Estudos EPE

POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO_2 EM PROJETOS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Empresa de Pesquisa Energética

GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME/SPE

Ministério de Minas e Energia
Ministro
Edison Lobão

Secretário-Executivo
Marcio Pereira Zimmermann

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético
Altino Ventura Filho

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis Renováveis
José Lima de Andrade Neto

Diretor do Departamento de Combustíveis Renováveis
Ricardo de Gusmão Dornelles

Estudos EPE

POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO_2 EM PROJETOS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente
Mauricio Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos
Amilcar Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica
José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível
Gelson Baptista Serva

Diretor de Gestão Corporativa
Ibanês César Cássel

Coordenação Geral
Mauricio Tiomno Tolmasquim
Gelson Baptista Serva

Coordenação Técnica
Frederico Ventorim

Equipe Técnica EPE
Angela Oliveira da Costa
Luciano Basto Oliveira

Equipe Técnica FBDS
Agenor O. F. Mundim
Hélcio Blum
José Roberto Moreira
Marcelo Costa Almeida

URL: http://www.epe.gov.br
Sede
SAN – Quadra 1 – Bloco "B" – 1º andar
70051-903 - Brasília – DF
Escritório Central
Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar
20090-003 - Rio de Janeiro – RJ

Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável

APRESENTAÇÃO

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE, empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME, instituída pela Lei n° 10.847, de 15 de março de 2004, tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como os associados a fontes energéticas renováveis e biocombustíveis.

Ao dar início ao "Estudo do Emprego de Créditos de Carbono em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis no Brasil com Base no Protocolo de Quioto", a EPE definiu como escopo a obtenção de três produtos inter-relacionados: (1) Condições Gerais do Protocolo de Quioto Aplicáveis a Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis; (2) Potencial de Obtenção de Créditos de Carbono em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis e; (3) Guia para Aplicação de Projetos de Biocombustíveis ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Os supracitados produtos, finalizados em 2007, constituíram-se em serviços contratados pela EPE à Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável - FBDS.

A elaboração do estudo desenvolveu-se contando com o apoio e participação da equipe da Área de Biocombustíveis – SGB-DPG/EPE e de técnicos da FBDS, sob a coordenação da EPE.

O segundo relatório elaborado pela FBDS visa estimar o potencial de obtenção de créditos de carbono em projetos de biocombustíveis líquidos, nomeadamente etanol e biodiesel, para a substituição de combustíveis de origem fóssil, respectivamente gasolina e diesel de petróleo.

Avalia-se o potencial de redução de emissões de CO_2 de projetos de produção e uso de biodiesel e álcool etílico, de acordo com as principais culturas (cana de açúcar, dendê, mamona e soja) e modos de produção.

O estudo do balanço energético e de emissões na produção e uso-final dos biocombustíveis ora elaborado utiliza técnicas de avaliação do ciclo de vida, com a quantificação da energia gasta em todas as etapas de produção de cada insumo (*input*), e das suas correspondentes emissões, e a comparação com o conteúdo energético disponibilizado para o uso final do produto (*output*).

RESUMO EXECUTIVO

A comunidade científica internacional vem demonstrando haver uma correlação positiva entre o aumento da concentração de gases causadores do efeito estufa (GEE) e o aumento médio da temperatura do planeta. A queima de combustíveis líquidos fósseis em motores de combustão interna é uma das principais fontes causadoras desse aumento, pois nela são liberados GEE para a atmosfera, principalmente o gás carbônico, fato que tem sido motivo de crescente preocupação em nível mundial.

A predominância dos combustíveis de origem fóssil na matriz de transportes brasileira é ainda significativa, a despeito de o país ser, inquestionavelmente, um exemplo mundial na implementação de programas de biocombustíveis. No Brasil, em 2005, o setor de transportes consumiu 26,7 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tEP) de óleo diesel (54,5%), 13,6 milhões de tEP de gasolina pura (27,8%), 4,1 milhões de tEP de etanol anidro (8,4%), 2,9 milhões de tEP de etanol hidratado (5,9%) e 1,7 milhões de tEP de gás natural (3,4%) (BRASIL, 2006).

As enormes perspectivas de crescimento da participação dos biocombustíveis (especialmente etanol e biodiesel) na matriz energética de transportes impõem a necessidade de conhecer com precisão o perfil ambiental destes produtos. No caso dos combustíveis derivados de biomassa renovável, a quantidade de dióxido de carbono emitida na combustão é compensada pela absorção deste gás através da fotossíntese no crescimento da plantação energética da espécie vegetal, desde o plantio até a colheita. Entretanto, tanto na produção da biomassa como na produção do etanol e do biodiesel, são consumidas substâncias e materiais que utilizaram recursos fósseis nas suas etapas de extração, produção e transporte até o ponto de consumo.

Através da fotossíntese são produzidas plantas como a cana-de-açúcar, a soja, a mamona, a palma africana (dendê), a mandioca, o babaçu, o eucalipto, o pinus e outras espécies vegetais das quais é possível a produção de biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos por meio de diferentes processos de conversão, economicamente adequados a cada aplicação, como o etanol, o biodiesel, o metanol da madeira, o carvão vegetal, o biogás e o hidrogênio. Cada uma das alternativas tecnológicas está associada a um rendimento energético vinculado às condições em que ela é empregada. Em se tratando de biomassa, a eficiência energética do sistema está na sua origem vinculada à capacidade das plantas em converter a energia do sol em carboidratos, que está ligada, principalmente, a dois fatores – a fisiologia das plantas e as condições edafoclimáticas.

O ciclo de vida dos combustíveis, sejam eles derivados fósseis ou da biomassa, pode ser considerado um sistema energético. Suas atividades de extração, transporte, processamento, distribuição e uso final podem acarretar significativos impactos ambientais. O ciclo de vida de um produto se inicia quando os recursos naturais para sua produção são extraídos da sua origem e termina quando os materiais, resíduos e emissões retornam ao meio ambiente.

Os estudos comparativos entre as emissões oriundas do uso do etanol e da gasolina e entre as do biodiesel e do diesel de petróleo devem, assim, considerar todo o ciclo de vida dos respectivos combustíveis. Através desta análise é possível determinar de forma mais precisa a real contribuição dos diferentes tipos de biocombustível para a mitigação do efeito estufa.

O objetivo geral do presente estudo é o de avaliar o potencial de redução de emissões de CO_2 de projetos de produção e uso de biodiesel e álcool etílico, de acordo com as principais culturas (cana de açúcar, dendê, mamona e soja) e modos de produção. O estudo do balanço energético e de emissões na produção e uso-final dos biocombustíveis em questão usa, parcialmente, as técnicas de avaliação do ciclo de vida. Nele é feita a identificação de cada insumo (*input*), com a quantificação da energia gasta em cada etapa de produção e das suas correspondentes emissões, e a comparação com o conteúdo energético disponibilizado para o uso final do produto (*output*).

A primeira atividade deste trabalho consistiu na pesquisa bibliográfica para a identificação de trabalhos referentes ao tema, no Brasil e no Exterior. Muitos estudos de avaliação do ciclo de vida de biocombustíveis foram elaborados no mundo. A maioria deles conduzidos em países no hemisfério norte, principalmente Estados Unidos, Canadá e Europa, e não está relacionada especificamente aos combustíveis analisados neste trabalho. Isto se deve principalmente ao fato de não haver o cultivo de cana de açúcar, mamona e dendê no hemisfério norte, bem como à utilização de metanol no processo de transesterificação, em lugar do etanol.

O sistema de produto construído para este estudo inclui os seguintes subsistemas:

- Fases Agrícolas das lavouras de cana-de-açúcar, palma, soja e mamona;
- Fases Industriais de obtenção do etanol e de extração dos óleos vegetais;
- Fase de Uso dos diferentes tipos de biodiesel como combustível veicular.

O balanço final de energia (saída/entrada) permite verificar quantas unidades de energia são disponibilizadas para uso-final, em relação às unidades de energia consumidas para sua obtenção, não sendo computadas as energias de ocorrência natural, como a solar. Por este motivo, o balanço energético de biocombustíveis têm grande vantagem sobre os balanços de combustíveis fósseis, especialmente aqueles derivados de espécies vegetais com alta eficiência fotossintética, como a cana-de-açúcar.

De acordo com MACEDO et al. (2004), o balanço de energia na produção do etanol, obtido dos dados médios do setor sucro-alcooleiro da região Centro-Sul do Brasil, foi de 8,3 (saída 24,31 MJ/litro etanol para entrada 2,92 MJ/litro etanol) – cenário 1. Se consideradas apenas as usinas detentoras das melhores práticas do setor, o balanço de energia é de 10,2 (saída 27,54 MJ/litro etanol para entrada de 2,70 MJ/litro etanol) – cenário 2.

As emissões evitadas[1] pelo uso do etanol como combustível veicular no Brasil, álcool etílico anidro e álcool etílico hidratado carburantes, calculadas em $kgCO_2eq/L$, a partir dos resultados em kcal/tC de MACEDO et al. (2004) foram:

- Cenário 1 – Média atual do setor
  - 2,564 kg CO_2 eq / litro de etanol anidro;
  - 1,722 kg CO_2 eq / litro de etanol hidratado.

- Cenário 2 - Melhores práticas
  - 2,716 kg CO_2 eq / litro de etanol anidro;
  - 1,867 kg CO_2 eq / litro de etanol hidratado.

As emissões evitadas resultantes da adição de etanol à gasolina pura, não são provavelmente elegíveis a créditos de carbono, por serem obrigatórias por lei nacional. Entretanto, o deslocamento do consumo de gasolina tipo C pelo álcool hidratado, decorrente da tecnologia *Flex-Fuel*, não sofre este impedimento. A emissão de gases de efeito estufa (GEE) da gasolina tipo C é reduzida pelo teor de álcool anidro adicionado, atualmente de 23%. Deste modo, a emissão de GEE da gasolina tipo C:

- 2,264 $kgCO_2eq/L$ – Cenário 1; e
- 2,254 $kgCO_2eq/L$ – Cenário 2.

A emissão do álcool etílico hidratado é de

- 0,389 kgCO2eq/L – Cenário 1; e
- 0,348 $kgCO_2eq/L$ – Cenário 2.

Portanto, para o cenário 1 que corresponde à média atual do setor sucroalcooleiro, as emissões evitadas por litro de álcool etílico hidratado, potencialmente elegíveis como créditos de carbono, seriam de:

- 1,196$kgCO_2eq$ álcool hidratado – Cenário 1; e
- 1,230$kgCO_2eq/L$ álcool hidratado – Cenário 2.

Os balanços de energia apresentados neste relatório, e calculados a partir de MACEDO et al. (2004), VIANNA (2006), MARZULLO (2006) e ALMEIDA NETO (2004) para o biodiesel etílico, foram de 9,7 quando utilizado óleo de palma, 2,7 para óleo de soja e 1,26 para óleo de

[1] Em relação à quantidade de gasolina pura substituída, cuja emissão no ciclo de vida é de 2,82$kgCO_2eq/L$.

mamona. Para o biodiesel metílico, os valores encontrados foram de 7,3 quando utilizado óleo de palma, 2,5 para óleo de soja e 1,21 para óleo de mamona.

As emissões evitadas pelo uso do biodiesel em motores de ciclo Diesel, nas misturas 2% (B2, mandatória a partir de 2008) e 5% (B5, mandatória a partir de 2013) em substituição ao diesel de petróleo (emissão de 2,93 kg CO_2/L) foram determinadas e resultaram nos seguintes valores[2]:

- Biodiesel Etílico de Palma, 2,76 kg CO_2 eq / litro (B100)
- Biodiesel Etílico de Palma, 0,056 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Palma, 0,140 kg CO_2 eq / litro (B5)
- Biodiesel Metílico de Palma, 2,67 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Palma, 0,054 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Palma, 0,135 kg CO_2 eq / litro (B5)

- Biodiesel Etílico de Soja, 2,53 kg CO_2 eq / litro (B100)
- Biodiesel Etílico de Soja, 0,051 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Soja, 0,128 kg CO_2 eq / litro (B5)
- Biodiesel Metílico de Soja, 2,43 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Soja, 0,049 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Soja, 0,123 kg CO_2 eq / litro (B5)

- Biodiesel Etílico de Mamona, 1,76 kg CO_2 eq / litro (B100)
- Biodiesel Etílico de Mamona, 0,036 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Mamona, 0,090 kg CO_2 eq / litro (B5)
- Biodiesel Metílico de Mamona, 1,22 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Mamona, 0,026 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Mamona, 0,065 kg CO_2 eq / litro (B5)

O impacto nas emissões evitadas de gases de efeito estufa decorrente do tipo de álcool utilizado na transesterificação é pequeno, uma vez que a principal fonte de carbono no sistema são os óleos vegetais, com suas longas cadeias orgânicas. Entretanto, conforme mostrado, a rota etílica contribui em até 4,7% para a melhoria do balanço energético (relação Saída / Entrada de energia), como no caso do biodiesel etílico de palma.

[2] Os cálculos nas planilhas do excel consideram os valores completos dos resultados de cálculos anteriores ao resultado apresentado. Desta forma, não necessariamente os valores apresentados para B-5 refletem, de forma exata, o aumento linear do teor de biodiesel.

ÍNDICE DE SIGLAS

BEP	Biodiesel Etílico de Palma
BES	Biodiesel Etílico de Soja
BEM	Biodiesel Etílico de Mamona
BMP	Biodiesel Metílico de Palma
BMS	Biodiesel Metílico de Soja
BMM	Biodiesel Metílico de Mamona
OBP	Óleo Bruto de Palma
OBS	Óleo Bruto de Soja
OBM	Óleo Bruto de Mamona
AEA	Álcool Etílico Anidro
AMA	Álcool Metílico Anidro
CP	Cachos de Palma
GS	Grãos de Soja
BM	Bagas de Mamona
CA	Cana-de-Açúcar
CV	Ciclo de Vida

