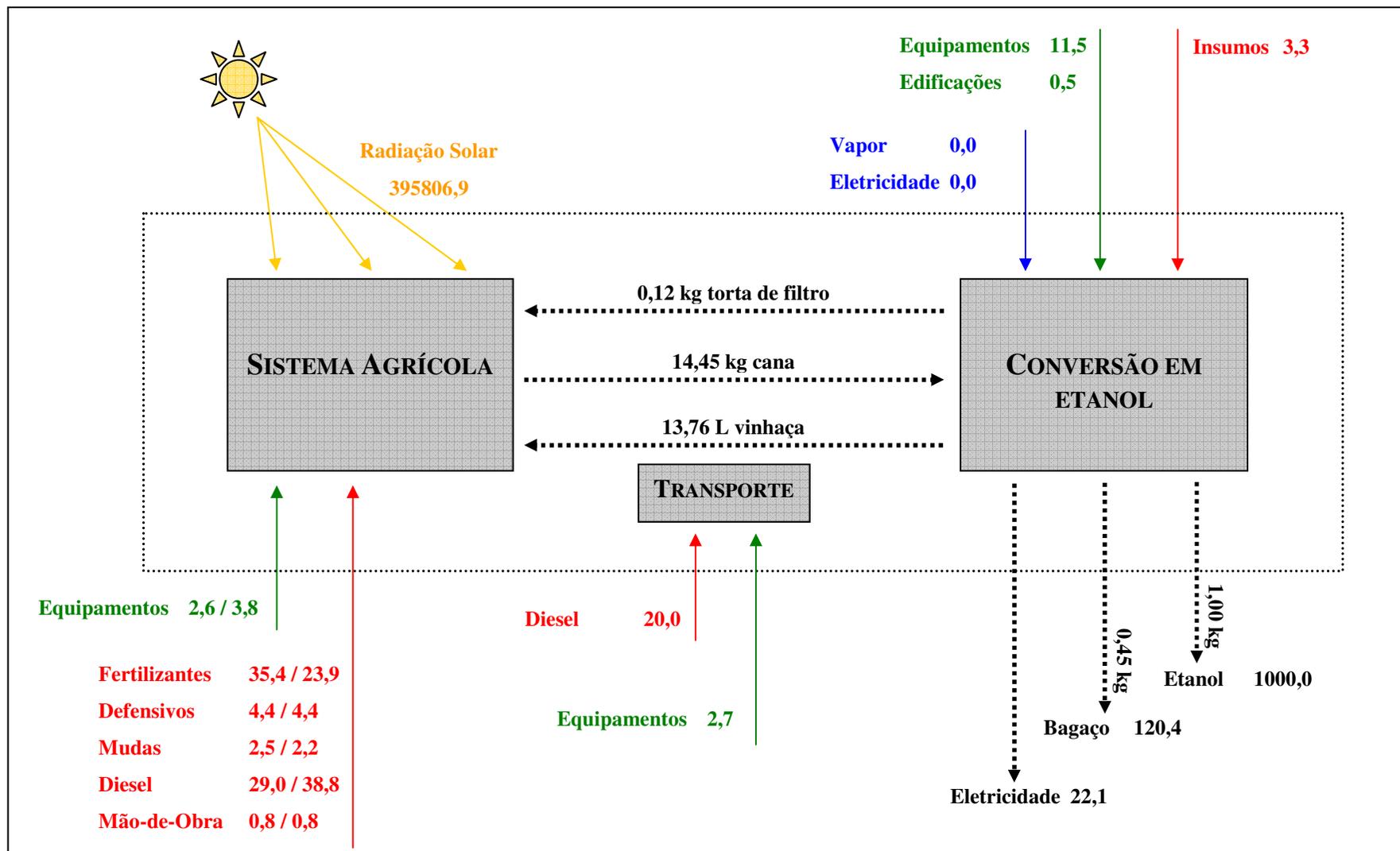


Gráfico 6.2: Fluxo de energia total num sistema de produção de Etanol de Cana-de-açúcar (Valores em kJ/MJ_{etanol})

colheita da cana é feita manualmente, implica em questionamentos pertinentes. Porém, visto a baixa contribuição que este insumo traz para o sistema produtivo como um todo, conforme apresenta outros estudos, supõe-se que a contabilização rigorosa da mão-de-obra passe a ser destinada a abordagens com outros enfoques. No entanto, ao se pretender a consolidação de procedimentos para análises energéticas, visando a comparação direta entre sistemas produtivos distintos, o cálculo do input referente à mão-de-obra também carece de padronização, a partir da qual poderiam ser observadas contribuições mais significativas deste insumo na etapa agrícola destes sistemas. Vê-se, por exemplo, na Tabela 6.1 seguinte que, se ao invés de adotar o coeficiente deste estudo, que contabilizou apenas oito horas trabalhadas, fosse usada a média calórica diária verificada no Brasil, considerando não apenas as horas trabalhadas mas também o consumo energético ao longo do dia, a participação da mão-de-obra no input energético da etapa agrícola aumentaria expressivamente. Estes valores seriam ainda distintos se no consumo energético do trabalhador fosse embutido o gasto com eletricidade, gasolina, etc.

Tabela 6.1: Contribuição energética da mão-de-obra no sistema produtivo analisado com diferentes coeficientes

Coeficiente	Fonte	Aporte energético	
		[kJ/MJ _{biodiesel}]	[kJ/MJ _{etanol}]
2,28 [MJ/Homem.h]	Braga (2008)	0,1 (0,04%)	0,8 (0,95%)
12,9 [MJ/Homem.dia]	FAO (2009), dados médios do consumo calórico no Brasil 2003/05	0,7 (0,24%)	4,4 (5,1%)

Quanto ao aporte energético referente à radiação solar, foram registrados valores distintos para cada cultura, como esperado, devido à eficiência fotossintética característica de cada espécie vegetal. Ao adotar uma taxa média de incidência de radiação de 18,0 MJ/m².dia, foi considerada a produção média da cultura ao longo de um ano (365 dias). Os valores resultantes foram de 772,9 GJ/t_{cana} e 20857,1 GJ/t_{grão}, ou 395,8 MJ/MJ_{etanol} e 2955,0 MJ/MJ_{biodiesel}. Observa-se que numa análise energética, a contabilização deste insumo junto aos outros não traz resultados efetivos devido à ordem de grandeza existente entre eles, apenas ilustra a eficiência da biomassa no processo fotossintético.

No transporte da biomassa até a usina, o que interferiu nos valores estimados foi a modalidade de carga sugerida para este estudo, e comumente verificada nas usinas. Enquanto supunha-se uma carga média de 38 toneladas para a cana, foi usada uma carga de 10 toneladas para a soja. Para carretas com 38 toneladas, a contribuição energética da etapa de transporte do grão de soja reduziria de 24,4 para 16,4 kJ/MJ_{biodiesel}. Já na etapa industrial, o aporte nulo de vapor e eletricidade no processamento da cana justifica a diferença verificada nos inputs dos dois sistemas: enquanto no sistema do etanol registrou-se 15,2 kJ/MJ_{etanol}, para o biodiesel encontrou-se valores de 253,9 kJ/MJ_{biodiesel}.

6.2. Indicadores do sistema

Sintetizando os dados referentes a cada sistema produtivo, alocados ao longo dos fluxos de massa e energia, foram determinados os indicadores explicitados na Tabela 6.2 seguinte. Conforme a metodologia proposta, os indicadores foram divididos em quatro grupos, e foram expressos em termos de energia total e energia fóssil consumida.

No primeiro grupo de indicadores, nos quais se verifica a influência dos níveis de regressão adotados na análise, percebeu-se claramente que a partir do segundo nível as alterações nos resultados diminuem de forma expressiva, o que justifica a tendência em se considerar as fronteiras do sistema até a contribuição energética dos equipamentos e edificações. Especificamente no sistema produtivo do etanol, onde os equipamentos da fase industrial contribuem a maiores valores, a diferença entre o segundo e terceiro nível ficam próximos a 14%.