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Consumo de Energia por Combustível (2005) 13
Figura 2-1 – Ciclo Renovável de Carbono na Produção e Uso de Biocombustíveis 17
Figura 4-1 – Fase Agrícola de Plantação de Cana de Açúcar 22
Figura 4-2 – Fase de Obtenção do Álcool Etílico 25
Figura 5-1 – Modelo do Ciclo Produtivo da Plantação de Palma 31
Figura 5-2 – Modelo do Ciclo Produtivo da Plantação de Soja 35
Figura 5-3 – Modelo da Fase Industrial para Obtenção do Óleo de Palma e Co-Produtos 41
Figura 5-4 – Modelo da Usina de Beneficiamento de Soja Considerada neste Estudo 45
Figura 5-5 – Evolução da Cotação da Tonelada de Óleo e de Farelo de Soja na Bolsa de Chicago, no Período de Janeiro de 2004 a Novembro de 2006 47
Figura 5-6 – Evolução na Proporção entre os Valores Econômicos dos Produtos da Soja no Período de Janeiro de 2004 a Novembro de 2006 47
Figura 6-1 – Reação e Balanço Estequiométrico da Obtenção de Biodiesel a partir da Reação de Etanol com Triglicerídeo do Óleo de Soja 51
Figura 6-2 - Fluxos de Matérias-Primas Necessários para a Obtenção de 2.500 kg de cada Biodiesel pela Rota Etílica 53
Figura 6-3 – Fluxos Energéticos Necessários para a Obtenção de 100 GJ de cada Biodiesel, pela Rota Etílica 53
Figura 6-4 – Emissões na Produção e Uso de 100 GJ de Energia em Biodiesel Obtido pela Rota Etílica, em Quilogramas de Dióxido de Carbono Equivalente, kgCO_2eq 54
Figura 6-5 – Fluxos de Matérias-Primas Necessários para a Obtenção de 2.500 kg de cada Biodiesel pela Rota Metílica 56
Figura 6-6 – Fluxos Energéticos Necessários para a Obtenção de 100 GJ de cada Biodiesel, pela Rota Metílica 57
Figura 6-7 – Emissões na Produção e Uso de 100 GJ de Energia em Biodiesel Obtido pela Rota Etílica, em Quilogramas de Dióxido de Carbono Equivalente, kgCO_2eq 57
Figura 6-8 – Relação Entrada / Saída de Energia na Produção de Biodiesel 58
Figura 6-9 – Emissões de CO_2 Equivalentes na Produção e Uso de 100 GJ de Energia em Biodiesel e no Diesel de Petróleo 58
Figura 6-10 – Emissões Não Renováveis do Diesel e das Misturas B-2 e B-5 (kgCO_2eq./L de Combustível) 60
Figura 6-11 – Emissões Evitadas no Ciclo de Vida das Misturas B-2 e B5 60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1 – Emissões de CO_2 por Combustível Comercial, em 2005 14
Tabela 2-1 – Biocombustíveis, Processos e Fontes de Biomassa 17
Tabela 4-1 – Dados Utilizados para o Cálculo da Produtividade de Etanol na Destilaria 26
Tabela 4-2 – Inventário de Energia na Produção de Álcool Etílico Anidro 27
Tabela 4-3 – Balanço de Emissões na Produção do Álcool Etílico Anidro 27
Tabela 4-4 – Fatores de Emissão dos Combustíveis Fósseis para o Balanço de Emissões 28
Tabela 4-5 – Emissões Evitadas por Litro de Álcool Etílico Combustível, em kg CO_2 eq/L Álcool 28
Tabela 5-1 – Dosagem de Mistura de Fertilizantes para o Período em Pré-Viveiro 30
Tabela 5-2 – Recomendação de Adubação para o Dendezeiro 30
Tabela 5-3 – Inventário para Produção de 1.000 kg de Cachos de Palma 33
Tabela 5-4 – Consumo de Diesel nas Operações Mecanizadas do Cultivo da Soja 35
Tabela 5-5 – Consumo de Fertilizantes e Defensivos na Produção de 1 Tonelada de Grãos de Soja 36
Tabela 5-6 – Inventário para Produção e Transporte de 1.000 kg de Grãos de Soja 36
Tabela 5-7 – Consumo de Fertilizantes e Defensivos na Produção de 1.000 kg de Bagas de Mamona 38
Tabela 5-8 – Inventário para Processamento de 1000 kg de Cachos de Palma 42
Tabela 5-9 – Valor Unitário, Produção, Valor por 1.000 kg de Cachos e Fator de Alocação dos Produtos da Palma, e do Subproduto Torta de Palmiste 42
Tabela 5-10 – Inventário para Obtenção de 1.000 kg de Óleo Bruto de Palma 43
Tabela 5-11 – Inventário Consolidado para 1.000 kg de Óleo de Palma 43
Tabela 5-12 – Inventário de Entradas para o Processamento de 1.000 kg de Grãos 46
Tabela 5-13 – Fatores de Alocação para os Produtos da Soja 47
Tabela 5-14 – Inventário para a Obtenção de 1.000 kg de Óleo de Soja 48
Tabela 5-15 – Inventário Consolidado para a Obtenção de 1.000 kg Óleo de Soja 49
Tabela 5-16 – Inventário Consolidado para a Obtenção de 1.000 kg Óleo de Mamona 49
Tabela 6-1 – Entradas de Energia para o Biodiesel Etílico de Palma e de Soja 54
Tabela 6-2 – Emissões de GEE e Emissões Evitadas em Misturas B-2 e B-5 (kgCO_2 eq/kg de Combustível) 59
Tabela 6-3 – Emissões de GEE e Emissões Evitadas em Misturas B-2 e B-5 (kgCO_2eq/L de Combustível) 59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

2 FORMAÇÃO DE BIOMASSA CONVERSÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS 16

3 METODOLOGIA 19

4 ETANOL 21

4.1 FASE AGRÍCOLA 22

4.2 FASE INDUSTRIAL 25

4.3 BALANÇO DE ENERGIA E DE EMISSÕES DE GEE 27

5 BIODIESEL (PALMA, SOJA E MAMONA) 29

5.1 FASE AGRÍCOLA 29

5.1.1 Ciclo Produtivo da Palma 29

5.1.1.1 Inventário de Entradas na Plantação de Palma 32

5.1.2 Ciclo Produtivo da Soja 34

5.1.2.1 Inventário de Entradas na Plantação de Soja 35

5.1.3 Ciclo Produtivo da Mamona 37

5.2 FASE INDUSTRIAL: OBTENÇÃO DOS ÓLEOS VEGETAIS 39

5.2.1 Óleo de Palma 39

5.2.1.1 Inventário de Entradas na Obtenção dos Produtos da Palma 41

5.2.1.2 Critério de Alocação entre os Produtos da Palma 42

5.2.1.3 Inventário de Entradas na Obtenção de Óleo de Palma 42

5.2.1.4 Inventário Consolidado do Óleo Bruto de Palma 43

5.2.2 Óleo de Soja 44

5.2.2.1 Inventário de Entradas da Obtenção dos Produtos da Soja 46

5.2.2.2 Critério de Alocação entre os Produtos da Soja 46

5.2.2.3 Inventário de Entradas para a Obtenção de Óleo Bruto de Soja 48

5.2.2.4 Inventário Consolidado do Ciclo Produtivo do Óleo Bruto de Soja 48

5.2.3 Óleo de Mamona 49

6 BALANÇOS ENERGÉTICOS E INVENTÁRIOS DE EMISSÕES DO BIODIESEL (PALMA, SOJA E MAMONA) 50

6.1 TRANSESTERIFICAÇÃO ETÍLICA DOS ÓLEOS VEGETAIS 50

6.2 TRANSESTERIFICAÇÃO METÍLICA DOS ÓLEOS VEGETAIS 56

6.3 REDUÇÃO NAS EMISSÕES DE GEE PELO USO DO BIODIESEL NA MISTURA B-5. 59

7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS 61

8 REFERÊNCIAS 64

ANEXO 1 66

1 INTRODUÇÃO

A comunidade científica internacional vem demonstrando que há uma correlação positiva entre o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) e o aumento médio da temperatura do planeta, fato apontado como responsável pelo aumento das adversidades e alterações climáticas na superfície terrestre, como secas, inundações e degelo das calotas polares. A queima de combustíveis líquidos fósseis em motores de combustão interna libera GEE para a atmosfera, principalmente o dióxido de carbono.

Em 2005, o setor de transportes no Brasil consumiu cerca de 2.196 PJ, correspondendo a 27,4% do consumo total de energia do país. Desse total, o modal rodoviário consumiu cerca de 2.013 PJ ou 91,6 % do total do setor de transportes. O setor de transportes apresentou a seguinte distribuição de consumo por combustível: 26.685x10³ tEP de óleo diesel, 13.595x10³ tEP de gasolina pura, 4.079x10³ tEP de etanol anidro e 2.885x10³ tEP de etanol hidratado, e 1.711x10³ tEP de gás natural (Figura 1-1). (EPE, 2006).

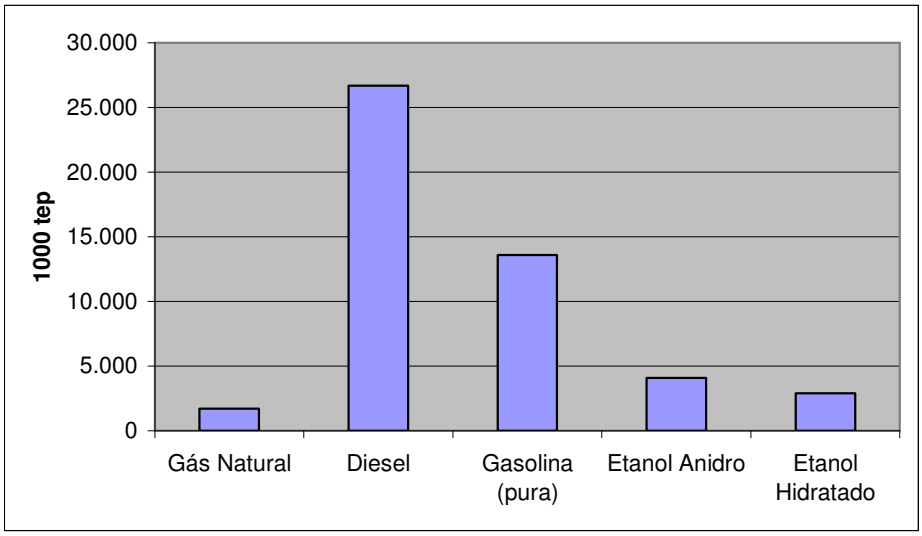


Figura 1-1 – Consumo de Energia por Combustível (2005)

Fonte: EPE, 2006.

A predominância dos combustíveis de origem fóssil na matriz de transportes nacional é, portanto, ainda significativa, a despeito de o Brasil ser, inquestionavelmente, um exemplo mundial na implementação de programas de biocombustíveis. As emissões de CO_2 oriundas da queima de combustíveis em veículos leves (carros a álcool e gasool) e em veículos pesados (caminhões, ônibus e trens a diesel) são sumarizadas na Tabela 1-1.

Tabela 1-1 – Emissões de CO_2 por Combustível Comercial, em 2005

Combustível	Consumo	Emissões		
	10^3 tEP	%	10^3 t CO_2	%
Diesel	26.685	55,6	92.167	62,2
Gasolina C (E25)	16.738	34,9	52.022	35,1
Etanol Hidratado	2.885	6,0	0	0
Gás Natural	1.711	3,6	4.020	2,7
Total	48.020	100,0	148.209	100,0

Fonte: Baseado em EPE, 2006; IPCC, 2006; Macedo, 2004.

As enormes perspectivas de crescimento da participação dos biocombustíveis nos próximos anos impõem a necessidade de se conhecer com precisão o perfil ambiental destes produtos.

A utilização de biomassa como combustível líquido ressurge dentro de um paradigma sistêmico de busca de matérias primas renováveis, visando a produção de combustíveis alternativos à gasolina e ao diesel que sejam, ao mesmo tempo, ambientalmente eficientes, economicamente viáveis e socialmente aceitos.

Os combustíveis, sejam eles derivados fósseis ou da biomassa, apresentam um ciclo de vida que pode ser considerado um sistema energético. As suas atividades de extração, transporte, processamento, distribuição e uso final do combustível/energia podem acarretar significativos impactos ambientais.

No caso dos combustíveis derivados de biomassa renovável, a quantidade de dióxido de carbono emitida na combustão é compensada pela absorção deste gás através da fotossíntese no crescimento da espécie vegetal, desde o plantio até a colheita. Entretanto, tanto na produção da biomassa como na produção do etanol ou do biodiesel são consumidos substâncias e materiais que utilizaram recursos fósseis nas suas etapas de extração, produção e transporte até o ponto de consumo.

A análise do ciclo de vida de um produto é conhecida por ACV - Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês *Life Cycle Assessment* - LCA). O ciclo de vida de um produto se inicia quando os recursos naturais para sua produção são extraídos da sua origem e termina quando os materiais, resíduos e emissões retornam ao meio ambiente. Através da ACV busca-se monitorar um produto desde a extração da matéria prima até sua destinação final após o uso. Em inglês usa-se a expressão *well-to-wheel* (do poço à roda) para reforçar a intenção de uma avaliação completa do processo produtivo.

Considerando a grande variedade e interações existentes entre as tecnologias, os processos existentes e as diversas categorias ambientais empregados na produção de um determinado produto energético, as respostas para uma determinada relação ambiental são, na maioria das

vezes, um problema de ampla complexidade, que exige o manuseio de um número grande de informações e o uso de ferramentas computacionais.

Os impactos ambientais estão geralmente associados à utilização do combustível e da matéria-prima usada no seu preparo, à emissão de poluentes e à produção de resíduos. A utilização de combustíveis fósseis gera emissões ao longo de seu ciclo de vida, as quais são responsáveis por uma das mais relevantes categorias de impacto ambiental: o aquecimento global devido ao efeito estufa. Esta categoria de impacto está relacionada à emissão de gases de efeito estufa (GEE), tendo como principais gases causadores o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O).

Portanto, os estudos comparativos das emissões entre o etanol e a gasolina e entre o biodiesel e o diesel de petróleo devem considerar todo o ciclo de vida dos respectivos combustíveis. Aplicada ao gerenciamento ambiental dos processos envolvidos, a ACV auxilia a pesquisa e a indústria na identificação dos pontos críticos de cada fase do processo, bem como fornece aos planejadores e tomadores de decisão parâmetros sistêmicos e objetivos para comparação das vantagens e desvantagens de uma determinada solução energética. Através deste tipo de análise é possível determinar de uma maneira mais precisa a real contribuição do uso dos diferentes tipos de biocombustível para a mitigação do efeito estufa.

As inter-relações da produção e os efeitos ambientais (emissões de GEE) ao longo de todas as atividades do ciclo de vida de um determinado produto são um dos temas centrais deste estudo.

No presente relatório, inicialmente é apresentada uma revisão conceitual da formação de biomassa por fotossíntese e sua conversão em biocombustíveis. Em seguida, são apresentados os resultados dos balanços de energia e de emissões na produção de etanol de cana-de-açúcar e de biodiesel de soja, mamona e dendê. Finalmente, é feita uma análise dos resultados e são apresentadas recomendações para o setor.

2 FORMAÇÃO DE BIOMASSA E CONVERSÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS

As radiações solares incidentes sobre a terra são convertidas em outras diferentes formas de energia, seja através de uso direto em coletores termo-solares e em células fotovoltaicas, ou através de uso indireto pela intervenção humana sobre outros fenômenos naturais induzidos pela energia solar, tais como o vento, o ciclo hídrico e a fotossíntese. Todas são fontes de energias renováveis.

O total de energia solar incidente sobre a terra é da ordem de 1,5 x 10^{18} kWh/ ano, dos quais 0,02% ou 3,04 x 10^{14} kWh / ano são armazenados nas plantas por meio da fotossíntese. Esta quantidade de energia, equivalente a quase 10 vezes mais do que o atual consumo de energia (cerca de 0,35 x 10^{14} kWh / ano).

A fotossíntese vem a ser a síntese de carboidratos, bem como de outros compostos orgânicos de elevado conteúdo energético, a partir de substâncias de baixo potencial energético existentes na atmosfera, como o dióxido de carbono e a água. Ela pode ser representada pela seguinte reação, na qual $\lambda\nu$ é a energia dos fótons:

$$6CO_2 + 12H_2O + \lambda\nu \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O.$$

Os principais compostos orgânicos sintetizados nas plantas são, essencialmente, os glucídios ($C_6H_{12}O_6$) – cujo poder calorífico é da ordem de 3.600 kcal/kg (matéria seca) – armazenados basicamente na forma de polímeros naturais, como a celulose, a hemi-celulose e a lignina. Portanto, no processo de fotossíntese por meio da clorofila a energia solar é armazenada nos tecidos vegetais (celulose, glucídio, lipídio, proteína, lignina, etc.), que afinal vêm a constituir a energia química potencial. Ver Figura 2-1.

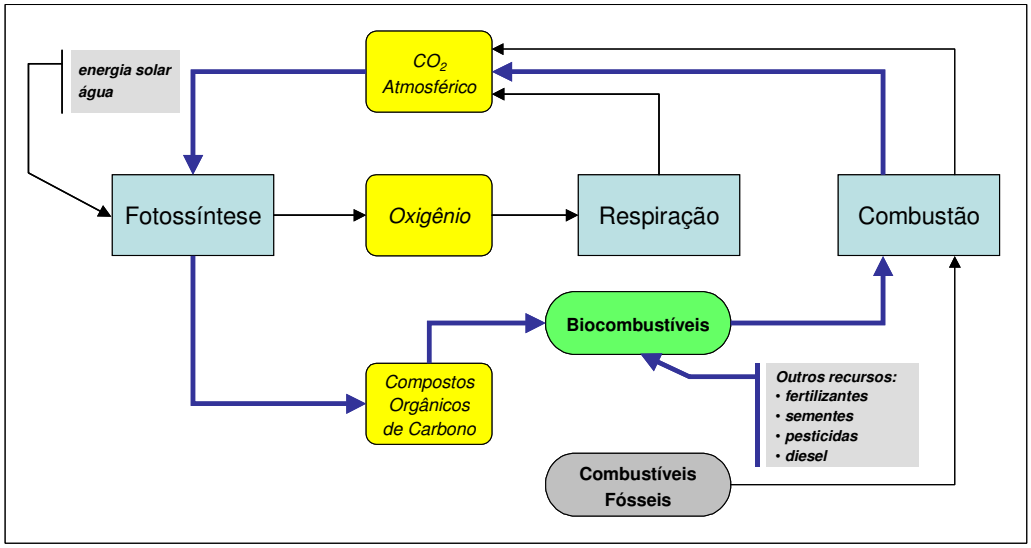


Figura 2-1 – Ciclo Renovável de Carbono na Produção e Uso de Biocombustíveis

Os principais fatores que afetam a fotossíntese são a radiação solar, a temperatura e a disponibilidade de água, além dos nutrientes. A produtividade bruta de biomassa também varia consideravelmente com a latitude geográfica, que está associada à disponibilidade de energia solar e temperatura. O Brasil tem seu território favorecido pela conjugação de todos estes fatores.

Através da fotossíntese são produzidas plantas como a cana-de-açúcar, a soja, a mamona, a palma africana (dendê), a mandioca, o babaçu, o eucalipto, o pinus e outras espécies vegetais. Através destas plantas é possível a produção de biocombustíveis, como o etanol, o biodiesel, o metanol da madeira, o carvão vegetal, o biogás e o hidrogênio.

As várias espécies vegetais podem ser convertidas em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos por meio de diferentes processos de conversão, economicamente adequados a cada aplicação, como exemplificado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Biocombustíveis, Processos e Fontes de Biomassa

Biomassa ou seu Derivado	Processo	Biocombustível
Cana de Açúcar	Mecânico	Bagaço
Fermentado de cana, sorgo, etc.	Destilação	Etanol
Eucalipto e espécies florestais	Mecânico	Madeira, pellets, etc.
Óleos Vegetais	Transesterificação	Biodiesel
Resíduos Agrícolas, Urbanos, etc.	Digestão Anaeróbica	Metano
Resíduos Agrícolas e da Indústria Madeireira	Pirólise e reforma	Hidrogênio
Etanol	Reforma Direta	Hidrogênio
Algas verdes	Bio-conversão	Hidrogênio

Fonte: Carvalho, 2004.

Cada uma destas alternativas tecnológicas está associada a um rendimento energético vinculado às condições em que ela é empregada. Em se tratando de biomassa, como descrito anteriormente, a eficiência energética do sistema está, na sua origem, vinculada à capacidade das plantas em converter a energia do sol em carboidratos, que é função de dois fatores principais: a fisiologia das plantas e as condições climáticas. A fisiologia da planta determina a taxa em que o dióxido de carbono atmosférico se converte em carboidrato.

Os processos metabólicos de fixação do CO_2 nos vegetais implicam na caracterização de dois grupos de plantas – as plantas C3, nas quais o CO_2 é convertido em moléculas contendo 3 átomos de carbono; e as plantas C4, em que a conversão é feita em 4 carbonos. As plantas C3 são a grande maioria das espécies e todas as árvores. As plantas C4 são um grupo que inclui apenas algumas espécies, tais como as gramíneas de origem tropical, como a cana-de-açúcar, o milho e o sorgo. As gramíneas possuem, portanto, um sistema fotossintético mais eficiente que as outras plantas.

O etanol ou álcool etílico (CH_3CH_2OH) de biomassa é proveniente de plantas ricas em açúcares, amido ou material celulósico, cujo processo de fabricação envolve a fermentação do açúcar e posterior destilação do vinho bruto. No caso da utilização de material rico em amido ou celulose, faz-se necessária uma etapa anterior que envolve a sua quebra para obtenção do açúcar. O álcool etílico hidratado, teor alcoólico de 95%, é utilizado diretamente como combustível veicular. O álcool etílico anidro tem teor alcoólico de 99,5% de álcool e é usado como aditivo à gasolina, substituindo o chumbo tetraetila por razões ambientais e melhorando o desempenho dos motores. As montadoras de veículos no Brasil desenvolveram e produzem motores especialmente adaptados para o uso de etanol hidratado (E100), bem como para o funcionamento com gasolina em mistura com etanol anidro (o gasool, hoje, na proporção de 23%) e motores *Flex* que podem funcionar tanto com E100 como com gasool.

O biodiesel resulta da conversão de diferentes tipos de óleos e gorduras de origem vegetal ou animal em uma substância com viscosidade e características de combustão semelhantes às do diesel de petróleo. Isto se dá através de reação química entre triglicerídeos ou ácidos graxos e um álcool de pequena cadeia carbônica (geralmente, metanol ou etanol).

3 METODOLOGIA

O objetivo geral do presente estudo é o de avaliar o potencial de redução de emissões de CO_2 de projetos de produção e uso de biodiesel e álcool etílico, de acordo com as principais culturas (cana de açúcar, dendê, mamona e soja) e modos de produção.

A aplicação plena do método de avaliação do ciclo de vida a um produto pressupõe a análise dos impactos potenciais associados à sua produção e uso, incluindo todas as etapas da vida do produto, através de:

- Inventário dos insumos materiais e energéticos e suas correspondentes emissões para o meio ambiente;
- Avaliação dos impactos ambientais potenciais associados com os insumos identificados e suas emissões.

O trabalho aqui proposto visa primariamente, através da identificação de cada insumo (input), quantificar a energia consumida em cada etapa de produção e suas correspondentes emissões, comparando-a no final com o conteúdo energético disponibilizado ao uso final do produto.

A metodologia adotada no estudo é resumida no seguinte elenco de atividades:

A) Pesquisa bibliográfica da literatura publicada no país e no exterior sobre o balanço de energia e de emissões na produção de etanol (via cana-de-açúcar) e de biodiesel (via dendê, mamona e soja);

B) Revisão do balanço energético e de emissões na produção do etanol;

C) Inventário dos insumos agrícolas, práticas de plantio, tratamento da cultura, práticas de colheita e de transporte até a unidade industrial de processamento (dendê, mamona e soja);

D) Inventário dos insumos usados na unidade de processamento (dendê, mamona e soja);

E) Análise e avaliação do conteúdo energético típico contido em cada insumo e nas operações que fazem parte da fase agrícola (dendê, mamona e soja);

F) Análise e avaliação do conteúdo energético típico de cada insumo e operações de processo da fase industrial (dendê, mamona e soja);

G) Contabilização da energia usada na fase agrícola, industrial (dendê, mamona e soja);

H) Avaliação da energia contida no biodiesel produzido (dendê, mamona e soja);

I) Revisão crítica dos resultados obtidos nas atividades anteriores;

J) Cálculo das emissões evitadas pelo uso dos combustíveis renováveis, ou dos obtidos com adição destes, em referência aos combustíveis fósseis, considerando as emissões de CO_2eq. ao longo do ciclo de vida de todos os combustíveis.

4 ETANOL

A fonte utilizada para levantamento dos dados sobre a produção do etanol apresenta dados médios das cinco safras consecutivas de 1998/99 a 2002/03 (MACEDO et al, 2004). Esta referência apresenta em detalhes todo o balanço energético da produção de álcool etílico, com dados recentes e representativos do contexto brasileiro, e possui reconhecida credibilidade e aceitação em vários fóruns técnicos nacionais e internacionais. O trabalho em referência é reavaliado e apresentado em seus aspectos mais relevantes.

O sistema de produto construído neste estudo inclui os seguintes subsistemas:

- Fase Agrícola (Produção e Transporte da cana-de-açúcar);
- Fase Industrial (Produção de etanol);
- Fase de Uso como combustível Veicular.

A plantação da cana-de-açúcar, o transporte dos colmos até a destilaria e a industrialização dos colmos para produção de etanol são aqui contextualizados a partir de informações e dados da região Centro-Sul do Brasil, mais especificamente do Estado de São Paulo.

Dados e informações representativos do contexto tecnológico dominante das principais áreas produtoras de cana-de-açúcar (fase agrícola) e de etanol (fase industrial) no Brasil foram usados para a modelagem do sistema de produto e levantamento do inventário.

O emprego de culturas de rotação com a lavoura da cana-de-açúcar tem potencial de afetar positivamente tanto o balanço energético (através da fixação de nitrogênio atmosférico e, portanto, resultando em uma redução de consumo de fertilizantes nitrogenados), quanto o balanço de emissões de gases de efeito estufa do etanol (devido ao menor consumo de fertilizantes nitrogenados relacionados à emissão de gases de efeito estufa durante e após a aplicação no solo). Entretanto, devido ao grau de incerteza inerente a um estudo representativo do amplo universo de unidades produtivas em diferentes contextos geográficos e edafoclimáticos, a rotação de culturas foi desconsiderada neste modelo, como também avaliado por MACEDO et al. (2004). Além das incertezas anteriormente citadas, a aplicação de critérios de alocação dos benefícios e prejuízos ambientais entre a lavoura de cana-de-açúcar e a cultura de rotação diluiria substancialmente o impacto da cultura de rotação nos resultados apresentados neste relatório.

Os dados que compõem esta análise de inventário são agrupados basicamente em Entradas e Saídas para cada subsistema. Somente são considerados os dados dos fluxos de materiais e respectivas energias embutidas que atravessam a fronteira do sistema de produto definido.

4.1 FASE AGRÍCOLA

O ciclo produtivo da cana de açúcar, ilustrado na Figura 4-1, é constituído basicamente dos seguintes conjuntos de operações:

- Preparo e Conservação do Solo;
- Plantio;
- Tratos Culturais da Cana Planta;
- Tratos Culturais da Cana Soca;
- Queimada;
- Colheita Manual;
- Colheita Mecanizada;
- Transporte.

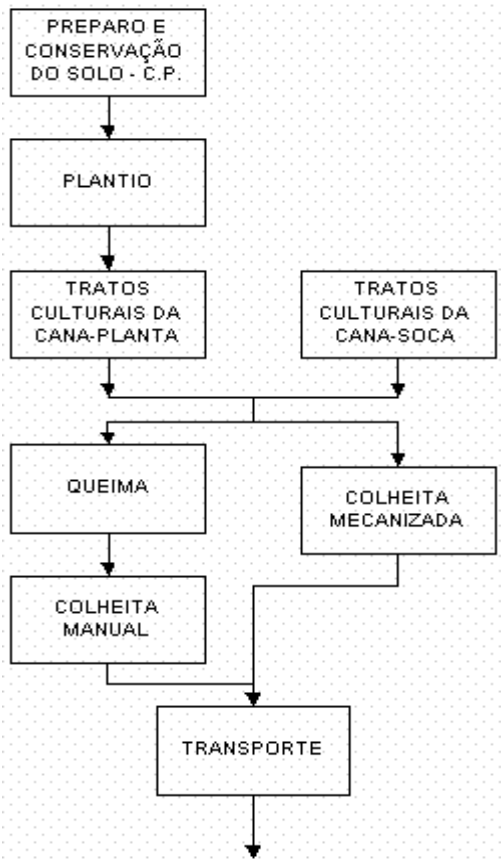


Figura 4-1 – Fase Agrícola de Plantação de Cana de Açúcar

MACEDO et al (2004) apresentam valores representativos que caracterizam a produção de cana-de-açúcar no Brasil. Quanto à forma de colheita, as seguintes participações são observadas:

- Colheita manual – 65%;
- Colheita mecanizada – 35%;
- Colheita com cana crua – 20%;
- Colheita com cana queimada – 80%.

MACEDO et al. (2004) não especificam valores diferentes para consumo de diesel por tonelada de cana-de-açúcar para colheita mecanizada em cana crua ou queimada, considerando para cálculos os valores médios de toda a operação de colheita mecanizada de cada uma das unidades produtoras participantes do controle mútuo agrícola do Centro de Tecnologia Canavieira – CTC. O fato da colheita manual ocorrer em área de cana queimada ou crua não afeta o balanço energético ou de gases de efeito estufa, não tendo sido analisado no estudo.

A produtividade média de cinco cortes é de 82,4 toneladas de cana por hectare (68,7 toneladas de cana por hectare por ano). A pol (conteúdo de sacarose aparente por cento de caldo) e o teor de fibras da cana considerados são de 14,53% e 13,46%, respectivamente.

Para a avaliação dos fluxos de energia, são considerados dois casos:

- Cenário 1 – baseado nas médias de consumo de energia, de insumos e investimentos.
- Cenário 2 – baseado nos melhores valores praticados (valores mínimos de consumo e com o uso da melhor tecnologia existente).

O transporte da cana para a usina, no cenário 1, é composto de 8% caminhão de 15 toneladas, 25% Romeu e Julieta com capacidade de 28 toneladas e 67% treminhão de 45 toneladas.

No cenário 2, considera-se a aplicação de torta de filtro e vinhaça em 30% das áreas de cana planta e cana soca, respectivamente, com as conseqüentes reduções nos consumos de adubo. Ainda neste cenário, no transporte da cana é considerado o uso de veículos de maior capacidade, como os Rodotrens de 58 toneladas.

A utilização desses cenários permite caracterizar não somente a situação atual (Cenário 1), mas também a situação que poderá vir a ser prática comum em médio prazo (Cenário 2), embora já seja realidade em algumas unidades produtivas.

Entradas de Energia

O conteúdo energético para o óleo diesel adotado neste relatório foi o utilizado por MACEDO et al (2004)[3]. Este valor equivale a 11.414 kcal/L, sendo o somatório do Poder Calorífico Inferior - PCI e dos custos energéticos da produção, transporte e refino do óleo.

a) Consumo de óleo diesel nas operações agrícolas:

- operações de preparo do solo e de plantação da cana planta (20% da área total) igual a 102,6 L/ha;
- operações de cultivo da cana-soca (80% da área total) igual a 9,1 L/ha;
- operações de colheita mecanizada: 107,9 L/ha

[3] Os autores adotaram os valores apresentados em Pimentel, D. *Handbook of energy utilization in agriculture*. CRC Press, 1980.

O consumo anual de óleo diesel apropriado nas operações agrícolas e de colheita foi de 0,797 L/t cana.

b) Consumo de óleo diesel nas operações de transporte:

- transporte da cana de açúcar do campo para a usina, considerando a distância média percorrida da área de colheita de 20 km, foi para o caso do cenário 1 de 20,4 mL/t.km ou 0,816 L/t cana e, para o caso do cenário 2, de 15,7 mL/t.km ou 0,628 L/t cana;
- transporte de mudas: 17,4 L/ha;
- transporte de torta de filtro: 9,6 L/ha;
- transporte de vinhaça (apenas aplicável ao cenário 2): 24,7 L/ha;
- transporte de adubo: no caso do cenário 1, o consumo é de 3,33 L/ha e no do cenário 2 de 1,60 L/ha.