Tabela 6.2: Indicadores do balanço energético da obtenção de biocombustíveis

Parâmetros	Biodiesel de Soja		Etanol de Cana		
	Energia Total	Energia Fóssil	Energia Total	Energia Fóssil	
Nível de Regressão	Nível de Regressão 1 (I_{NR1})	15,97	67,54	-	-
	Nível de Regressão 2 (I_{NR2})	4,45	7,50	11,09	13,45
	Nível de Regressão 3 (I_{NR3})	4,30	7,25	9,50	12,11
Fronteiras do sistema	Fronteira Agrícola (I_{FRa})	7,94	10,11	124,40 ^a	155,03
	Aporte da Radiação Solar (I_{FRs})	0,001 (0,1%)		0,026 (2,6%)	
	Fronteira na Extração (I_{FRe})	1,09	0,74	-	-
	Fronteira Industrial (I_{FRi})	0,87	0,90	0,11 ^b	0,11
Critérios de Alocação	Exigência nula (I_{An})	1,56	2,62	8,31	10,40
	Alocação por massa (I_{Am})	8,95	15,04	12,08	15,11
	Alocação por energia (I_{Ae})	3,16	5,30	10,71	13,39
	Alocação por valor monetário (I_{Av})	2,93	4,91	8,55	10,69
Fluxo	Indicador líquido de fluxo (I_L)	3,32	6,25	8,50	10,88

a) Para PCI da cana = 20,0 MJ/kg. b) Não foi considerada a saída de vinhaça e torta de filtro.

O valor encontrado para a soja (4,30), referente ao balanço geral (*energia produzida/energia consumida*) do sistema produtivo, aproximou-se do valor publicado por Gazzoni (2006) de 4,75, distanciando-se um pouco do CCAP (2008) de 3,3. Em estudos semelhantes, foram estimados valores de próximos a 5,3 para o biodiesel de dendê (Yáñez, 2008), 2,69 para o biodiesel de girassol (Gazzoni, 2006) e 1,50 para o biodiesel de mamona (Braga et al., 2008). No caso do etanol de cana, o balanço geral (I_{NR3}) foi expresso em valores um pouco acima dos já publicados em outros estudos: Nogueira (1985) estimou 6,4 para energia total e 8,8 considerando apenas energia fóssil, sem adubação com vinhaça e torta; Macedo et al. (2004) publicaram valores de 8,3 a 10,2; e Seabra (2008) chegou a 9,4 apenas para input fóssil. Ao se considerar a adubação do canavial com vinhaça e torta de filtro, o balanço geral do sistema produtivo do etanol alcançou 9,78 por conta da economia de fertilizantes. Embora estes resultados, como verificado, tenham sido obtidos pela mesma formulação, atenta-se para as peculiaridades de cada análise, em termos de fronteiras do sistema, insumos e coeficientes energéticos considerados. Quando apenas o input de origem fóssil é considerado verificou-se que estes os resultados crescem em aproximadamente 30%.

No segundo grupo de indicadores, pretendeu-se verificar o balanço energético em cada etapa considerada na análise, a partir da razão entre a entrada e saída da energia embutida nos insumos e nos produtos. Os resultados determinados apresentaram variações razoáveis, devido às peculiaridades de cada etapa. Observou-se no sistema do biodiesel que os resultados decrescem da etapa agrícola para a etapa industrial, porém em ordem menor que no sistema do etanol, ao considerar o PCI da cana equivalente a 20,0 MJ/kg¹⁷. A grande diferença entre os indicadores da etapa agrícola da soja e da cana está associada à produtividade de cada cultura. Quando o aporte energético devido à radiação solar é englobado no cálculo, os resultados confirmaram a maior eficiência fotossintética da cana em relação à soja por conta, entre outros fatores, das rotas fotossintéticas que cada espécie possui: sabe-se que a cana é uma espécie C4 e a soja, uma espécie C3.

O terceiro grupo de indicadores analisou a variação dos resultados quando parcela da energia consumida era alocada para o produto de interesse, ou seja, o biocombustível, a partir de diferentes critérios. O critério de exigência nula, onde se supõe que toda a energia na entrada é consumida apenas na obtenção do biocombustível, apresentou valores maiores para o etanol de cana (8,31) em comparação ao biodiesel de soja (1,56), mesmo quando se considera somente o aporte de energia fóssil, confirmando a diferença frisada nos estudos de Macedo e Nogueira (2005) de que para cada unidade de energia consumida no sistema produtivo para cada unidade energética de biodiesel obtêm-se cerca cinco vezes mais de etanol.

Ao usar a massa como critério, os resultados entre si não diferem tanto, mas quando são comparados com os resultados obtidos a partir da exigência nula, verifica-se que o biodiesel

17) Este valor foi estimado considerando o PCI do bagaço (7,5 MJ/kg), que corresponde a um terço da energia contida na cana.

de soja é favorecido por conta da elevada quantidade de co-produtos obtida no processo de extração do óleo. O uso deste critério a fim de selecionar a parcela do input energético correspondente à produção de biocombustível pode sujeitar os resultados finais a variações expressivas, por conta aspectos do processo em si. Por exemplo, o estudo da CGEE (2005) apud BNDES (2008) apresenta a variação da massa de bagaço excedente em função dos parâmetros do sistema de cogeração característico da usina de etanol. O Gráfico 6.3 ilustra o desvio dos resultados em relação ao valor estimado por este estudo, frente a diferentes pressões e temperaturas do sistema. Sabe-se que aumentando a pressão, geram-se mais excedentes de energia elétrica, consumindo-se mais bagaço, e conseqüentemente mais perdas (inevitáveis na conversão termelétrica). Portanto essas diferenças evidenciaríamos as limitações da análise energética e deste critério de alocação no tratamento dos sistemas combinados de produção de energia elétrica e calor útil, que podem ser melhor avaliados mediante análises exergéticas.

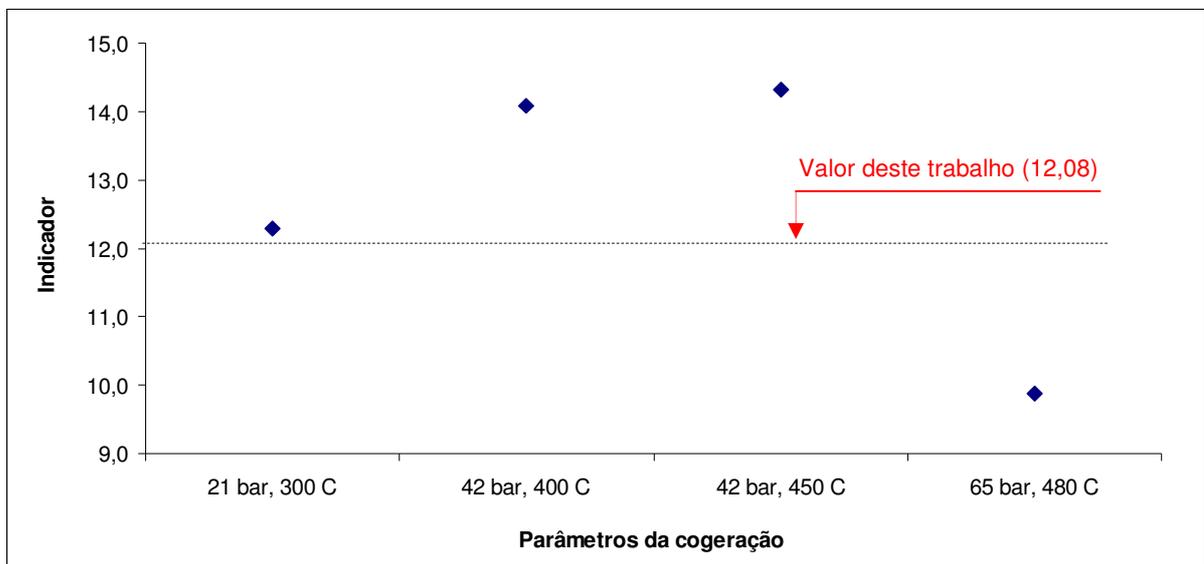


Gráfico 6.3: Variação do indicador I_{AE} (energia total) em função da alocação por massa para o sistema produtivo de etanol de cana

Por outro lado, na alocação por energia obtêm-se resultados sem muitas variações. Neste trabalho, os indicadores obtidos distanciaram-se 2,0 e 1,2 vezes para o biodiesel e etanol, respectivamente, quando se supõe exigência nula. Isso se dá, pois além do sistema produtivo de biodiesel possuir mais de um co-produto, seu poder calorífico não distancia tanto do poder calorífico do farelo, cascas e glicerina, em comparação com o etanol e bagaço.

A alocação por valor monetário também está sujeita a variações quando o preço dos produtos e co-produtos oscila em função do mercado. Considerando valores médios atuais¹⁸,

18) O indicador resultante por este critério, apresentado na Tabela 6.2 acima, e correspondente à variação 0%, foi calculado a partir dos seguintes valores:

- Preço do Bagaço de cana: R\$ 30,00/t, segundo dados da UDOP.

este indicador foi estimado em 2,93 e 8,55 para o biodiesel de soja e etanol de cana, respectivamente. A partir do acréscimo ou decréscimo percentual do preço dos produtos obtidos, foram estimadas as possíveis oscilações do indicador, como ilustra o Gráfico 6.4 abaixo.