Isto resulta no consumo total de óleo diesel no transporte da produção de cana de açúcar de 0,899 L/t cana (cenário 1) e 0,764 L/t cana (cenário 2).

c) Consumo de energia devido ao emprego de fertilizantes:

- no cenário 1, a média de aplicação na área de cana-planta é de 30 kg/ha de nitrogênio (N), 120 kg/ha de Fósforo (P_2O_5) e 120 kg/ha de Potássio (K_2O), enquanto que na área de cana soca estes números são respectivamente 80, 25 e 120 kg/ha;
- no cenário 2, em que 30% da área total recebe vinhaça (cana-soca) ou torta de filtro (cana-planta), a aplicação média na área de cana planta é de 50 kg/ha de Fósforo e 80 kg/ha de Potássio e de 90 kg/ha na área de cana soca.

Isto resulta no seguinte consumo de energia:

- Cenário 1 = 12.480 (N) + 1.230 (P_2O_5) + 2.180 (K_2O) = 15.890 kcal/t cana;
- Cenário 2 = 15.890 x 0,7 + [12.840 (N) + 280 (P_2O_5) + 310 (K_2O)] x 0,3 = 15.152 kcal/t cana.

d) Consumo de energia devido à aplicação de calcário, herbicidas e inseticidas:

- aplicação de calcário à taxa de 2.200 kg/ha em ciclos de seis anos, com custo energético de 313,4 kcal/kg, resulta no consumo de 1.706 kcal/t cana;
- custo energético adotado para a aplicação de herbicidas: 2.690 kcal/t cana;
- custo energético adotado para a aplicação de inseticidas: 190 kcal/t cana.

e) Consumo de energia na produção de mudas de cana:

- custo energético adotado igual a 1.404 kcal/t cana (cenário 1) e 1.336 kcal/t cana (cenário 2).

f) Consumo de energia inerente a equipamentos e máquinas agrícolas:

- custo energético total adotado igual a 6.970 kcal/t cana.

Nota: não se levou em consideração, neste estudo, o custo energético do trabalho manual.

Os resultados do balanço energético e de emissões para a fase agrícola de produção da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 4-2 e na
Tabela 4-3.

4.2 FASE INDUSTRIAL

A industrialização da cana-de-açúcar para obtenção do álcool etílico, ilustrada na Figura 4-2 compreende as seguintes operações:

- Recebimento da cana;
- Processamento (Extração do caldo);
- Tratamento do caldo;
- Fermentação;
- Destilação e Retificação;
- Desidratação;
- Co-Geração (geração de vapor e eletricidade).

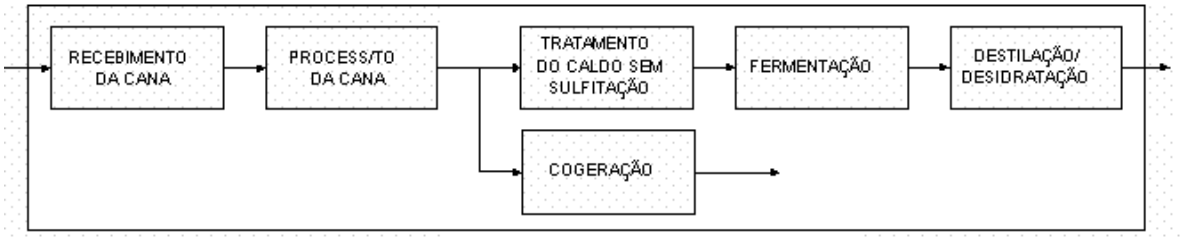


Figura 4-2 – Fase de Obtenção do Álcool Etílico

Os produtos da co-geração são vapor e eletricidade para o projeto. Considera-se neste relatório que a unidade industrial é auto-suficiente em eletricidade. Na realidade, há usinas com processos de co-geração ineficientes, que ainda necessitam adquirir energia elétrica externa, e usinas com unidades de co-geração modernizadas que geram e comercializam excedentes de energia elétrica.

A Tabela 4-1 apresenta os dados característicos da unidade industrial modelada em MACEDO et al. (2004).

Tabela 4-1 – Dados Utilizados para o Cálculo da Produtividade de Etanol na Destilaria

Parâmetro	Valores em %
Pol da cana-de-açúcar	14,53
Açúcares Redutores (AR)	0,545
Eficiência de extração	96,2
Eficiência de tratamento do caldo	99,2
Perda de açúcar na lavagem de cana	0,61
Eficiência de fermentação	91,1
Eficiência da destilação	99,6

Fonte: MACEDO et al, 2004

A eficiência de conversão (produtividade industrial) adotada neste estudo, com base nos dados da Tabela 4-1, é de 86,0 L/t de cana (etanol anidro) para o cenário 1 e de 91,8 L/t de cana (etanol anidro) para o cenário 2.

Entradas de Energia

a) Eletricidade.

Toda a eletricidade (e vapor) obtida em co-geração é suprida pelas próprias unidades industriais produtoras de etanol através do aproveitamento da biomassa renovável (bagaço) disponível. Assim, não há compra de eletricidade de terceiros. Não se previu no estudo a venda de eletricidade excedente, mas admitiu-se que o bagaço excedente, 8% no cenário 1 e 15% no cenário 2, é disponibilizado, sendo, portanto, seu conteúdo energético contabilizado no estudo. A energia (saída) resultante é de 40.300 kcal/t cana e 75.600 kcal/t cana, respectivamente, para o cenário 1 e para o cenário 2.

b) Insumos químicos e outros materiais.

Os principais insumos químicos e lubrificantes utilizados na unidade industrial de etanol e suas respectivas entradas de energia são os seguintes: 9,05 g/L de ácido sulfúrico (740 kcal/t cana); 0,60 kg/m³ anidro de ciclohexeno (130 kcal/t cana); hidróxido de sódio (180 kcal/t cana); 13,37 g/t cana de lubrificantes (170 kcal/t cana) e 930 g/t cana de cal (300 kcal/t cana). Isto totaliza uma entrada de energia de 1.520 kcal/t cana.

c) Prédios e equipamentos.

Com base em parâmetros publicados por Pimentel em *Handbook of Energy Utilization in Agriculture* (CRC Press, 1980) as entradas de energia devidas a prédios e equipamentos estabelecidas foram:

- Cenário 1 – 10.290 kcal/t cana para planta produzindo 180.000 L etanol anidro/dia e processando 377.000 t cana/ano;
- Cenário 2 – 7.989 kcal/t cana para planta produzindo 240.000 L etanol anidro/dia e processando 470.000 t cana/ano.

4.3 BALANÇO DE ENERGIA E DE EMISSÕES DE GEE

A Tabela 4-2 apresenta o inventário dos consumos energéticos das fases agrícolas de plantação de cana-de-açúcar e industrial de obtenção do álcool etílico. A

Tabela 4-3 apresenta as emissões de CO_2 equivalentes no ciclo de vida do álcool etílico anidro e as emissões evitadas pelo seu uso como constituinte da gasolina tipo C e as devidas ao potencial uso energético do bagaço excedente.

Tabela 4-2 – Inventário de Energia na Produção de Álcool Etílico Anidro

Inventário de Energia (MJ / L)		
Entradas de Energia		
Fase Agrícola	Cenário 1	Cenário 2
Operações agrícolas	0,444	0,414
Transporte	0,498	0,398
Fertilizantes	0,775	0,691
Cal, herbicidas, pesticidas etc.	0,222	0,209
Mudas	0,067	0,063
Equipamentos	0,339	0,318
Sub-Total	*2,345*	*2,093*
Fase Industrial		
Prod. químicos, lubrificantes	0,075	0,071
Prédios e instalações	0,138	0,100
Equipamentos	0,360	0,264
Sub-Total	*0,573*	*0,435*
Total	2,918	2,528
Saídas de Energia		
Etanol	22,35	22,35
Bagaço excedente	1,96	3,45
Total	24,31	25,80
Relação Saída/Entrada	***8,32***	***10,22***

Tabela 4-3 – Balanço de Emissões na Produção do Álcool Etílico Anidro

Emissões por Fonte ($kgCO_2eq/L$)	**Cenário 1**	**Cenário 2**
Combustíveis fósseis (Diesel e Óleo combustível)	0,223	0,193
Queima da palha (Metano e N_2O)	0,105	0,098
Decomposição de Fertilizante (N_2O do solo)	0,073	0,069
Total	0,401	0,359

No cálculo das emissões considerou-se o consumo de diesel nas operações agrícolas, de colheita da cana e seu transporte, assim como o de óleo combustível na produção de produtos químicos e na energia embarcada em equipamentos e prédios. O cálculo das emissões da queima da palha foi feita com base em valores publicados pelo IPCC (2001). A Tabela 4-4, modificada de MACEDO et al. (2004), apresenta os fatores de emissão utilizados no balanço final das emissões.

Tabela 4-4 – Fatores de Emissão dos Combustíveis Fósseis para o Balanço de Emissões

Combustível	Dens.	PCI	C. Direto*	Em. Diretas	Em. Totais
	kg/L	MJ/kg	kg C/GJ	kg C/t	kg C/m³
Gasolina	0,742	44,8	18,9	846	776
Diesel	0,84**	42,3**	20,2	855	908
Óleo Combustível	1,013	40,2	21,1	848	1.061

Fonte: Elaboração própria a partir de *IPCC (2001) e **BRASIL (2006).

Emissões Evitadas pelo Uso de Etanol em Substituição à Gasolina

Conforme exposto em MACEDO et al. (2004), embora não seja possível uma comparação direta entre motores a gasolina, a gasool e a etanol, a equivalência amplamente aceita, em função do desempenho relativo dos novos motores é:

- 1 litro de etanol anidro = 1 litro de gasolina,
- 1 litro de etanol hidratado = 0,7 litro de gasolina.

Nestas condições as emissões evitadas devidas ao uso de etanol em substituição à gasolina são:

- 2,82[4] $kgCO_2/L$ para o etanol anidro e
- 1,97[5] $kgCO_2/L$ para o etanol hidratado.

A Tabela 4-5, com base nos resultados de (MACEDO et al., 2004), apresenta as emissões evitadas por litro de álcool etílico combustível, nas formas anidra e hidratada, em relação ao consumo de gasolina pura e em relação à mistura atual de (77% gasolina A e 23% de álcool anidro, em proporção volumétrica).

Tabela 4-5 – Emissões Evitadas por Litro de Álcool Etílico Combustível, em kg CO_2 eq/L Álcool

Cenários	anidro		hidratado	
	C1	C2	C1	C2
Emissões totais no ciclo de vida	0,401	0,359	0,389	0,348
Emissões Evitadas (ainda em referência à gasolina A)				
Uso do bagaço excedente[6]	0,145	0,254	0,141	0,246
Uso do etanol	2,82	2,82	1,97	1,97
Total de emissões evitadas	2,965	3,074	2,111	2,216
Emissões evitadas (valor líquido)	2,564	2,715	1,722	1,867
Emissões Evitadas (referência: 77% gasolina A; 23% álc. anidro)				
Uso do álcool hidratado	-	-	1,196	1,230

[4] Valor calculado por MACEDO et al. (2004) para as emissões totais de dióxido de carbono equivalentes no ciclo de vida da gasolina tipo A (pura), a partir dos dados de intensidade de carbono da Tabela 4-4.
[5] 70% do total de emissões da gasolina tipo A.
[6] Como o bagaço excedente é considerado um subproduto do sistema técnico do etanol, as emissões evitadas pelo seu uso são creditadas ao etanol.

5 BIODIESEL (PALMA, SOJA E MAMONA)

5.1 FASE AGRÍCOLA

5.1.1 Ciclo Produtivo da Palma

O ciclo produtivo da plantação de palma compreende as seguintes etapas:

- Preparo do solo;
- Pré-plantio;
- Plantio definitivo;
- Tratos culturais;
- Colheita;
- Transporte.

VIANNA (2006), referência principal utilizada nesta parte do estudo, não inclui a etapa de preparo do solo na modelagem do ciclo produtivo da palma. Entretanto, as operações necessárias para desmatar e limpar (destocar, entre outras operações) o terreno para a implantação da lavoura devem ser relevantes na cultura da palma, mesmo com um longo ciclo produtivo de 30 anos, como são para a cana-de-açúcar, com um ciclo produtivo de 6 anos. Por este motivo, serão utilizados os dados de MACEDO et al (2004), para o preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar, para adicionar o custo energético desta operação na lavoura de palma.

O tempo estimado de vida útil da palma é de 27 anos. A produtividade média[7] anual considerada é de 15 toneladas de cacho por hectare por ano. A unidade onde o levantamento de dados foi realizado ainda está no primeiro ciclo da lavoura instalada. A produção se inicia no quarto ano após o plantio definitivo. Neste estudo, consideraremos que o período de pré-plantio tem duração de 2 anos. As árvores mais antigas têm cerca de 23 anos. Há a expectativa de que a produção seja possível até 30 anos após o plantio definitivo.

A segunda etapa do ciclo produtivo da lavoura de palma é denominada de Pré-Plantio e consiste na produção das mudas (germinação das sementes, pré-viveiro e viveiro). Nesta etapa, se inicia a adubação da muda, realizada semanalmente com uma mistura de 3 kg de N, 4 kg de P_2O_5, 1kg de K_2O e 2 kg de sulfato de magnésio. A Tabela 5-1 apresenta as dosagens no período de pré-viveiro.

[7] A produtividade é dependente da idade da planta. São necessários 8 anos para estabilizar em cerca de 20 toneladas por hectare ano. A partir do vigésimo ano, a produtividade entra em declínio.

Tabela 5-1 – Dosagem de Mistura de Fertilizantes para o Período em Pré-Viveiro

Idade de repicagem	g de mistura / muda
1 a 3 meses	5
4 a 6 meses	10
7 a 9 meses	15
10 a 11 meses	20

Fonte: SEAGRI, 2005.

No viveiro, a adubação é realizada mensalmente. Nos três primeiros meses, a dosagem é de 20 g da mistura NPK (13-13-26) ao redor de cada planta. Do quarto mês em diante, aumenta-se para 30 gramas.

A terceira etapa da fase agrícola é o Plantio Definitivo realizado na época mais chuvosa do ano, que compreende o intervalo de janeiro a maio, no caso da região Amazônica. As mudas são colocadas em covas, normalmente abertas de forma manual, e dispostas em triângulo eqüilátero, com 9 metros de lado, dando uma densidade final de 143 palmeiras por hectare.

Após o plantio definitivo, os tratos culturais asseguram o melhor desenvolvimento das palmeiras, tendo em vista as condições de solo e clima. Os tratos culturais incluem o replantio para substituir as plantas que morrem ou que apresentam problemas em seu desenvolvimento, o coroamento – que é uma limpeza manual do solo em torno da planta, o controle fito-sanitário para verificar o aparecimento de pragas e doenças, e a adubação[8].

A Tabela 5-2 indica as recomendações para adubação. Até o terceiro ano, esta varia também de acordo com o tempo de permanência no viveiro.

Tabela 5-2 – Recomendação de Adubação para o Dendezeiro

Nutrientes	Meses de permanência no Viveiro			
(resultados da análise de Solos)	2	12	24	36
N (kg/ha)				
Mineral ou Nitrogênio Orgânico	13	26	40	52
P_2O_5 (kg/ha) (Fósforo no Solo – ppmP (Mehlich))				
Até 5	13	26	40	52
6 a 15	7	13	20	26
K_2O (kg/ha) (Potássio no Solo –ppmK (Mehlich))				
Até 45	28,5	57	85	114
46 a 100	14	28	42	57

Fonte: SEAGRI, 2005.

A colheita dos cachos de palma é manual e praticada durante todo o ano. As ferramentas utilizadas variam conforme a idade e altura das plantas. Até o quarto ano de produção faz-se o uso do cinzel (instrumento metálico com uma lâmina em uma das extremidades); do quinto ao sétimo ano, do machado. A partir do oitavo ano, quando as plantas já têm uma altura maior,

[8] Realizada com base na análise do solo, e variando de acordo com a área.

utiliza-se uma foice. A colheita é a etapa mais importante e delicada, pois dela dependem a quantidade e qualidade do óleo que será extraído futuramente. A maturação dos cachos exige que os intervalos de colheita sejam de 10 a 15 dias e que o transporte do mesmo para o beneficiamento deva ser feito o mais rápido possível, em menos de 24 horas, para evitar degradação dos frutos.

Da plantação até a beira da estrada, o transporte pode ser feito por tração animal ou motorizada (pequenos tratores) e, da estrada para as usinas de beneficiamento, por caminhões. Neste estudo se considera que o transporte até a estrada é feito utilizando tração animal.

A Figura 5-1 apresenta o modelo do ciclo produtivo da plantação de palma considerado neste estudo.

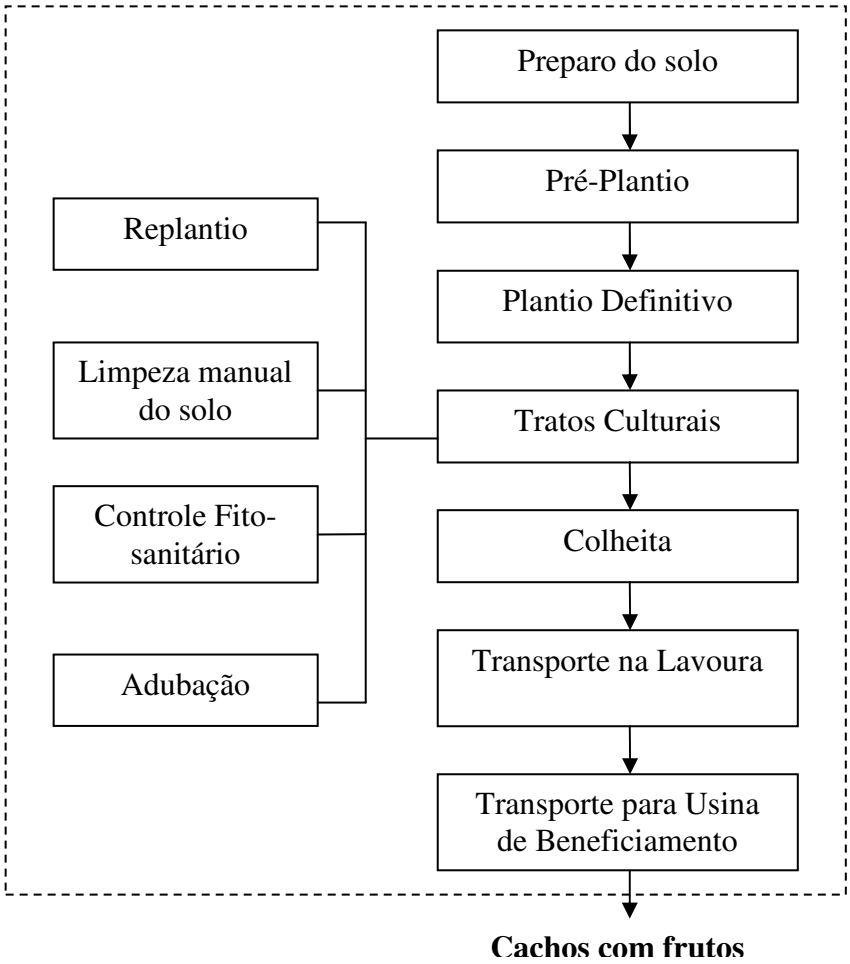


Figura 5-1 – Modelo do Ciclo Produtivo da Plantação de Palma

5.1.1.1 Inventário de Entradas na Plantação de Palma

O inventário apresentado para o ciclo produtivo da plantação de palma quantifica os fluxos de entrada em função da produção de 1.000 kg de cachos com fruto. Considera-se o ciclo completo da lavoura de 33 anos. No ano 0 (zero) é realizado o preparo do solo (limpeza do terreno); nos anos 1 e 2, o pré-plantio. No ano 3 realiza-se o plantio definitivo e inicia-se a produção no ano 6, realizando-se 27 colheitas ao longo do ciclo completo. A produtividade anual média por hectare das árvores em produção é de 15 toneladas. Deste modo, a produtividade média do ciclo produtivo é de 12,3 toneladas de cacho por hectare-ano.

As entradas no ciclo produtivo da plantação de palma são óleo diesel, fertilizantes e defensivos. No pré-plantio é realizada irrigação controlada das mudas. Entretanto, no estudo original não há levantamento de consumo de energia ou materiais nesta operação, nem descrição da operação de irrigação. Durante toda a fase produtiva da plantação, não é realizada irrigação devido à elevada pluviosidade da região norte, onde se localiza a unidade agrícola utilizada para o levantamento de dados.

O consumo de diesel ocorre em duas operações: no preparo do solo e no transporte dos cachos para a usina de beneficiamento. O dado de consumo de diesel no preparo do solo utilizado será levantado de MACEDO[9] et al (2004). Para o cálculo do consumo de diesel no transporte dos cachos para a usina de beneficiamento considerou-se uma distância média de ida e volta de 58 km.

As quantidades de adubo e nutrientes no pré-plantio foram calculadas com base nos dados de BARCELOS et al. (1995). Para o consumo de fertilizantes nos tratos culturais foram usados dados fornecidos pelo Grupo Agropalma. Cerca de 14% da área é destinada à adubação orgânica com cachos vazios, borra[10] excedente e 30% das fibras e cascas resultantes da etapa industrial. Em VIANNA (2006), estes dados são apresentados já agregados para toda a fase agrícola (Pré-Plantio e Plantio Definitivo).

Para o levantamento sobre o consumo de defensivos, foram empregados os valores médios utilizados pela Agropalma. Apesar do uso preferencial da unidade agrícola estudada pelo controle biológico, para comprometer o agente polinizador, ainda são utilizados três defensivos: acefato, carbaryl e glifosato.

[9] Neste estudo o preparo do solo é realizado para a cultura de cana-de-açúcar. Mas como não há dados para esta operação no estudo original, o dado de MACEDO et al (2004) servirá como aproximação.
[10] A borra também é utilizada na AGROPALMA para a produção de biodiesel. Entretanto, este processo não está incluído no escopo deste estudo.

A Tabela 5-3 apresenta o inventário de entradas no ciclo produtivo da palma, desde o preparo do solo até a entrega dos cachos na unidade industrial. Os fluxos estão quantificados em quantidade (kg) e energia (GJ).

Tabela 5-3 – Inventário para Produção de 1.000 kg de Cachos de Palma

Etapa	Entrada	Kg	GJ
Preparo do solo	Diesel	1,84E-01	1,05E-02
Plantio Definitivo	Trabalho manual	Não quantificado	
Tratos Culturais e Pré-Plantio: Adubação	N	9,82E-01	6,04E-02
	P	1,52	1,47E-02
	K	23,89	1,60E-01
	Mg	2,09	N.D.
	Mn	2,59E-02	N.D.
	Zn	7,04E-02	N.D.
	B	1,66E-02	N.D.
	Glifosato	4,71E-01	2,13E-01
	Carbaryl	1,89E-01	2,88E-02
	Acefato[11]	9,65E-05	4,37E-05
Colheita	Manual	Não quantificado	
Transporte na lavoura	Animal	Não quantificado	
Transporte para usina	Diesel	9,94E-01	5,66E-02
Energia Total			5,44E-01

Emissões	**kg**	**Kg CO_2 eq[12]**
CO_2	3,93E+00	3,93E+00
CH_4	2,58E-03	5,42E-02
N_2O	9,17E-02	2,84E+01
CO	2,35E-02	
SO_2	3,15E-03	
Nox	7,77E-02	
Material Particulado	1,49E-03	
COVNM	1,44E-02	
Total		3,24E+01

Obs.: N.D. – Não Disponível.

[11] Como não foi encontrado na literatura o valor da energia embutida neste tipo de herbicida, foi utilizado o valor do glifosato (PIMENTEL, 1980).

[12] Os Potenciais de Aquecimento Global calculados em referência ao dióxido de carbono (kg CO_2eq) para um horizonte de tempo de 100 anos utilizados neste relatório foram: Para o metano = 21, e para o óxido nitroso = 310.

5.1.2 Ciclo Produtivo da Soja

A produção de soja envolve as seguintes operações agrícolas mecanizadas:

- Dessecagem da cobertura verde;
- Calagem;
- Semeadura da soja (plantio direto);
- Pulverização de agroquímicos (tratos culturais);
- Colheita;
- Semeadura da cobertura verde;
- Transporte da soja para usina de beneficiamento.

A primeira operação em uma lavoura de soja é a dessecagem da cobertura verde, quando se realiza o corte e deixa-se o material vegetal secar sobre o solo. A cobertura verde é utilizada para proteger o solo após a colheita e antes da próxima semeadura. A segunda operação é a calagem, quando se aplica calcário para corrigir o pH do solo e fornecer cálcio e magnésio.

Depois da aplicação de calcário, realiza-se a semeadura da soja. Neste estudo se considera que toda a área de soja é feita por plantio direto. O manejo do solo no sistema de plantio direto não utiliza as gradações profundas, necessárias à incorporação do calcário. Durante o crescimento da lavoura ocorrem os tratos culturais com aplicação de herbicidas, inseticidas, fungicidas e fertilizantes. A colheita, a semeadura da cobertura verde e o transporte da soja para a usina de beneficiamento encerram o ciclo produtivo da lavoura.

Os dados levantados em MARZULLO (2006), principal referência utilizada nesta parte do estudo, correspondem à média da região Centro-Oeste do Brasil. A produtividade considerada no modelo é de 2,88 t de grãos de soja por hectare por ano.

A Figura 5-2 apresenta o modelo do ciclo produtivo da soja com plantio direto.

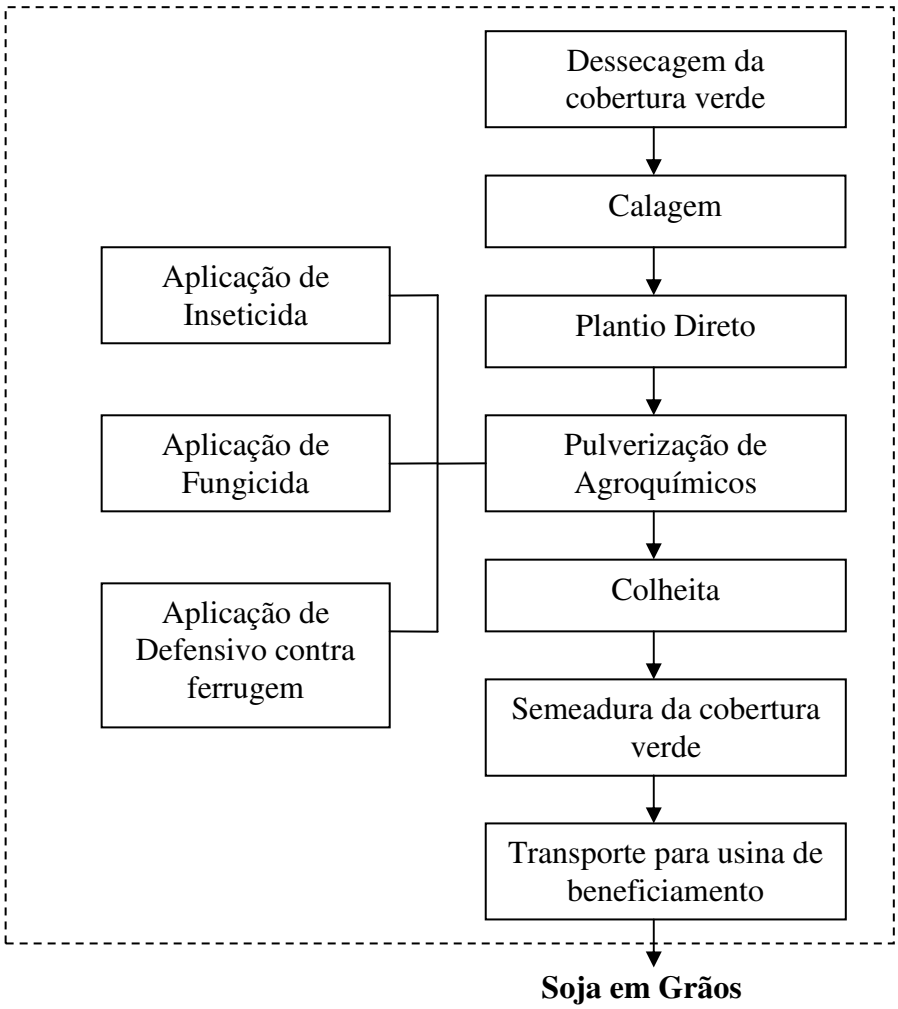


Figura 5-2 – Modelo do Ciclo Produtivo da Plantação de Soja

5.1.2.1 Inventário de Entradas na Plantação de Soja

As entradas na fase agrícola da plantação de soja são o óleo diesel consumido nas operações mecanizadas, os fertilizantes e os defensivos.

A Tabela 5-4 apresenta os dados de consumo de diesel nas operações agrícolas do cultivo de soja. Estes dados foram utilizados para o cálculo do inventário apresentado na Tabela 5-6 para a produção de uma tonelada de grãos de soja.

Tabela 5-4 – Consumo de Diesel nas Operações Mecanizadas do Cultivo da Soja

Operação	$L.ha^{-1}$	$L.t^{-1}$	$kg.t^{-1}$*
Dessecagem da cobertura verde	0,58	0,2	0,17
Calagem	2,36	0,8	0,67
Semeadura da soja (plantio direto)	8,67	3,0	2,52
Aplicação de inseticida	0,58	0,2	0,17
Aplicação de fungicida	0,58	0,2	0,17
Aplicação de defensivo contra ferrugem	0,58	0,2	0,17
Colheita	29	10,1	8,48
Semeadura da cobertura verde	7,91	2,7	2,27
Total			14,62

Fonte: modificado de MELLO et al, 2005. Obs.: * - Densidade do óleo diesel de 0,84kg/L.

Os consumos de fertilizantes e defensivos foram levantados em (AGRIANUAL, 2006) e são apresentados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Consumo de Fertilizantes e Defensivos na Produção de 1 Tonelada de Grãos de Soja

Fertilizantes e corretivo	**Quantidade**	**Unidade**
Nitrogênio – N	2,78	kg
Fosfato – P_2O_5	27,8	kg
Cloreto de Potássio – KCl	27,8	kg
Calcário	278	kg
Defensivos	**Quantidade**	**Unidade**
Inoculante (Rhizobiun – bactéria)	0,59	L
Herbicidas (alachlor)	0,916	kg I.A.
Inseticidas (triclorfom)	0,278	kg I.A.
Fungicidas (tebuconazol + flutriafol)	0,0694	kg I.A.

Obs.: kg I.A. – Quilograma de ingrediente ativo.
Fonte: AGRIANUAL, 2006.

A modelagem da operação de transporte no estudo original considera uma distância de 500 km entre a unidade agrícola produtora de soja e a usina de beneficiamento, resultando em uma viagem total de 1.000 km. Segundo a ABTC (2004), cada caminhão de transporte de soja carrega, no máximo, 27 toneladas. Para o cálculo do consumo de diesel foi utilizado o dado para veículo com capacidade de 28 toneladas, levantado em banco de dados internacional. O consumo de diesel levantado é de 0,043 kg por tonelada por quilômetro.

A Tabela 5-6 apresenta o inventário e contabiliza as entradas energéticas de todo o ciclo produtivo da plantação de soja, incluindo o transporte até a usina de beneficiamento.