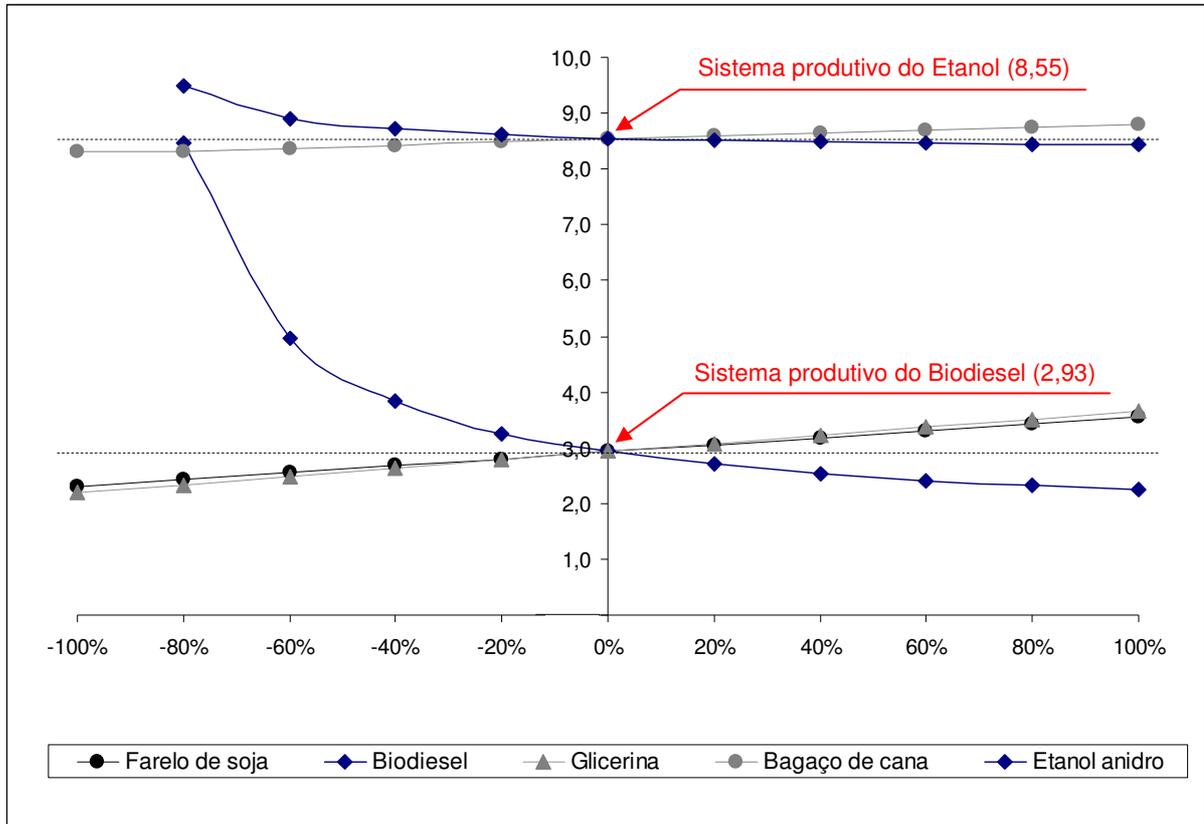


Gráfico 6.4: Variação do indicador I_{AE} (energia total) em função da alocação por valor monetário para os sistemas produtivos de biodiesel de soja e etanol de cana

De maneira geral, a variação dos preços entre produtos e co-produtos apresenta desenhos inversos: o aumento do indicador, mais sensível com o decréscimo no preço do produto principal – ao ser alocado menos energia para a obtenção de um mesmo volume de biocombustível – se dá também com o acréscimo no preço dos co-produtos; e vice-versa. Mesmo assim, ao etanol de cana são atribuídos os maiores indicadores, porém atenta-se para o fato do decréscimo do preço do biodiesel, embora improvável acima de 80%, resultar em valores próximos ao etanol.

- Preço à vista do Etanol anidro: R\$ 0,85/kg (média jan a out/09 – CEPEA), com densidade média de 0,8 kg/L.
- Preço do Biodiesel de soja: R\$ 1,70/L (média dos leilões – ANP), com densidade média de 0,8 kg/L.
- Preço do Farelo de soja: R\$ 845,00/t (média jan a out/09 – CEPEA).
- Preço da Glicerina bruta (80% de pureza): R\$ 1000,00/t (estimativa a partir dos dados da CFR Rotterdam).

A amplitude das oscilações é visivelmente maior para o sistema produtivo do biodiesel, quando o preço dos dois co-produtos (farelo de soja e glicerina) não é muito abaixo do produto principal. No caso do sistema produtivo de etanol, as pequenas oscilações apresentadas dão-se devido à elevada valorização do etanol frente ao bagaço, cujo preço é cerca de 30 vezes menor. Vê-se, por isso, que o indicador resultante a partir deste critério (8,55) aproxima-se quando se adota a alocação por exigência nula (8,31).

O indicador de fluxo líquido, como foi denominado, apresenta uma visão comparativa mais consolidada ao contabilizar o quanto de energia líquida é obtida em função de energia que consumida pelo sistema. A partir dos resultados, verifica-se que o sistema produtivo do etanol de cana produz mais que o dobro de energia que o sistema de biodiesel de soja, isto é, para cada unidade de energia fóssil que entra no sistema da soja obtém-se 3,3 unidades de energia embutida no biocombustível e co-produtos, enquanto o sistema da cana apresenta valores de 8,5 unidades.

6.3. Análise de sensibilidade

Neste tópico procurou-se ilustrar a variação dos resultados finais em função dos parâmetros considerados. Conforme apresentado nos gráficos seguintes, estas variações foram expressas nos termos do balanço energético geral do sistema (I_{NR3}).

Facilmente é verificada a influência que certos parâmetros, como a produtividade da cultura ou a mecanização da lavoura, causariam no resultado final. Porém, nos Gráficos 6.5 e 6.6, atenta-se para a amplitude das variações que a simples adoção de coeficientes energéticos distintos proporcionaria aos indicadores. Estes coeficientes consistem em parâmetros fundamentais para uma análise energética, pois permitem transformar a quantidade demandada de insumos numa mesma unidade de comparação. Como são resultantes de análises energéticas, a variação entre eles é justificada pelos fatores que estão sendo discutidos ao longo deste trabalho, como fronteiras do sistema, nível de regressão dos insumos considerados e características do processo industrial.

Observa-se destes gráficos, que o balanço geral do sistema produtivo do biodiesel de soja, a partir de uma mesma base de dados, poderia ser expresso entre 3,8 e 5,0; e para o etanol, o indicador poderia ser estimado entre 8,4 e 11,8. Isso se daria quando os maiores ou menores coeficientes fossem adotados simultaneamente nas análises, o que é provável. Mesmo assim, os resultados para a cana apresentaram melhores desempenhos. Enquanto na soja, os fertilizantes (exceto nitrogênio) corresponderam a maior variação, por conta da quantidade demandada; na cana, o diesel também sinaliza uma razoável influência nos resultados.

A padronização dos coeficientes usados em análises energéticas talvez seja um dos primeiros tópicos a ser abordado ao se propor uma metodologia consolidada de análise. Porém observam-se algumas limitações neste sentido, que se resumem na dificuldade de

definir um processo padrão de obtenção dos insumos, bem como os procedimentos para o cálculo do coeficiente. Sob esta perspectiva, a fim de que a análise retrate, na extensão possível, situações reais, caberia verificar a origem dos insumos contabilizados, isto é, se é obtido da indústria nacional com processos industriais característicos, junto a uma matriz energética composta por parcelas significativas de energia renovável; ou se é importado de outros países que usam processos distintos, e possivelmente um aporte maior de energia fóssil. No caso de fertilizantes, por exemplo, sabe-se de acordo com a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) que o Brasil importa mais de 60% deste insumo, porém o Governo Federal tem incentivado por meio de programas a diminuição deste percentual. Este fato poderia alterar os indicadores de sistemas produtivos com grande aporte de adubo mineral, por conta de eventuais alterações no ciclo de vida do produto, tanto no processo industrial quanto do transporte, etc. A atualização destes dados é fundamental quando muitas análises atuais baseiam-se em dados ultrapassados, e que eventualmente responderiam pelas distorções nos resultados.