Tabela 5-6 – Inventário para Produção e Transporte de 1.000 kg de Grãos de Soja

Entrada	**kg**	**GJ**
Diesel	57,62 (43*)	3,28 (2,45*)
N	2,78	0,17
P	27,8	0,27
K	27,8	0,19
$CaCO_3$	278	0,36
Herbicida	0,916	0,23
Inseticida	0,278	0,05
Fungicida	0,0694	0,01
Total		*4,56*
Emissões	**kg**	**kg CO_2eq.**
CO_2	1,90E+02	1,90E+02
CH_4	9,89E-03	2,08E-01
N_2O	1,63E-02	5,05E+00
CO	6,90E-01	
COVNM	5,83E-01	
HC (COVNM+CH_4)	5,94E-01	
MP	1,03E-01	
NOx	2,10E+00	
SOx	2,64E-01	
Total		*1,95E+02*

Obs.: * Devido ao transporte de soja da plantação até a usina de beneficiamento.

5.1.3 Ciclo Produtivo da Mamona

Analogamente ao realizado para o óleo de palma e para o óleo de soja, buscou-se identificar uma fonte de dados que: i) cobrisse todo o ciclo produtivo do óleo vegetal, ii) fosse representativo de uma região produtora e iii) permitisse adequar os dados à estrutura de um estudo de avaliação de ciclo de vida. Entretanto, para o caso da mamona, nenhum documento que atendesse completamente a todos estes requisitos foi identificado.

ALMEIDA NETO et al. (2004), referência principal utilizada nesta parte do estudo, apresentam dados já convertidos para o teor energético e agregados para a fase agrícola de plantação de mamona e para a fase industrial de obtenção do óleo de mamona. O custo energético da plantação de mamona foi calculado a partir de dados do cenário padrão da cultura no Estado da Bahia, de acordo com dados da Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola (EBDA), sendo considerada uma produtividade de 1.800 kg de bagas por hectare. As operações agrícolas não são descritas, o que não permite a identificação da origem dos custos energéticos (fertilizantes, corretivos e combustíveis).

Desta forma, para quantificar as práticas de cultivo da mamona, foram utilizadas as informações da EMBRAPA (2006) descritas a seguir.

A mamoneira é uma cultura explorada para a obtenção do óleo das sementes de seus frutos, que tem largo uso como insumo industrial. Além do óleo, seu produto principal, a mamona fornece como sub-produto a torta, que pode ser utilizada como fertilizante. No entanto, por ser altamente tóxica, não é usada para a alimentação animal.

A produtividade da mamona admitida para as condições semi-áridas do Nordeste brasileiro é de 1.500 kg de bagas/hectare, em anos de precipitação pluvial normal. De cada 1.000 kg de mamona em bagas é possível obter 450 kg de óleo e 500 kg de farelo e torta. Existem vários métodos de extração do óleo vegetal – por pressão mecânica e pelo uso de solventes.

O plantio da mamoneira pode ser feito de forma manual ou mecânica, dependendo da disponibilidade de implementos e das condições econômicas do produtor. O plantio manual é mais comum para cultivares com sementes de tamanhos médio e grande, e em sistema de plantio consorciado. Esse método consiste em semear duas ou três sementes em covas previamente abertas. Gastam-se de 5 a 15 kg de sementes para plantar um hectare. O plantio mecânico é recomendado para cultivares de sementes pequenas ou médias, cujos espaçamentos entre plantas na fileira sejam pequenos (0,50 a 1,0 m).

O ciclo produtivo da mamona envolve as seguintes etapas:

- Plantio;

- Tratos culturais (rotação, desbaste, poda, controle de plantas daninhas, de pragas e doenças);
- Calagem e adubação;
- Colheita;
- Secagem;
- Descascamento;
- Acondicionamento e Armazenagem.

A mamoneira é uma planta exigente em nutrientes. Pelo fato de suas sementes terem elevadas concentrações de óleo e proteínas, ela demanda razoável quantidade de elementos essenciais, especialmente nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio e magnésio. Para que a adubação e a calagem sejam as melhores possíveis, a análise do solo deve preceder o plantio.

Para as condições edafoclimáticas do Estado da Bahia, responsável por mais de 80% da produção nacional de mamona, é recomendada a seguinte adubação: 60 kg/ha de nitrogênio (N); 40-80 kg/ha de pentóxido de fósforo (P_2O_5); 20-60 kg/ha de óxido de potássio (K_2O).

Em geral, aplica-se 2,0 t/ha de calcário dois a três meses antes do plantio, mantendo-se o solo com o pH próximo da neutralidade. Para o controle das pragas é admitido o uso de 70g I.A../ha de endosulfan e 350g I.A./ha de carbosulfan.

As entradas na fase agrícola da plantação da mamona referem-se a fertilizantes e defensivos. Admite-se que o preparo do solo e a semeadura são feitos de forma manual, não ocorrendo consumo de diesel.

A Tabela 5-7 apresenta o consumo de fertilizantes e defensivos para o cultivo da mamona, levantados com base em indicações da EMBRAPA Algodão. Os valores em unidades energéticas (GJ) foram calculados utilizando os fatores dados no ANEXO 1. Estes dados permitem calcular um custo energético de 16,2 GJ por tonelada de óleo de mamona, inferior ao custo energético calculado por ALMEIDA NETO et al. (2004), apresentado na Tabela 5-16, com uma produtividade de mamona cerca de 20% maior que a indicada pela EMBRAPA (2006), e utilizado na avaliação do balanço energético do biodiesel de mamona deste estudo.

Tabela 5-7 – Consumo de Fertilizantes e Defensivos na Produção de 1.000 kg de Bagas de Mamona

Entradas	kg	GJ
Nitrogênio (N)	60	3,69
Fósforo (P_2O_5)	60	0,58
Potássio (K_2O)	40	0,27
Calcário	2.000	2,62
Endosulfan	4,7E-02	2,0E-02
Carbosulfan	2,3E-01	9,8E-02
Total		7,28

Fonte: Modificado de EMBRAPA (2006).

5.2 FASE INDUSTRIAL: OBTENÇÃO DOS ÓLEOS VEGETAIS

5.2.1 Óleo de Palma

A usina de beneficiamento modelada neste estudo, com base nos dados fornecidos pela Agropalma, obtém 200 kg de óleo bruto de palma e 15 kg de óleo de palmiste a partir do processamento de 1.000 kg de cachos, gerando 35 kg de torta de palmiste. Aproximadamente 70% da biomassa do fruto após extração do óleo de palma (constituída de fibras) é utilizada na geração de energia. O restante é enviado para adubação orgânica na lavoura. A energia total (térmica e motriz) requerida para processar os 1.000 kg de cachos de palma é de 0,054[13] GJ. Entretanto, com exceção do início do processo que consome óleo diesel, o restante da energia elétrica e térmica consumida na operação do processo é gerado a partir dos resíduos da própria usina.

A industrialização da palma para obtenção do óleo de palma exige esta série de etapas:

- Esterilização;
- Debulhação;
- Digestão;
- Prensagem;
- Desfibragem;
- Geração de vapor;
- Geração de energia elétrica;
- Decantação;
- Depuração;
- Quebra das nozes[14];
- Trituração e prensagem.

A primeira etapa é a esterilização, onde os cachos são aquecidos por contato direto com vapor. As enzimas tornam-se inativas e os processos de degradação são paralisados.

Os cachos esterilizados são levados para o debulhador, onde são separados os frutos, que são encaminhados para o digestor. Os cachos vazios são recolhidos para utilização como adubo orgânico.

No digestor os frutos são submetidos a um processo de cozimento e fricção mecânica, com aquecimento direto, para que ocorra a liberação do óleo. A massa constituída de fibras e nozes que sai do digestor é prensada, com adição de água, para que finalmente o óleo de dendê seja extraído.

[13] O consumo de cerca de 0,09 kg de diesel por 150 kg de cachos para o início do processo corresponde a 0,0042 GJ (aproximadamente 7,8%).
[14] A quebra das nozes e a trituração e prensagem são utilizadas para obtenção do óleo de palmiste (co-produto do óleo de palma0 e da torta de palmiste (subproduto). Entretanto, serão incluídas no sistema de produto do ciclo produtivo do óleo de palma, porque os dados de consumo industriais de energia encontram-se agregados para o conjunto das operações.

As fibras e as nozes são enviadas para o desfibrador, onde as fibras são separadas para serem usadas como combustível na geração de vapor. Parte do vapor aciona turbo-geradores para a produção de energia elétrica, e o restante é utilizado nos esterilizadores. As nozes são quebradas para separar as cascas das amêndoas. As cascas também são enviadas para a geração de vapor. As amêndoas são trituradas e prensadas para a obtenção do co-produto óleo de palmiste.

O óleo de dendê extraído pela prensa, denominado óleo cru, passa por uma etapa de beneficiamento que inclui a operação de decantação, para separar impurezas sólidas e matérias coloidais, e uma depuração, para eliminar parte da umidade.

A unidade industrial de obtenção do óleo de palma é auto-suficiente em energia. Cerca de 70% das fibras e cascas resultantes do processo são destinadas para geração do vapor utilizado no processo e para produção de energia elétrica. Entretanto, é necessário utilizar óleo diesel para iniciar o processo. A quantidade de óleo diesel consumido é de cerca de 3 kg de diesel por tonelada de óleo produzido.

A etapa de refino do óleo de dendê foi excluída do subsistema, pois não há necessidade de se utilizar um óleo de qualidade tão alta para a fabricação do biodiesel.

A Figura 5-3 apresenta o modelo da fase industrial de obtenção do óleo de palma considerado neste estudo.

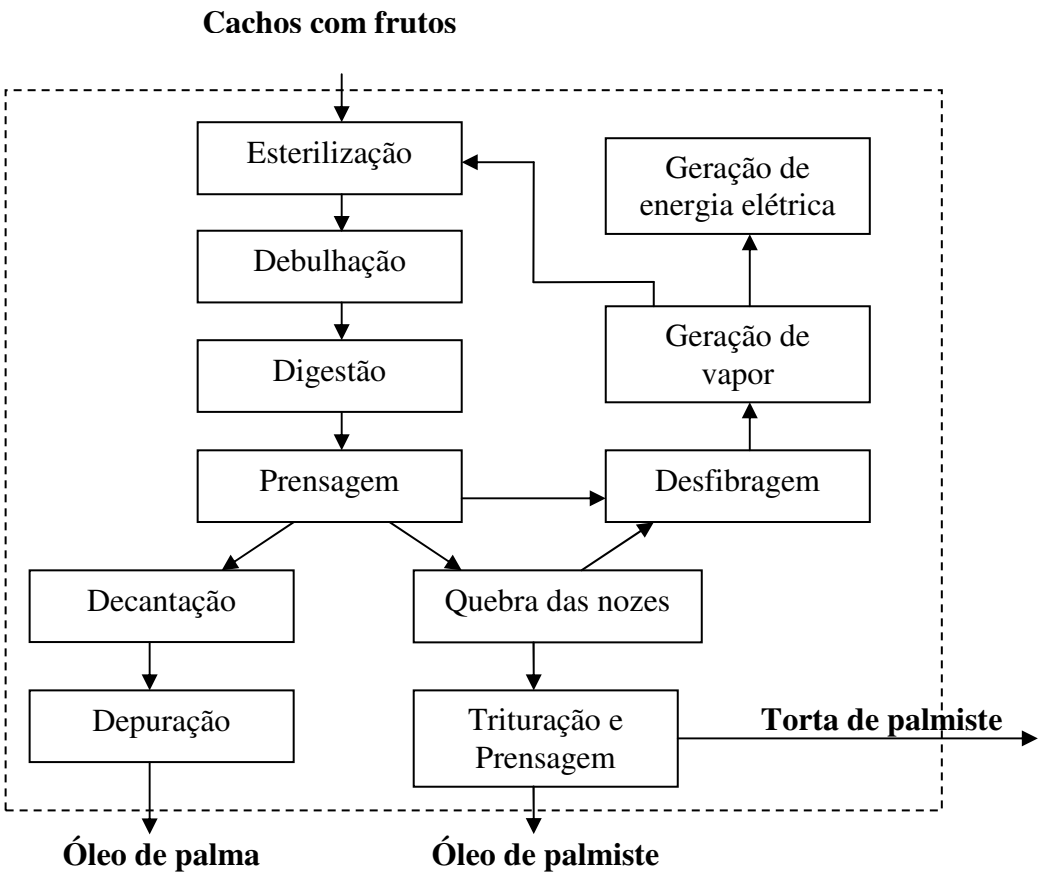


Figura 5-3 – Modelo da Fase Industrial para Obtenção do Óleo de Palma e Co-Produtos

5.2.1.1 Inventário de Entradas na Obtenção dos Produtos da Palma

Os dados da etapa industrial foram baseados em dados primários e complementados com fontes secundárias, pois a empresa em cujos dados foi baseada a usina de beneficiamento modelada neste estudo (Agropalma) não efetua todas as medições necessárias para a elaboração do inventário.

Como a extração do óleo de dendê é um processo físico, as entradas da etapa industrial são apenas os cachos com os frutos da palmeira, água e diesel para iniciar o processo. A água não foi computada no inventário por falta de dados sobre o sistema de captação e tratamento e, conseqüentemente, do custo energético associado.

VIANNA (2006) não detalha o balanço energético da usina. Portanto, não foi possível atribuir os consumos energéticos das operações específicas para o óleo de palma (decantação e depuração), nem das específicas para o óleo de palmiste (quebra das nozes e trituração e prensagem). Esta informação seria útil na alocação dos custos energéticos entre os co-produtos da unidade industrial.

A Tabela 5-8 apresenta o inventário para o processamento de 1.000 kg de cachos de palma.

Tabela 5-8 – Inventário para Processamento de 1000 kg de Cachos de Palma

Referência	1.000 kg de cachos	
Entrada	**kg**	**GJ**
Diesel	5,92E-01	3,37E-02
Total		*3,37E-02*
Emissões	**kg**	**kg CO_2 eq.**
CO_2	2,01E+00	2,01E+00
N_2O	3,85E-03	1,19E+00
CO	3,25E-04	
MP	1,23E-03	
SOx	9,87E-03	
HC	1,77E-04	
Total		*3,20E+00*

5.2.1.2 Critério de Alocação entre os Produtos da Palma

Juntamente com o óleo de dendê, produz-se também o óleo de palmiste e gera-se a torta de palmiste. Neste estudo, devido ao baixo valor comercial, a torta de palmiste será considerada como subproduto e terá fator de alocação nulo. A Tabela 5-9 apresenta os valores unitários do óleo de dendê, de palmiste e da torta de palmiste; as quantidades resultantes do processamento de 1.000 kg de cachos de palma; e os fatores de alocação obtidos.

Tabela 5-9 – Valor Unitário, Produção, Valor por 1.000 kg de Cachos e Fator de Alocação dos Produtos da Palma, e do Subproduto Torta de Palmiste

Produtos	R$/kg	Kg	R$	Alocação	
Óleo de dendê	R$ 1,07	200	214,83	0,89	0,9
Óleo de palmiste	R$ 1,38	15	20,67	0,09	0,1
Valor total dos óleos			235,50		
Torta de palmiste	R$ 0,20	35	7,00	0,02	-
Valor total			242,50		

Ao se considerar a torta de palmiste nos cálculos dos fatores de alocação, este subproduto teria um fator de alocação de 0,02. Entretanto, a alocação deve ser realizada apenas entre co-produtos, julgados com base no valor econômico que cada um agrega à operação. Portanto, os valores dos inventários da fase agrícola e da fase industrial do ciclo produtivo do óleo de palma serão alocados em 0,9 para o óleo de palma e 0,1 para o óleo de palmiste.