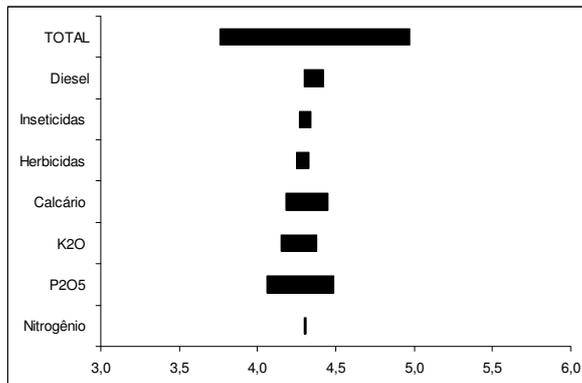


Gráfico 6.5: Variação do I_{NR3} por coeficiente energético adotado no sistema da soja

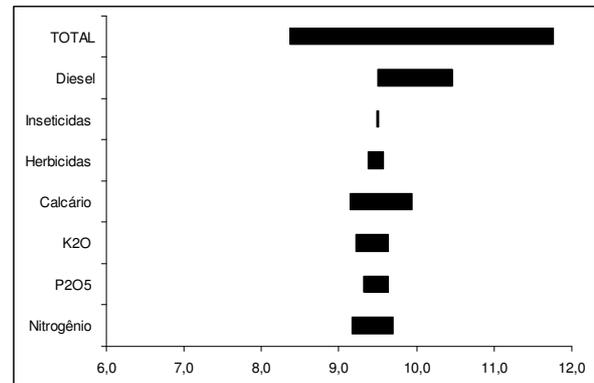


Gráfico 6.6: Variação do I_{NR3} por coeficiente energético adotado no sistema da cana

Quando se variam parâmetros associados ao processo e ciclo de vida do produto (Gráficos 6.7 e 6.8), observaram-se desvios de amplitudes maiores, especialmente por conta da produtividade da cultura. No caso da cana, a distância do transporte da biomassa até a usina, rendimento em etanol, mecanização e aporte de nitrogênio também implicaram em variações consideráveis, muito embora, também tenha sido verificado que em todos os casos, os melhores desempenhos associam-se ao etanol de cana.

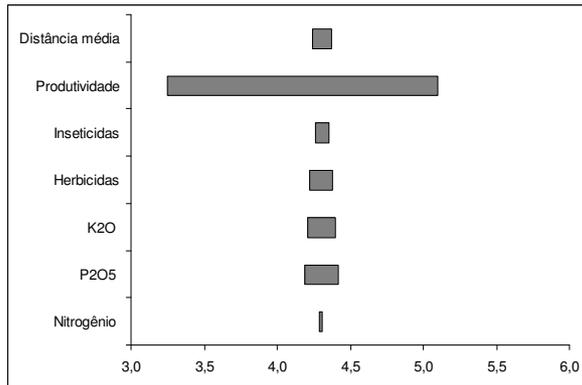


Gráfico 6.7: Variação do I_{NR3} por outros parâmetros no sistema da soja

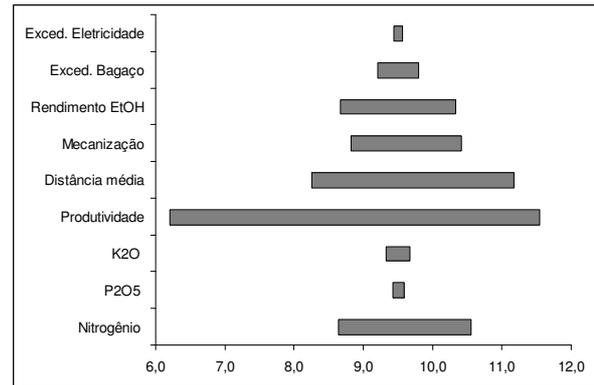


Gráfico 6.8: Variação do I_{NR3} por outros parâmetros no sistema da cana

6.4. Valoração energética dos co-produtos

Até aqui as limitações da análise energética, traduzidas nas possíveis variações de seus resultados têm sido discutidas sob uma perspectiva talvez mais limitada e ineficiente ainda, isto é, a partir de como são valorados energeticamente os co-produtos. A geração destes no processo de obtenção de biocombustíveis é geralmente inevitável, e muitas vezes em maior quantidade que o próprio combustível em si, como se observa no caso do biodiesel de soja, onde se gera 1,0 kg de biodiesel junto com 4,44 kg de farelo.

No balanço energético apresentado acima, valoraram-se os co-produtos a partir de seus poderes caloríficos o que, como discutido, revela uma visão distorcida da realidade, pois nem sempre estes são destinados à geração de energia direta. Neste sentido, o correto seria associar aos co-produtos a energia correspondente à sua real finalidade. Sabe-se, por exemplo, que o farelo é largamente usado na alimentação animal por ser rico em proteínas. A energia atribuída a este co-produto poderia corresponder à energia usada para produzir ração de outras fontes, e que eventualmente o farelo substituiria. Por sua vez, a glicerina gerada no processo industrial é geralmente demandada pelo setor cosmético e fármaco. Deste modo, o coeficiente energético deste co-produto poderia refletir o consumo de energia em processos convencionais para sua obtenção. Esta idéia é a base da alocação por substituição, preconizada pelas normas ISO, porém pouco usada devido a carência de dados referentes a outros processos e procedimentos metodológicos ainda não definidos. Neste sentido, conforme a metodologia, o Gráfico 6.9 seguinte apresenta o desvio dos resultados estimados para o balanço geral do sistema (I_{NR3}) e o fluxo líquido de energia (I_L), por conta da variação do valor energético dos co-produtos num intervalo de $\pm 100\%$.

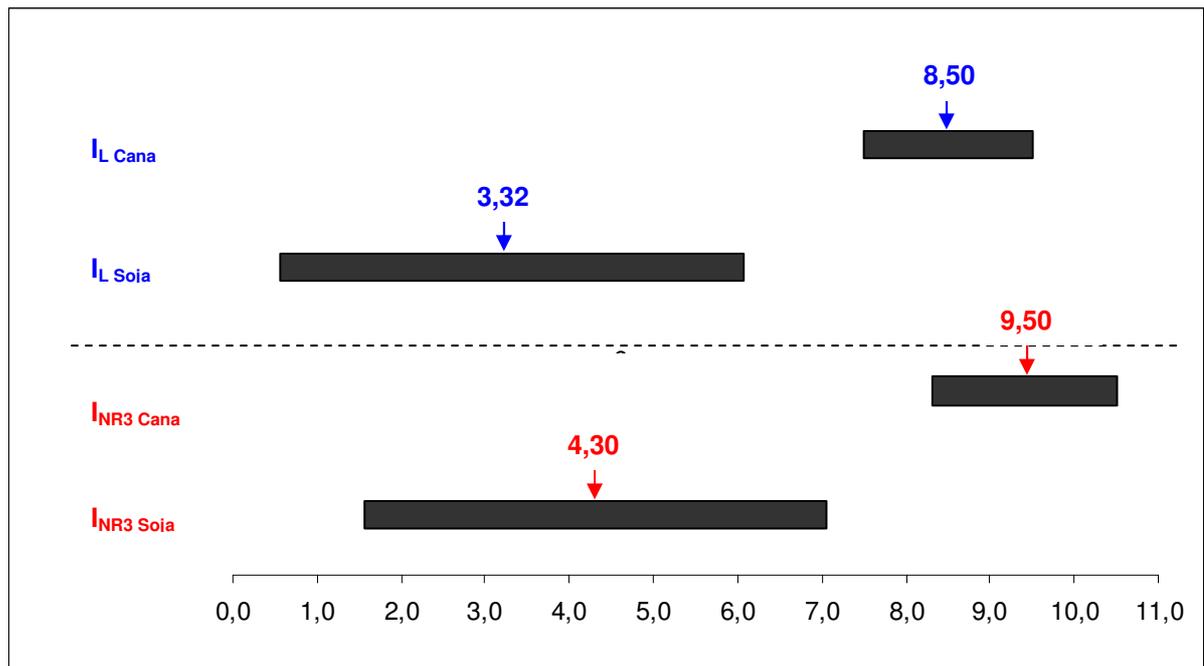


Gráfico 6.9: Variação do I_{NR3} e I_L a partir da valoração energética dos co-produtos

Percebe-se claramente que a valoração dos co-produtos implica em maiores desvios quando comparadas à adoção de coeficientes ou outros aspectos metodológicos, especialmente no sistema produtivo de biodiesel por conta da expressiva massa de co-produtos. Muito embora, os indicadores apresentados no gráfico ainda ilustram o melhor desempenho da cana, porém permitem deduzir a possibilidade de que os resultados finais fiquem mais próximos.

O intervalo de variação adotado, que considera desde a valoração nula do co-produto (-100%) até o uso em processos nos quais fosse contabilizado o dobro do poder calorífico adotado (+100%), deve ser apurado. Se fosse associado à glicerina, por exemplo, o consumo específico de energia no setor químico de 83,4 MJ/kg, conforme os dados do BEN (2008), apenas a variação deste co-produto corresponderia a mais de 500%, alterando os resultados finais em até 10%. Pode-se supor esta ordem de variação para o bagaço quando destinado a processos alternativos como a indústria de papel.

De maneira mais específica, no caso do farelo de soja, ao valorá-lo apenas a partir de seu conteúdo calórico não é considerada a importância de seus elementos constituintes, isto é, a função das proteínas que corresponde grande parte do farelo tem outras funções estruturais além de ser convertida em energia. A contabilização da qualidade do co-produto em função de seu destino ampliaria a análise energética, porém eventualmente demandaria a adoção de outros conceitos, e o desenvolvimento de outros procedimentos metodológicos.

PARTE III: CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A partir da análise energética dos sistemas produtivos conduzida neste trabalho, estimou-se um consumo energético global de $641,7 \text{ kJ/MJ}_{\text{biodiesel}}$ e $120,3 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$, isto é, de acordo com os dados contabilizados, demanda-se cerca de cinco vezes mais energia no sistema produtivo do biodiesel para se obter a mesma quantidade energética de biocombustível no sistema produtivo do etanol. A considerável diferença entre as produtividades das culturas e o baixo conteúdo de óleo no grão de soja contribuiu para estes resultados. Quando se considera apenas o input fóssil estes valores decrescem para $382,0 \text{ kJ/MJ}_{\text{biodiesel}}$ e $96,2 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$ respectivamente. Para a adubação da cana a partir da aplicação de vinhaça e torta de filtro, os valores apresentaram pouca variação, estimando-se o consumo de $119,0 \text{ kJ/MJ}_{\text{etanol}}$, quando na etapa agrícola contabilizou-se $159,9 \text{ MJ/t}_{\text{cana}}$, 1,0% a menos que o valor estimado apenas para a adubação convencional. Isso se deu por conta da maior demanda de diesel e de equipamentos compensando a economia em fertilizantes quando se supõe a aplicação dos resíduos da usina no canavial.

A contabilização da mão-de-obra no sistema produtivo apresentou valores ínfimos, quando em ambos os casos foi utilizado o mesmo coeficiente energético. Acredita-se que a adoção de um procedimento mais consolidado para valorar este insumo resulte em contribuições significativas do mesmo, mas ainda em valores pequenos quando comparadas aos fertilizantes e o consumo de diesel. Sugere-se que estudos futuros estimem os coeficientes associados aos trabalhadores na etapa agrícola, ou ao menos os atualizem em vista de trabalhos com outros enfoques ou ainda a fim de confirmar a falta de necessidade em considerar o aporte energético deste insumo em análises energéticas, conforme vários trabalhos já o fazem. Por outro lado, a contabilização da energia solar apenas na etapa agrícola confirmou a eficiência fotossintética da cana frente a soja, não apresentando utilidade efetiva se fosse computada no balanço geral, já que está associada à produtividade da cultura e distancia em ordem de grandeza da contribuição energética dos outros insumos.

Quanto aos indicadores sugeridos para a análise dos sistemas, observou-se que a consideração até o terceiro nível de regressão já garante valores passíveis de comparação por conta da pequena influência que níveis maiores conferem aos resultados finais. Em termos de balanço geral (energia produzida/energia consumida) o biodiesel de soja apresentou valores próximos a 4,30 e o etanol de cana valores de cerca de 9,50. Apenas considerando o input fóssil obtiveram-se valores de 7,25 e 12,11 para o biodiesel e para o etanol, respectivamente. A alocação do input energético total considerando exigência nula aos co-produtos altera os valores estimados no balanço geral, principalmente no caso do biodiesel de soja por conta da grande produção de farelo. Mesmo assim, a partir destes indicadores confirmou-se o maior desempenho da produção de etanol de cana, que apresentou valores de 8,31 e 10,40 (para input fóssil) contra 1,56 e 2,62 (para input fóssil) para o biodiesel de soja. Por outro lado, a utilização de critérios de alocação, cujos resultados variam por conta de características do

processo ou oscilam de acordo com o mercado, não conferem à análise bases sólidas de comparação.

A fim de questionar as limitações da análise energética e propor temas para trabalhos futuros, concluiu-se que a busca de uma metodologia consolidada para este tipo de análise deveria abordar a atualização dos coeficientes energéticos adotados que, como foi verificado, poderia implicar desvios de 15% (sistema produtivo do biodiesel) a 25% (sistema produtivo do etanol) nos resultados finais. Da mesma forma, a contabilização dos equipamentos e das edificações, embora respondam por baixas contribuições energéticas no sistema produtivo, poderia ser analisada com mais cuidado em vista da grande variabilidade que estão sujeitas por conta do layout característico de cada processo.

No entanto, percebe-se que muitas análises energéticas, inclusive a apresentada neste trabalho, eventualmente mascaram os resultados quando supõe o mesmo destino para os produtos e co-produtos, avaliando-os pelo seu poder calorífico, neste caso. Desta forma, ao estimar preliminarmente os desvios provocados nos resultados finais pela valoração energética dos co-produtos, obtiveram-se alterações mais significativas, em até 60% para a soja e 30% para o etanol, por conta da expressiva massa de co-produtos gerados no processamento da soja. Os resultados finais podem se aproximar quando os co-produtos são valorados em função da energia associada a seu destino final, pela substituição de outros insumos em outros processos. Recomenda-se que este aspecto seja estudado com mais cautela a partir da análise de processos alternativos e a consolidação de procedimentos que permitam a alocação por substituição.

Por fim, a padronização dos pressupostos metodológicos associados à análise energética poderia ser estendida à análise de emissões de poluentes, ressaltando as características próprias do procedimento e a complexidade no cálculo dos resultados finais, tendo em vista aspectos importantes e muito discutidos como as questões acerca da mudança do uso da terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOVE. **Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais**. Disponível em: <<http://www.abiove.com.br>> Acesso em junho de 2009.
- AGÊNCIA EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Agropecuária**. Disponível em: <<http://www.cnpia.embrapa.br>> Acesso em junho de 2009.
- AGROBYTE. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agrobyte.com.br>> Acesso em março de 2009.
- ANP. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>> Acesso em julho de 2009.
- AALBORG. **Allborg Industries**. Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/>> Acesso em julho de 2009.
- BAIRD, G., ALCORN, A., HASLAM, P. **The energy embodied in building materials - updated New Zealand coefficients and their significance**. IPENZ Transactions, v.24, n.1, pp. 1997.
- BANCO MUNDIAL. **Banco Mundial**. Disponível em: <<http://www.bancomundial.org.br>> Acesso em maio de 2009.
- BARAL, A., BAKSHI, B. R. **Comparative study of biofuels vs petroleum fuels using input-output hybrid lifecycle assessment**. AICHE, Sustainable Biorefineries Plenary (Invited Papers), 2006.
- BEN. **Balanco Energético Nacional**. 2008. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>> Acesso em julho de 2009.
- BERNESSON, S., NILSSON, D., HANSSON. P. **A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester (RME) under Swedish conditions**. Biomass and Bioenergy, v.26, pp. 545-559, 2004.
- BERTHIAUME, R., BOUCHARD, C. A., ROSENB, M.A. **Exergetic evaluation of the renewability of a biofuel**. Exergy, an International Journal, v.1, n.4, pp. 256–268, 2001.
- BEST, G., EARLEY, J.C., FAAIJ, A.P.C., FRITSCHÉ, U.R., HESTER, A., HUNT, S., IIDA, T., JOHNSON, F.X., KUTAS, G., NASTARI, P.M., OPAL, C.A., OTTO, M., READ, P., SIMS, R.E.H., TRINDADE, S., TSCHIRLEY, J.B., ZARRILLI, S. **A Sustainable Biofuels Consensus**, Itália. Rockefeller Foundation, Bellagio Center, 2008.
- BiodieselBR. **Biocombustíveis: da primeira a quarta geração. 2008**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/destaques/2007/biocombustiveis-primeira-quarta-geracao-10-03-08.htm>> Acesso em Julho de 2009.