5.2.1.3 Inventário de Entradas na Obtenção de Óleo de Palma

O inventário para a obtenção de 1.000 kg de óleo bruto de palma apresentado na Tabela 5-10 é obtido multiplicando-se a Tabela 5-8 pelo fator de alocação do óleo de palma, 0,9, e por 5 para adequar a quantidade de cachos a 1.000 kg de óleo de palma.

Tabela 5-10 – Inventário para Obtenção de 1.000 kg de Óleo Bruto de Palma

Referência	**1.000 kg de óleo bruto de palma**	
Entrada	**kg**	**GJ**
Diesel	2,66E+00	1,52E-01
Instalações e Equipamentos*		5,29E-01
Total		*6,81E-01*
Emissões	**kg**	**kg CO_2 eq**
CO_2	9,03E+00	9,03E+00
N_2O	1,73E-02	5,36E+00
CO	1,46E-03	
MP	5,52E-03	
SOx	4,44E-02	
HC	7,98E-04	
Total		1,44E+01

* Estimado a partir do valor calculado para o álcool anidro por MACEDO et al (2004).

5.2.1.4 Inventário Consolidado do Óleo Bruto de Palma

A Tabela 5-11 apresenta o inventário consolidado para a obtenção de 1.000 kg de óleo bruto de palma. Esta Tabela é obtida multiplicando-se a Tabela 5-3 por 5, para adequar à demanda de cachos à produção de 1.000 kg de óleo, e pelo fator de alocação (0,9) do óleo de palma, em seguida somando com a Tabela 5-10.

Tabela 5-11 – Inventário Consolidado para 1.000 kg de Óleo de Palma

Entrada	**kg**	**GJ**
Diesel	7,96	0,45
N	4,42	0,27
P	6,84	0,07
K	107,51	0,72
Mg	9,41	
Mn	1,17E-01	
Zn	3,17E-01	
B	7,47E-02	
Glifosato	2,12	0,96
Carbaryl	8,51E-01	1,30E-01
Acefato	4,34E-04	1,97E-04
Instalações e Equipamentos*		5,29E-01
Energia Total		*3,2*
Produto	kg	GJ
Óleo de Palma	1.000	38
Produto/Entradas		11,9
Emissões	**kg**	**kg CO_2 eq.**
CO_2	2,67E+01	2,67E+01
CH_4	1,16E-02	2,44E-01
N_2O	4,30E-01	1,33E+02
CO	1,07E-01	
MP	1,22E-02	
SOx	5,86E-02	
NOx	3,50E-01	
HC	6,56E-02	
Total		1,60E+02

* Estimado a partir do valor calculado para o álcool anidro por MACEDO et al (2004).

5.2.2 Óleo de Soja

A unidade de beneficiamento da soja modelada neste estudo obtém 190 kg de óleo e 770 kg de torta para cada tonelada de grãos. A unidade não é auto-suficiente em energia, adquirindo cavacos de madeira e energia elétrica.

A fase industrial de obtenção do óleo de soja bruto inclui as seguintes operações:

- Recebimento;
- Classificação, Pesagem I e Pré-Limpeza;
- Secagem, Armazenamento e Pesagem II;
- Quebra dos Grãos;
- Cozimento;
- Laminação;
- Extração com Solvente;
- Evaporação;
- Filtração;
- Centrifugação;
- De-solventização;
- Condensação;
- Separação.

Durante a preparação, a soja em grãos é classificada de acordo com seu tamanho, umidade e estado (grãos avariados). Logo após a pesagem ela passa por etapas de pré-limpeza, secagem e armazenamento, seguidas por uma re-pesagem para o controle de entrada da matéria-prima e da eficiência da produção. O grão é, então, quebrado para proporcionar um tamanho ideal a fim de que possa ser laminado. A casca é adicionada ao farelo da soja e a polpa segue para o cozedor. Após o cozimento, a polpa da soja é laminada para obter o formato ideal para a extração de óleo.

A etapa de obtenção do óleo se inicia logo após o cozimento e compreende a extração por solvente. Ao passar pelo extrator por solvente, a micela (solvente + óleo) é direcionada ao evaporador para a separação do óleo extraído e do vapor do solvente, enquanto os sólidos que saem do extrator vão para um de-solventizador para separar o vapor do solvente da torta de soja. O vapor de solvente proveniente do evaporador e o vapor de solvente oriundo do de-solventizador são condensados e posteriormente separados em duas correntes: água (efluente) e solvente (reciclo).

A torta restante é aproveitada em indústrias de ração animal. O óleo extraído da micela, denominado óleo bruto, é filtrado e centrifugado, gerando uma borra. A Figura 5-4 apresenta o modelo da fase industrial de obtenção dos produtos da soja.

O processo de obtenção do óleo vegetal para produção de biodiesel não difere do processo convencional de extração para fins alimentícios. Entretanto, para a obtenção do biodiesel, pode-se dispensar a etapa de refino do óleo vegetal (FREITAS, 2005).

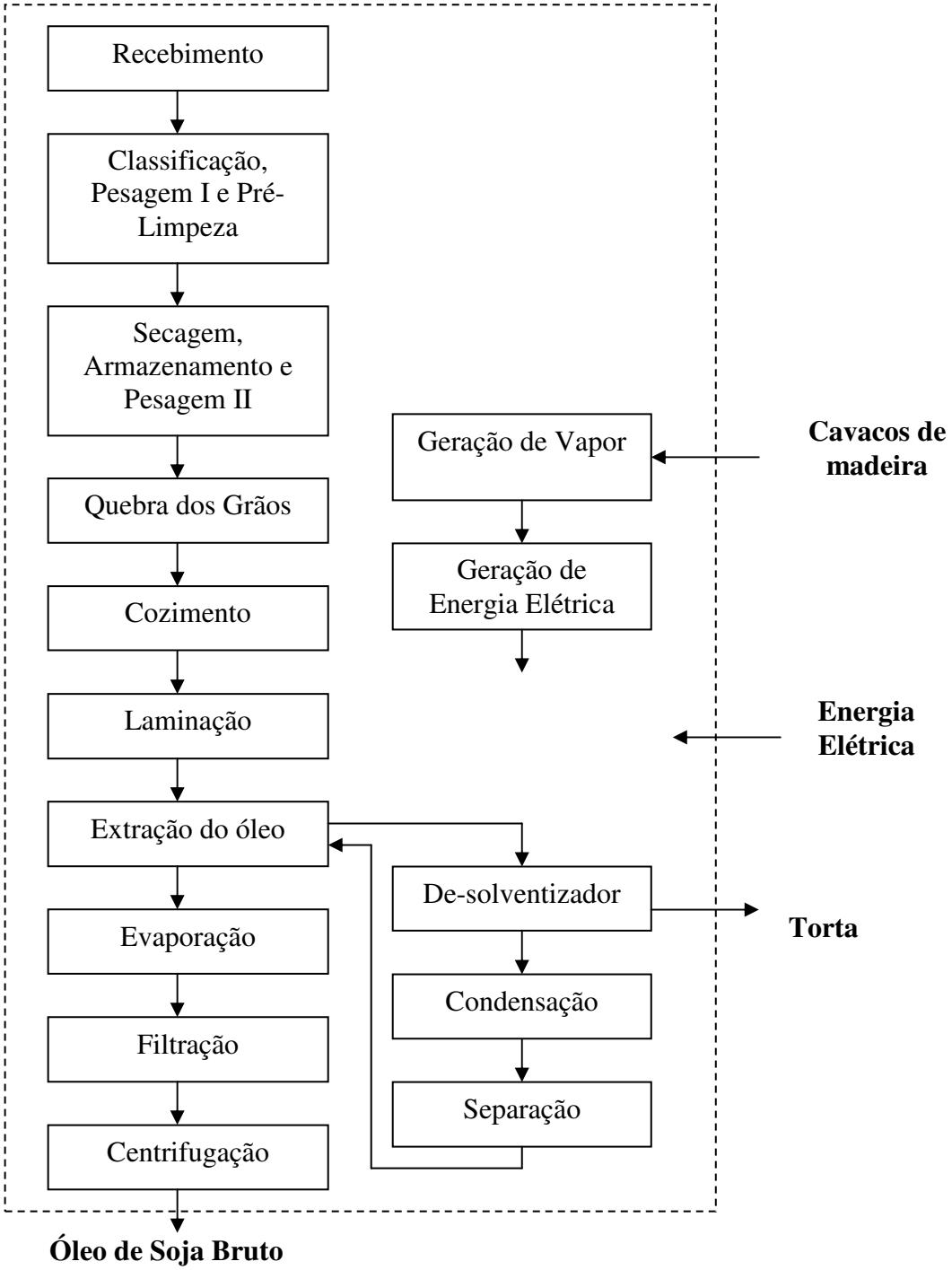


Figura 5-4 – Modelo da Usina de Beneficiamento de Soja Considerada neste Estudo

5.2.2.1 Inventário de Entradas da Obtenção dos Produtos da Soja

As principais entradas externas de energia na fase industrial de obtenção do óleo de soja são a energia elétrica e cavacos de madeira. Outras entradas de energia ocorrem na energia embutida no hexano, solvente utilizado na extração do óleo.

São utilizadas 57,6 kWh de energia elétrica por tonelada de soja processada, sendo que 70% desta energia é gerada internamente (caldeiras de biomassa com turbinas de vapor) e 30% adquirida de rede pública de abastecimento. No processo de extração do óleo bruto de soja, na geração de vapor e nos secadores de soja, são utilizados em média 160 kg de cavacos e 2 litros de hexano por tonelada de soja esmagada.

De acordo com a Petrobrás (2006), a densidade do hexano utilizado em processos de extração de óleos vegetais é de 0,682 kg/L, portanto, considera-se o consumo de hexano na ordem de 1,4 kg (2 litros) por tonelada de soja processada.

A Tabela 5-12 apresenta o inventário de entradas necessárias para o processamento de 1.000 kg de grãos de soja.

Tabela 5-12 – Inventário de Entradas para o Processamento de 1.000 kg de Grãos

Entradas	**Quantidade**	**unidade**	**GJ**
Cavacos	1,60E+02	kg	1,61
Energia elétrica	1,73E+01	kwh	6,23E-02
Hexano[15]	1,4	kg	1,49E-02
Total			1,68
Emissões	**kg**		**kg CO_2 eq.**
Material particulado	9,99E-01		-
NOx	4,40E-03		-
CO	8,80E-01		-
HC	1,41E+00		-
Hidrocarbonetos	2,20E-01		-
SOx	3,22E-04		-

5.2.2.2 Critério de Alocação entre os Produtos da Soja

Da mesma forma que na alocação entre os produtos da palma, o critério de alocação entre os produtos da soja será baseado no valor econômico dos co-produtos. O estudo original, usando dados de Dezembro de 2005 (R$ 1.172,00/tonelada do óleo de soja e a R$ 470,41/tonelada de torta), obteve fatores de alocação de 0,62 para a torta e 0,38 para o óleo de soja. Entretanto, observando as variações nos preços do óleo de soja e da torta, no período de janeiro de 2004 até novembro de 2006, apresentados na Figura 5-5, e a variação nas proporções dos valores econômicos dos produtos, mostrada na Figura 5-6, neste estudo serão adotados os fatores de

[15] Considerou-se a energia embutida do ciclo-hexano, devido à falta de dados para esta substância.

alocação médios do segundo semestre de 2006. Deste modo, os fatores de alocação para o processamento de 1.000 kg de soja são mostrados na Tabela 5-13.

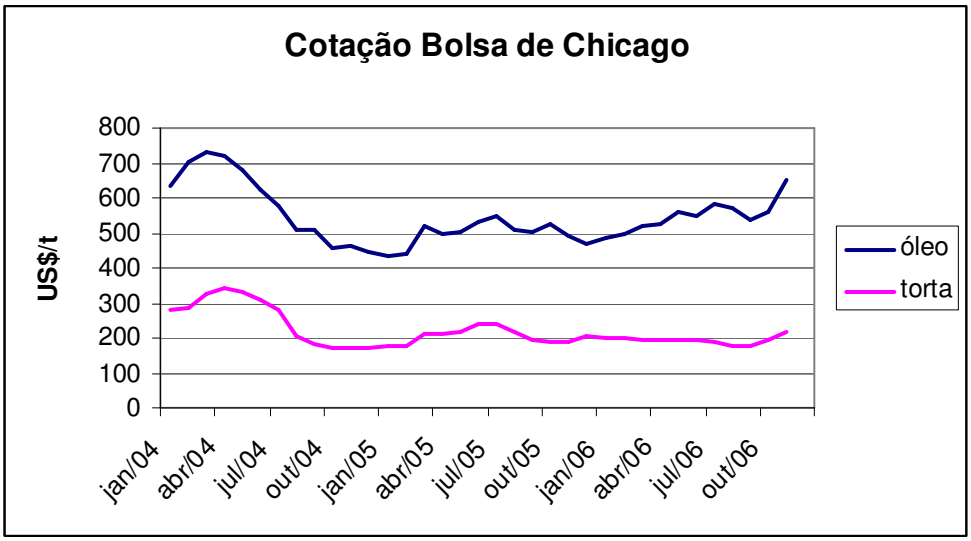


Figura 5-5 – Evolução da Cotação da Tonelada de Óleo e de Farelo de Soja na Bolsa de Chicago, no Período de Janeiro de 2004 a Novembro de 2006

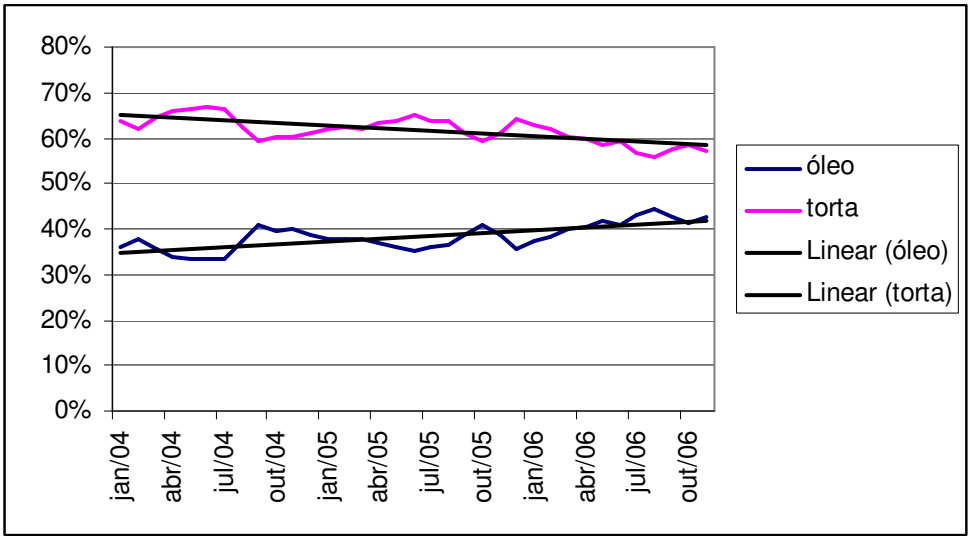


Figura 5-6 – Evolução na Proporção entre os Valores Econômicos dos Produtos da Soja no Período de Janeiro de 2004 a Novembro de 2006

Tabela 5-13 – Fatores de Alocação para os Produtos da Soja

Produtos	Kg / t de soja	US$ / t	US$	Fator de Alocação
Óleo de soja	190	579,93	110,19	0,43
Torta de soja	770	190,98	147,06	0,57

5.2.2.3 Inventário de Entradas para a Obtenção de Óleo Bruto de Soja

O inventário alocado de entradas da etapa de obtenção do óleo de soja é apresentado na Tabela 5-14. Este inventário é obtido multiplicando-se a Tabela 5-12 pelo fator de alocação do óleo de soja, 0,43, e por 5,26 para adequar a quantidade de grãos à obtenção de 1.000 kg de óleo de soja.