- Biofuels. **Conclusões preliminares da Conferência Internacional de Biocombustíveis – São Paulo, Brasil**. 2008. Disponível em: <<http://www.braseuropa.be>> Acesso em junho de 2009.
- BNDES, **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável**. 1ª Edição. Rio de Janeiro. Editora de divulgação do BNDES, 2008.
- BOUSTED, I., HANCOCK, G.F. **Handbook of industrial energy analysis**. 1ª Edição. Chichester Ellis Horwood Publishers, 1979.
- CANDEIA, R. A., FREITAS, J. C. O., CONCEIÇÃO, M. M., SILVA, F. C., SANTOS, I. M. G., SOUZA, A. G. **Análise Comparativa do Biodiesel derivado do Óleo de Soja obtido com diferentes Álcoois**. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006>> Acesso em 2007.
- CCAP. **Biodiesel in Brazil: perspectives and GHG emissions**. Center for Clean Air Policy, 2008.
- CCMS. **Industrial international data base: energy analysis methodology**. Committee on the challenges of modern society, NATO, 1978.
- CEPA. **Detailed California-Modified GREET Pathway for Brazilian Sugar Cane Ethanol**. 2009. California Environmental Protection Agency. Disponível em: <<http://www.calepa.ca.gov/>> Acesso em junho de 2009.
- CEPEA. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada**. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/>> Acesso em julho de 2009.
- CGEE, **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo - Fase 2**. NIPE/UNICAMP e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, Campinas, 2007
- CHERUBINI, F., BIRD, N. D., COWIE, A., JUNGMEIER, G., SCHLAMADINGER, B., WOESS-GALLASCH, S. **Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations**. Resources, Conservation and Recycling, v.53, n.8, pp. 434-447, 2009.
- CLEVELAND, C. J. **Net Energy Analysis**. 2008. Disponível em: <http://www.eoearth.org/article/Net_energy_analysis#> Acesso em março de 2009.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em julho de 2009.
- COSTA, R. E. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel obtido a partir do óleo de palma para as condições do Brasil e da Colômbia**. Dissertação de mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

- COCAMAR. **Cooperativa Agroindustrial Cocamar.** Disponível em: <<http://www.cocamar.com.br/Portal/>> Acesso em julho de 2009.
- CTC. **Centro de Tecnologia Canavieira.** Disponível em: <<http://www.ctc.com.br>> Acesso em maio de 2009. Informações pessoais fornecidas por técnicos.
- DAVIS, S. C., ANDERSON-TEIXEIRA, K. J., DELUCIA, E. V., **Life-cycle analysis and the ecology of biofuels.** Trends in Plant Science, v.14, n.3, pp. 140,146, 2008.
- DEMEYER, A., JACOB, F., JAY, M., MEGUY, G., PERRIER, J. **La conversion bioenergetique du rayonnement solaire et les biotechnologies.** 1a Edição. Technique et Documentation. Paris, 1985.
- DONZELLI, J.L. Uso de fertilizantes na produção de cana-de-açúcar no Brasil. In. Macedo, I.C. (org.), **A Energia da Cana-de-açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade,** UNICA, São Paulo, 2005.
- ECOBILAN. **Energy and GhG balances of biofuels and conventional fuels: Convergences and divergences of main studies.** 2006. Disponível em: <<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>> Acesso em maio de 2009.
- EMBRAPA SOJA. Empresa Brasileira de Agropecuária. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br>> Acesso em julho de 2009.
- ENCINAR, J. M., GONZÁLEZ, J. F., RODRIGUEZ, J. J., TEJEDOR, A. **Biodiesel fuels from vegetables Oils: Transesterification of Cynara cardunculus L. oils with ethanol.** Energy & Fuels, v. 16, n.2, pp. 443-450, 2002.
- FARRELL, A. E., PLEVIN, R. J., TURNER, B. T., JONES, A. D., O'HARE, M., KAMMEN, D. M. **Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals.** Science, v.311, n.5760, pp. 506-508, 2006.
- FERRARI, R. A., OLIVEIRA, V. S., SCABIO, A. **Biodiesel de Soja - taxa de Conversão em ésteres Etilícos, Caracterização Físico-Química e Consumo em Gerador de Energia.** Química Nova, v.28, n.1, pp. 19-23, 2005.
- FORSBERG, G. **Biomass energy transport: Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method.** Biomass and Bioenergy, v.19, n.1, pp. 17-30, 2000.
- FREEDMAN, B., BUTTERFIELD, R.O., PRYDE, E.H. **Transesterification kinetics of soybean oil.** J. Am. Soc. Chem, v.63, n.10, pp. 1375-1380, 1986.
- GAZZONI, D. L., FELICI, P. H. N., CORONATO, R. M. S. **Balanço energético das culturas de soja e girassol para produção de biodiesel.** 2006. 1º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia do Biodiesel, Brasília.

- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 1ª Edição. Porto Alegre. Editora da Universidade UFRGS, 2000.
- IBGE. **Instituto brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em junho de 2009.
- IEA. **Biofuels for Transporte: An International Perspective**. Paris. International Energy Agency, 2004.
- IMF. **Data and statistics**. Disponível em: <<http://www.imf.org>> Acesso em maio de 2008.
- ISO 14041: **Environmental Management—Life Cycle Assessment— Goal and Scope Definition and Inventory Analysis**. International Organization for Standardization; 1998.
- KARIMI, M., RAJABI POUR, A., TABATABAEFFAR, A., BORGHEI, A. **Energy Analysis of Sugarcane Production in Plant Farms: A Case Study in Debel Khazai Agro-industry in Iran**. J. Agric. e Environ. Sci., v.4, n.2, pp. 165-171, 2008
- KIM, S., DALE, B. E. **Allocation Procedure in Ethanol Production System from Corn Grain**. Int. J. LCA, v.7, n.4, pp. 237 – 243, 2002.
- KIM, S., DALE, B. **Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: bioethanol and biodiesel**. Biomass and Bioenergy., v.29, pp. 426-439, 2005.
- KNOTHE, G., GERPEN, J. V., KRAHL, J., RAMOS, L. P. **Manual de Biodiesel**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- KODERA, K. **Analysis of allocation methods of bioethanol LCA**. Internship at CML, Leiden University. 2007. Disponível em: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/students/keiji_kodera/analysis_allocation_methods_bioethanol.pdf> Acesso em maio de 2009.
- LOPES, E. M. **Análise da viabilidade técnica da produção de biodiesel a partir de sebo bovino**. Dissertação de mestrado. Instituto de Recursos Naturais, Universidade Estadual de Itajubá, Itajubá, 2006.
- MACEDO, I. C., LEAL, M. R, L. V., RAMOS DA SILVA, J. E. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 2004.
- MACEDO, I. C., NOGUEIRA, L. A. H. **Biocombustíveis**. Brasília: Cadernos NAE - Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República nº 2 Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, 2004.

- MENICHETTI, E., OTTO, M. Energy Balance & Greenhouse Gas Emissions of Biofuels from a Life- Cycle Perspective. In. **International SCOPE Biofuels Project, Biofuels Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use**. 2009, cap. 5, pp. 81-109. Disponível em: <<http://cip.cornell.edu/biofuels/>> Acesso em junho de 2009.
- MIC. **Produção de Combustíveis Líquidos a partir de Óleos Vegetais**. Ministério da Indústria e do Comércio. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial; Coordenadoria de Informações Tecnológicas, 1985.
- MILLER KLEIN. **Impact of Biodiesel Production on the Glycerol Market**. 2006 Disponível em: <<http://www.ruralsementes.com.br/produtos>> Acesso em julho de 2009.
- MOURAD, A. L. **Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel obtido a partir da Soja**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana-de-açúcar**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.
- NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. 2ª Edição Campinas. Interciência, 2003.
- PIMENTEL, D. **Handbook of energy utilization in agriculture**. 1ª Edição. Florida. Boca Raton : CRC, 1980
- PIMENTEL, D., PATZEK, T. **Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane**. Natural Resources Research, v.16, n.3, pp. 235-242, 2007.
- PIMENTEL, D.; PATZEK, P. **Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower**. Natural Resources Research. v.14, n.1, pp. 65-76, 2005.
- PRAYAS, Initiatives in Health, Energy, Learning and Parenthood. **Jatropha in Horticulture Program of Employment Guarantee Scheme. An Assessment from Small Farmer's Perspective**. India, Resources and Livelihoods Group, 2007.
- RAJAGOPAL, D., ZILBERMAN, D. **Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels**. World Bank. Development Research Group Sustainable Rural and Urban Development, 2007.
- RFA. **Annual Industry Outlook 2008**. Renewable Fuels Association, 2008. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org>>. Acesso em junho de 2008.

- RIRDC, **Sugar Beet Preliminary feasibility of ethanol production from sugar beet in NE Tasmania, Department of Primary Industries.** Water and Environment, Rural Industries Research and Development Corporation, Australian Government, Canberra, 2007.
- ROMANELLI, T. L. **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto.** Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- ROMERO, M. G. C., BUENO, O. C., ESPERANCINI, M. S. T. Eficiência energética e econômica em sistemas familiares de produção de algodão. 2007. VI Congresso Brasileiro de Algodão. Disponível em: <http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/cba6/trabalhos/Agricultura_familiar/Trabalho_AF04.pdf> Acesso em junho de 2009.
- ROSETTO, R. **A cultura da cana, da degradação à conservação.** Visão Agrícola, ESALQ-USP, 2004
- ROYAL SOCIETY. **Sustainable biofuels: prospects and challenges.** 2008. Disponível em: <<http://www.royalsociety.org>> Acesso em maio de 2008.
- SAGAR A. D., KARTHA, S. **Bioenergy and Sustainable Development?** Annual Reviews of Environment and Resources, v.32, pp.131-167, 2007.
- SEABRA, J.E.A. **Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- SHEEHAN, J., CAMOBRECO, V., DUFFIELD, J., GRABOSKI, M., SHAPOURI, H. **Final Report: Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus.** Estados Unidos NREL/SR-580-24089 UC Category 1503, 1998.
- SMIL, V. **General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization,** Wiley, New York, 1991.
- SU, C. L., LEE, Y. M. **Development status and life cycle inventory analysis of biofuels in Taiwan.** Energy Policy, v.37, n.2, pp. 754-758, 2009.
- SWERA. **Data for Solar and Wind Renewable Energy.** 2009. Disponível em : <<http://swera.unep.net/>> Acesso em maio de 2009.
- UDOP. **União dos Produtores de Bioenergia.** Disponível em: <<http://www.udop.com.br/>> Acesso em maio de 2009.
- UNICA. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br>> Acesso em junho de 2009.

- VERBRAECK, A. **Energy analysis – a search for invariance**. Conference reports. Physics in Technology. v.7, n.5, pp. 216-217, 1976.
- WILLIAN, C. **The Future of Biofuels A Global Perspective**. USDA, Amber Waves, v.5, n.5, 2007.
- WILTING, H. C. **An energy perspective on economic activities**. 1996. Disponível em: <<http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/1996/h.c.wilting/>> Acesso em abril de 2009.
- WINROCK. **The impact of expanding biofuel production on GHG emissions**. Winrock International, 2009.
- YÀNEZ, A. E. E. **Avaliação do impacto energético e ambiental da cogeração no balanço energético e no ciclo de vida do biodiesel de óleo de dendê**. Dissertação de mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- ZHANG, Y., DUBÉ, M. A.; MCLEAN, D. D., KATES, M. **Biodiesel production from waste cooking: 1. Process design and technological assessment**. Bioresource Tachnology, v.89, pp. 1-16, 2003.

ANEXO A: Contabilização dos insumos na etapa agrícola

	Insumos	Campo Novo do Parecis		Sapezal		Diamantino		Média aritmética	Aporte energético [MJ/t _{grão}]
		2007/08	2008/09	2007/08	2008/09	2007/08	2008/09		
SOJA	Área cultivada [ha]	2300	2300	2500	2500	1500	1500	2100,0	
	Produtividade [kg/ha]	3120,0	3120,0	3300,0	3120,0	3120,0	3120,0	3150,0	
	Nitrogênio [kg/ha]	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	1,0	17,94
	P2O5 [kg/ha]	72,0	80,0	80,0	80,0	72,0	81,0	77,5	233,73
	K2O [kg/ha]	72,0	86,4	98,0	86,4	82,4	81,0	84,4	200,87
	Calcário [kg/ha]	500,0	500,0	375,0	500,0	750,0	500,0	520,83	165,34
	Herbicidas [kg/ha]	5,4	4,8	6,4	7,1	7,9	7,5	1,70	165,91
	Inseticidas [kg/ha]	2,7	4,7	2,5	2,1	2,5	3,7	1,04	100,68
	Fungicidas [kg/ha]	2,6	2,3	2,2	2,0	1,7	1,7	0,66	20,46
	Sementes [kg/ha]	50,0	50,0	55,0	50,0	50,0	50,0	50,83	540,93
								Input Total	1446,05

CANA-DE-AÇÚCAR Adubação convencional	Insumos		Aporte energético [MJ/t _{cana}]	CANA-DE-AÇÚCAR Adubação com resíduos	Insumos		Aporte energético [MJ/t _{cana}]
	Produtividade [t/ha]	85,0			Produtividade [t/ha]	85,0	
	Nitrogênio [kg/ha]	68,00	45,20		Nitrogênio [kg/ha]	50,00	33,24
	P2O5 [kg/ha]	36,80	4,11		P2O5 [kg/ha]	8,33	0,93
	K2O [kg/ha]	96,20	8,49		K2O [kg/ha]	13,33	1,18
	Calcário [kg/ha]	958,33	11,27		Calcário [kg/ha]	958,33	11,27
	Herbicidas [kg/ha]	2,20	7,98		Herbicidas [kg/ha]	2,20	7,98
	Inseticidas [kg/ha]	0,16	0,58		Inseticidas [kg/ha]	0,16	0,58
	Mudas	-	4,83		Mudas	-	4,81
	Input Total		82,46		Input Total		59,98

ANEXO B: Contabilização dos equipamentos na etapa agrícola e transporte da soja

Maquinário e Implementos [unidade]	Campo Novo		Sapezal		Dimantino		Média	Peso [kg/unidade]	Fonte	Peso Médio [kg]	Vida Útil [Anos]
	2007/08	2008/09	2007/08	2008/09	2007/08	2008/09					
Trator Pequeno	0	1	0	1	0	1	0,5	4000	AGRALE	2000,0	10
Trator Médio	2	1	2	1	2	1	1,5	6000	Estimativa	9000,0	10
Trator Grande	4	2	3	3	3	3	3,0	7000	NH	21000,0	10
Uniport	1	1	1	2	1	1	1,2	6000	JACTO	7000,0	10
Colhedora 23 pés	1	3	1	4	3	3	2,5	14500	NH	36250,0	5
									TOTAL	75250,0	9
Carreta 4 rodas (7t)	1	1	1	1	1	1	1,0	1000	STARA	1000,0	10
Concha dianteira	1	1	1	1	1	1	1,0	200	Estimativa	200,0	10
Distribuidor de calcário (10t)	1	1	1	1	1	1	1,0	3500	STARA	3500,0	10
Grade aradora	1	1	1	1	1	1	1,0	3000	Agri Tillage	3000,0	10
Grade niveladora	1	1	1	1	1	1	1,0	1800	Agri Tillage	1800,0	10
Carreta/Canudo-15 T	1	1	1	1	1	1	1,0	2000	Estimativa	2000,0	10
Plantadora 12 e 15 linhas	3	2	3	3	1	3	2,5	5000	STARA	12500,0	10
Máquina de Tratar Semente		1		1		1	1,0	200	Estimativa	200,0	10
Tanque de Água	1	1	1	1	1	1	1,0	250	Estimativa	250,0	10
									TOTAL	24450	10

Modalidade		Peso Médio [kg]	Densidade [kg/ha]	E. Material [MJ/ha]	E. Fab. [MJ/ha]	Correção [MJ/ha]	E. Rep. [MJ/ha]	E. TOTAL [MJ/ha]	Vida Útil [Anos]	Aporte energético [MJ/t _{grão}]
Operações agrícolas	Tratores + Uniport + Colhedora	75250,0	35,8	1773,8	494,5	1860,0	673,7	2533,6	9	89,4
	Implementos	24450,0	11,6	731,2	100,1	681,7	256,9	938,5	10	29,8
									TOTAL	119,2
Transporte	Caminhões	80000,0	38,1	2392,4	557,7	2419,1	595,9	3015,0	10	95,7
									TOTAL	95,7

ANEXO C: Contabilização dos equipamentos na etapa agrícola e transporte da cana-de-açúcar

Adubação convencional									
Modalidade	Densidade [kg/ha]	E. Material [MJ/ha]	E. Fab. [MJ/ha]	Correção [MJ/ha]	E. Rep. [MJ/ha]	E. TOTAL [MJ/ha]	Vida Útil [Anos]	Aporte energético [MJ/t _{cana}]	
Caminhões (total)	82,4	5174,7	1206,3	5232,5	1289,0	6521,4	10	7,67	
Operações agrícolas	Tratores + Colhedora	41,8	2069,1	576,8	2169,7	785,8	2955,5	9	3,86
	Implementos	12,4	778,7	106,6	726,0	273,6	999,6	10	1,18
								TOTAL	5,04
Transporte	Caminhões (transporte)	-	-	-	-	-	-	TOTAL	5,37^a

a) Foi considerado que 70% do gasto energético com caminhões foi usado no transporte.

Adubação com resíduos (torta e vinhaça)									
Modalidade	Densidade [kg/ha]	E. Material [MJ/ha]	E. Fab. [MJ/ha]	Correção [MJ/ha]	E. Rep. [MJ/ha]	E. TOTAL [MJ/ha]	Vida Útil [Anos]	Aporte energético [MJ/t _{cana}]	
Caminhões (total)	82,4	5174,7	1206,3	5232,5	1289,0	6521,4	10	7,67	
Operações agrícolas	Tratores + Colhedora	41,8	2069,1	576,8	2169,7	785,8	2955,5	9	3,86
	Implementos	12,4	778,7	106,6	726,0	273,6	999,6	10	1,18
	Caminhões (adubação)	-	-	-	-	-	-	-	2,30 ^a
								TOTAL	7,34^a
Transporte	Caminhões (transporte)	-	-	-	-	-	-	TOTAL	5,37^b

a) Foi considerado que apenas 30% do gasto energético com caminhões foi usado na adubação com torta e vinhaça.

b) Foi considerado que apenas 70% do gasto energético com caminhões foi usado no transporte.

ANEXO D: Contabilização do consumo de diesel na etapa agrícola e transporte da soja

Maquinário e Implementos	Campo Novo		Sapezal		Diamantino		Média [h/ha]	L/h	L/ha	L/kg	Aporte energético [MJ/t _{grão}]	
	2007/08	2008/09	2007/08	2008/09	2007/08	2008/09						
Trator Pequeno [hm] ^a		0,078		0,076		0,076	0,08	10,20	0,78	0,25	11,87	
Trator Médio [hm]	0,452	0,785	0,595	0,785	0,075	0,785	0,58	12,40	7,19	2,28	109,04	
Trator Grande [hm]	0,925	0,95	0,4	0,85	0,4	0,85	0,73	21,60	15,75	5,00	239,00	
Uniport [hm]	0,32	0,32	0,297	0,32	0,297	0,32	0,31	15,60	4,87	1,55	73,94	
Colhedora 23 pés [hm]	0,286	0,25	0,286	0,25	0,286	0,25	0,27	28,80	7,72	2,45	117,12	
											TOTAL	550,97

a) Quantas horas a frota da respectiva modalidade leva para trabalhar em um hectare.

Veículo	Distância [km]	Consumo [km/L]	Aporte energético [MJ/t _{grão}]
Caminhão (10 toneladas)	20	2,50	0,076^a
	50	2,50	0,191
	100	2,50	0,382
	150	2,50	0,574

a) Valor usado neste trabalho.

ANEXO E: Contabilização do consumo de diesel na etapa agrícola e transporte da cana-de-açúcar

Maquinário e Implementos		L/ha	Aporte energético [MJ/t _{cana}]
Operações agrícolas (planta) [l/ha]	102,60	127,59	71,75
Operações agrícolas (soca) [l/ha]	9,10		
Colhedora [l/há]	89,25		
Carregadora [l/há]	13,86		
Reboque/transbordo [l/ha]	31,96		
Colheita mecanizada	53%		
Cana crua	40%		

Veículo	Participação [%]	Consumo [km/L]	Consumo [L/t.km]	Distância [km]	[L/t]	Aporte energético [MJ/t _{cana}]
Caminhão Truk (15 ton)	8,0	2,2	0,030	20	0,408	39,03
Caminhão RJ (28 ton)	25,0	1,6	0,022			
Treminhão (45 ton)	67,0	1,2	0,019			
		Média	0,020			

Gastos adicionais quando se supõe a adubação com torta de filtro e vinhaça

Veículo	Cons [km/L]	Carga [t]	Dist [km]	Taxa [t/ha]	[L/h]	[L/t _{ana}]	Aporte energético [MJ/t _{cana}]
Basculante (torta de filtro) (8t)	2,50	8,00	8,00	12,00	9,60	0,11	5,40

	Participação	Cons [km/L]	Carga [m ³]	Dist [km]	Tx [m ³ /ha]	[L/ha]		
Vinhaça (Caminhão)	0,06	2,2	15	7,0	100	42,42		
Vinhaça (Aspersão)	0,63	16	120		150	20,00		
Vinhaça (Aspersão combinado)	0,31	1,3	60	12	100	30,77	[L/t _{cana}]	Aporte energético [MJ/t _{cana}]
					Média	24,68	0,29	13,88

ANEXO F: Resultados finais do sistema produtivo de biodiesel em função dos critérios de alocação

ENERGIA TOTAL			
Entrada	641,7 kJ/MJ _{biodiesel}		
Saída	1000,0 kJ/MJ _{biodiesel}		
Alocação por massa			
	% Massa	kg/kg _{biodiesel}	I_{Am}=8,95
Farelo	0,773	4,44	496,0
Cascas	0,034	0,20	21,8
Glicerina	0,019	0,11	12,3
Biodiesel	0,174	1,00	111,7
		5,745	641,7
Alocação por energia			
	% Energia	CE (MJ/kg)	I_{Ae}=3,16
Farelo	0,19	15,0	118,9
Cascas	0,17	13,8	109,4
Glicerina	0,15	12,2	96,7
Biodiesel	0,49	39,95	316,7
		80,95	641,74
Alocação por valor monetário			
	% \$	R\$/kg	I_{Avm}=2,93
Farelo	0,214	0,85	137,1
Cascas	0,003	0,01	1,6
Glicerina	0,251	1,00	161,2
Biodiesel	0,533	2,12	341,8
		3,98	641,7

ENERGIA FÓSSIL			
Entrada	382,0 kJ/MJ _{biodiesel}		
Saída	1000,0 kJ/MJ _{biodiesel}		
Alocação por massa			
	% Massa	kg/kg _{biodiesel}	I_{Am}=15,04
Farelo	0,773	4,44	295,23
Cascas	0,034	0,20	12,97
Glicerina	0,019	0,11	7,31
Biodiesel	0,174	1,00	66,49
		5,745	382,0
Alocação por energia			
	% Energia	CE (MJ/kg)	I_{Ae}=5,30
Farelo	0,19	15,0	70,79
Cascas	0,17	13,8	65,12
Glicerina	0,15	12,2	57,57
Biodiesel	0,49	40,0	188,53
		80,95	382,01
Alocação por valor monetário			
	% \$	R\$/kg	I_{Avm}=4,91
Farelo	0,214	0,85	81,58
Cascas	0,003	0,01	0,96
Glicerina	0,251	1,00	95,98
Biodiesel	0,533	2,12	203,48
		3,98	382,0

ANEXO G: Resultados finais do sistema produtivo de etanol (sem vinhaça e torta) em função dos critérios de alocação

ENERGIA TOTAL			
Entrada	120,3 kJ/MJ _{etanol}		
Saída	1000,0 kJ/MJ _{etanol}		
Alocação por massa			
	% Massa	kg/t _{cana}	I_{Am}=12,08
Eletricidade	-	-	-
Bagaço	0,312	31,4	37,5
Etanol	0,688	69,2	82,8
		100,6	120,3
Alocação por energia			
	% Energia	CE (MJ/kg)	I_{Ae}=10,71
Eletricidade	0,02	0,6	2,1
Bagaço	0,21	7,50	24,8
Etanol	0,78	28,2	93,4
		36,34	120,3
Alocação por valor monetário			
	% \$	R\$/kg	I_{Avm}=8,55
Eletricidade	-	-	-
Bagaço	0,028	0,03	3,3
Etanol	0,972	1,06	117,0
		1,09	120,3

ENERGIA FÓSSIL			
Entrada	96,2 kJ/MJ _{etanol}		
Saída	1000,0 kJ/MJ _{etanol}		
Alocação por massa			
	% Massa	kg/kg _{biodiesel}	I_{Am}=15,11
Eletricidade	-	-	-
Bagaço	0,312	31,4	30,0
Etanol	0,688	69,2	66,2
		100,6	96,2
Alocação por energia			
	% Energia	CE (MJ/kg)	I_{Ae}=13,39
Eletricidade	0,02	0,6	1,6
Bagaço	0,21	7,50	19,8
Etanol	0,78	28,2	74,7
		36,34	96,2
Alocação por valor monetário			
	% \$	R\$/kg	I_{Avm}=10,69
Eletricidade	-	-	-
Bagaço	0,028	0,03	2,6
Etanol	0,972	1,06	93,5
		1,09	96,2

Dados de energia: PCI do bagaço com 50% de umidade é equivalente a 7,5 MJ/kg (AALBORG, 2009).