Tabela 5-14 – Inventário para a Obtenção de 1.000 kg de Óleo de Soja

Entradas	Quantidade	Unidade	GJ
Cavacos	361,89	kg	3,64
Energia elétrica	39,13	kwh	0,14
Hexano[16]	3,17	kg	3,38E-02
Instalações e Equipamentos*			6,33E-01
Total			4,45E+00
Emissões	**kg**		**kg CO_2 eq**
Material particulado	2,26E+00		-
NOx	9,96E-03		-
CO	1,99E+00		-
HC	3,18E+00		-
Hidrocarbonetos	4,98E-01		-
SOx	7,28E-04		-
* Estimado a partir do valor calculado para o álcool anidro por MACEDO et al (2004).			

5.2.2.4 Inventário Consolidado do Ciclo Produtivo do Óleo Bruto de Soja

O inventário consolidado reúne os inventários da fase agrícola e da fase industrial, devidamente multiplicados pelo fator de alocação e por fatores de conversão para adequar as quantidades de grãos de soja à produção de 1.000 kg de óleo bruto.

A Tabela 5-15 apresenta o inventário consolidado para a obtenção de 1.000 kg de óleo bruto de soja. Esta Tabela é obtida multiplicando-se a Tabela 5-6 por 5,26, para adequar à demanda de grãos à produção de 1.000 kg de óleo, e pelo fator de alocação (0,43) do óleo de soja, em seguida somando com a Tabela 5-14.

[16] Considerou-se a energia embutida do ciclo-hexano devido à dalta de dado para esta substância.

Tabela 5-15 – Inventário Consolidado para a Obtenção de 1.000 kg Óleo de Soja

Entrada	kg	GJ
Diesel	130,32	7,42
N	6,29	0,38
P	62,88	0,61
K	62,88	0,43
$CaCO_3$	628,78	0,81
Herbicida	2,07	0,52
Inseticida	0,63	0,11
Fungicida	0,16	0,02
Cavacos	361,89	3,64
Energia elétrica	39,13	0,14
Hexano	3,17	0,03
Instalações e Equipamentos*		6,33E-01
Energia Total		*14,76*
Produto	Kg	GJ
Óleo de Soja	1.000	36,9
Produto/Entradas		2,5
Emissões	**kg**	**kg CO_2 eq.**
CO_2	4,30E+02	4,30E+02
CH_4	2,24E-02	4,70E-01
N_2O	3,68E-02	1,14E+01
CO	3,55E+00	
COVNM	1,32E+00	
HC	4,52E+00	
Material particulado	2,49E+00	
NOx	4,76E+00	
SOx	5,98E-01	
Total		4,42E+02
* Estimado a partir do valor calculado para o álcool anidro por MACEDO et al (2004).		

5.2.3 Óleo de Mamona

ALMEIDA NETO et al (2004) calculam o custo energético da fase industrial de obtenção do óleo de mamona a partir de dados levantados junto às empresas Bom Brasil, Braswey e Ecotech. Analogamente ao realizado para a fase agrícola, os autores não apresentam a descrição do processo de modo a permitir uma analise mais detalhada dos resultados.

A Tabela 5-16 apresenta os custos energéticos das fases agrícola de plantio da mamona e industrial de extração do óleo de mamona, calculados a partir de ALMEIDA NETO et al (2004).

Tabela 5-16 – Inventário Consolidado para a Obtenção de 1.000 kg Óleo de Mamona

Entrada	kg	GJ
Fase Agrícola	-	24
Fase industrial	-	5
Energia Total		29
Produto	**kg**	
Óleo de Mamona[17]	1.000	35
Produto/Entradas		1,21

[17] Considerando um PCI de aproximadamente 8.360 kcal/kg para o óleo de mamona.

6 BALANÇOS ENERGÉTICOS E INVENTÁRIOS DE EMISSÕES DO BIODIESEL (PALMA, SOJA E MAMONA)

Os poderes caloríficos do biodiesel etílico de palma e de soja levantados na literatura são 39,6MJ/kg (HOLANDA, 2004) e 39,9 MJ/kg (TECPAR, 2006), respectivamente. Devido à incerteza nos dados utilizados e na construção dos modelos dos ciclos produtivos, será considerado que todos os tipos de biodiesel, etílicos e metílicos, possuem 40 MJ/kg. Deste modo, serão necessários 2.500 kg de cada biodiesel para atingir 100 GJ de energia.

6.1 TRANSESTERIFICAÇÃO ETÍLICA DOS ÓLEOS VEGETAIS

Para os cálculos dos balanços energéticos do biodiesel etílico de palma e do éster de soja foram identificados estudos com alto grau de desagregação dos dados (VIANNA, 2006; e MARZULLO, 2006), o que permitiu uma análise mais detalhada dos resultados, bem como adequação aos objetivos desta análise. Para o biodiesel etílico de mamona, foi identificado somente um artigo de congresso (ALMEIDA NETO et al., 2004) apresentando os dados de forma muito agregada, o que limitou a análise dos resultados para este biodiesel. No entanto, tornou possível realizar a comparação entre os tipos de biodiesel.

As etapas de obtenção dos respectivos tipos de biodiesel foram excluídas das fronteiras dos sistemas. Apenas as proporções nos consumos de óleo vegetal e álcool anidro foram consideradas. VIANNA (2006) apresenta uma modelagem da etapa de obtenção do biodiesel etílico de palma onde se verifica que as principais entradas energéticas são as matérias-primas. Adicionalmente, os custos energéticos desta etapa seriam aproximadamente iguais para os 3 tipos de biodiesel estudados.

Também foram excluídas as etapas de transporte do álcool etílico anidro até a usina de obtenção do biodiesel. Geograficamente, as cadeias produtivas do álcool etílico anidro, do óleo de palma, do óleo de soja e do óleo de mamona estão concentradas em diferentes regiões do país. Este fato torna relevante para a decisão final de instalação da unidade de produção do biodiesel a delimitação geográfica dos fornecedores das matérias-primas. Neste estudo, os resultados podem ser analisados como se o álcool etílico anidro e os óleos vegetais fossem produzidos na mesma unidade industrial de produção do biodiesel.

Os custos energéticos de instalações e equipamentos relacionados aos óleos de palma e de soja foram calculados a partir dos valores para o álcool etílico anidro.

MARZULLO (2006) determinou a proporção entre óleo de soja e álcool etílico anidro de 6:1 necessária para a obtenção do biodiesel etílico de soja via transesterificação, com base no balanço estequiométrico e na composição típica do óleo de soja. A Figura 6-1 apresenta a reação e seu balanço estequiométrico.

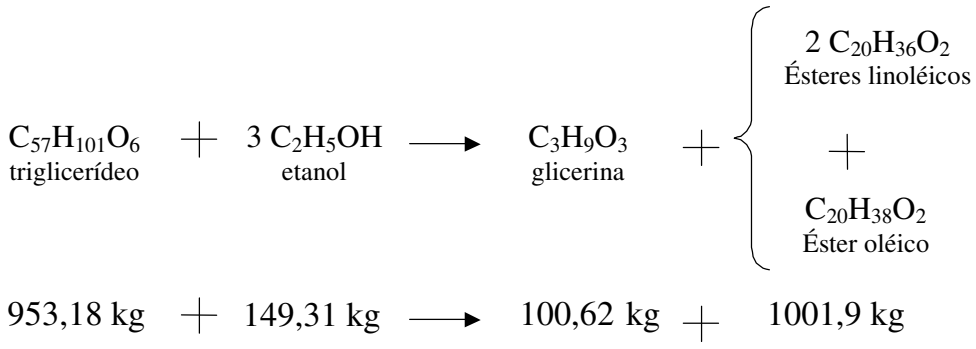


Figura 6-1 – Reação e Balanço Estequiométrico da Obtenção de Biodiesel a partir da Reação de Etanol com Triglicerídeo do Óleo de Soja

VIANNA (2006) considerou para a transesterificação do óleo de palma a proporção mássica de reagentes entre o óleo vegetal e o etanol de 2:1[18]. Em ALMEIDA NETO et al. (2004) não foi possível desagregar a entrada de etanol dos custos energéticos totais na produção do biodiesel. Por este motivo, este estudo considerou que todo o custo energético da produção do biodiesel de mamona era devido ao etanol. Esta consideração permitiu calcular uma proporção mássica de aproximadamente 1,34:1. Este resultado conflita com a proporção esperada de cerca de 6:1. Por este motivo, e devido à impossibilidade de desagregar os dados de ALMEIDA NETO et al (2004), optou-se apenas por reproduzir os custos energéticos da fase agrícola da mamona e da fase de obtenção do óleo de mamona, e atribuir o restante do custo energético ao álcool etílico anidro, usando o custo energético para o álcool etílico anidro obtido de MACEDO et al (2004).

Desta forma, neste estudo será considerado que para a obtenção de 2.500 kg de biodiesel etílico de soja são necessários 2.375 kg de óleo de soja e 375 kg de álcool etílico anidro. Esta mesma proporção será considerada para a obtenção do biodiesel etílico de palma.

Os resultados dos balanços energéticos dos ésteres etílicos de palma e de soja foram calculados a partir das tabelas:

[18] Esta proporção resulta em uma relação O/I de 3,8.

- Tabela 5-3 – Inventário para Produção de 1.000 kg de Cachos de Palma;
- Tabela 5-10 – Inventário para Obtenção de 1.000 kg de Óleo Bruto de Palma;
- Tabela 5-6 – Inventário para Produção e Transporte de 1.000 kg de Grãos de Soja;
- Tabela 5-14 – Inventário para a Obtenção de 1.000 kg de Óleo de Soja;
- Tabela 4-2 – Inventário de Energia na Produção de Álcool Etílico Anidro.

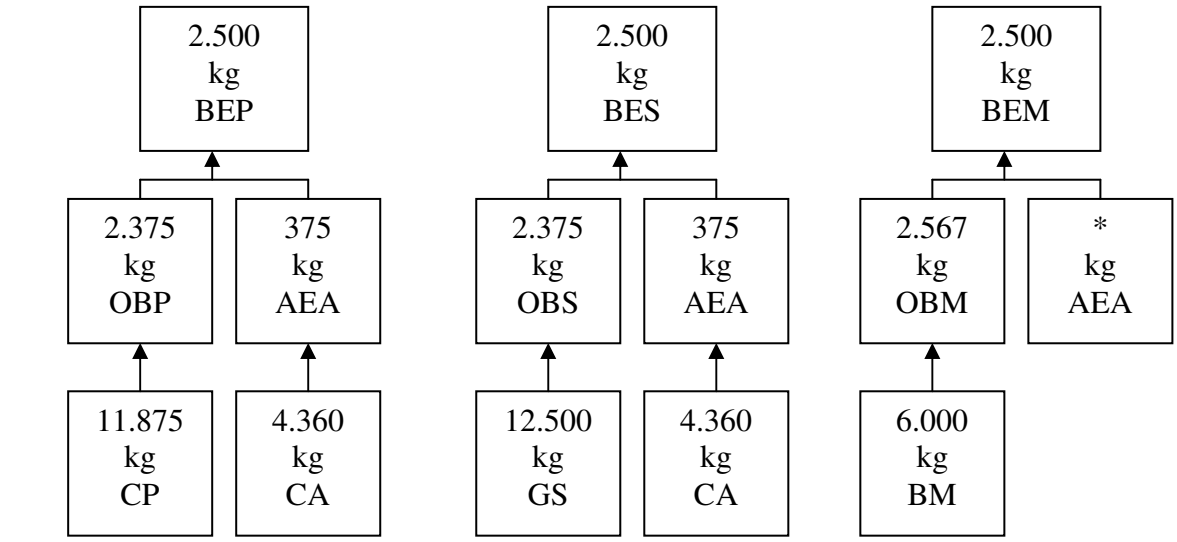
A Tabela 5-3 e a Tabela 5-6 dos inventários das fases agrícolas da palma e da soja foram multiplicadas pelos fatores de alocação do óleo de palma (fator de alocação = 0,9) e do óleo de soja (fator de alocação = 0,43). Os cálculos dos fatores de alocação do óleo de palma e do óleo de soja são apresentados nos itens 5.2.1.2 e 5.2.2.2, respectivamente. Para adequar os dados destas tabelas ao fluxo de 2.500 kg (100 GJ) de biodiesel, estes devem ser também multiplicados por 14,2 e 12,5, respectivamente para palma e soja.

A Tabela 5-10 e a Tabela 5-14 dos inventários das fases industriais de obtenção dos óleos de palma e de soja já são multiplicadas pelo fator de alocação, necessitando apenas multiplicar por 2,84 e 2,375 para óleo de palma e óleo de soja, respectivamente, para adequar ao fluxo de 2.500 kg (100 GJ) de biodiesel.

A Tabela 4-2 requer apenas adequação ao fluxo de 2.500 kg (100 GJ) de biodiesel, uma vez que não se considerou o bagaço excedente como co-produto do álcool etílico anidro. Como foi considerada a mesma proporção mássica entre óleo vegetal e etanol para a transesterificação dos óleos de palma e de soja, a Tabela 4-2 é apenas multiplicada por 0,375.

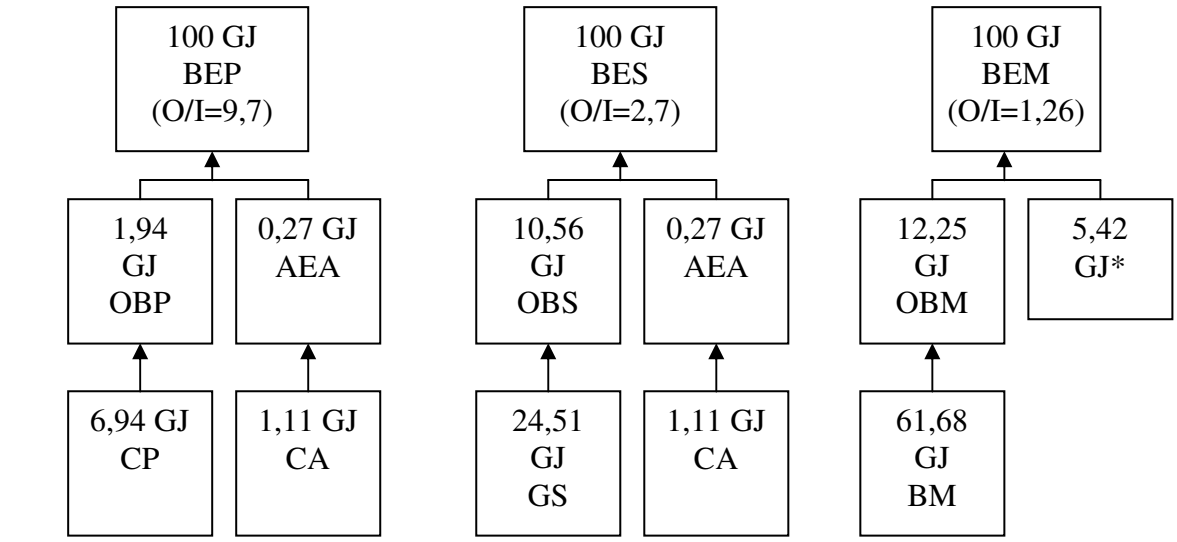
O valor da relação O/I para o biodiesel etílico de palma, calculado neste estudo, é de 9,7. Para o biodiesel etílico de soja o valor de O/I encontrado foi de 2,7. O balanço energético para o biodiesel etílico de mamona, reproduzido de ALMEIDA NETO et al (2004), apresenta uma relação O/I de 1,26.

A Figura 6-2 e a Figura 6-3 apresentam os fluxos materiais e energéticos, respectivamente, requeridos para atender a produção de 100 GJ de energia nos biodieseis etílicos analisados.



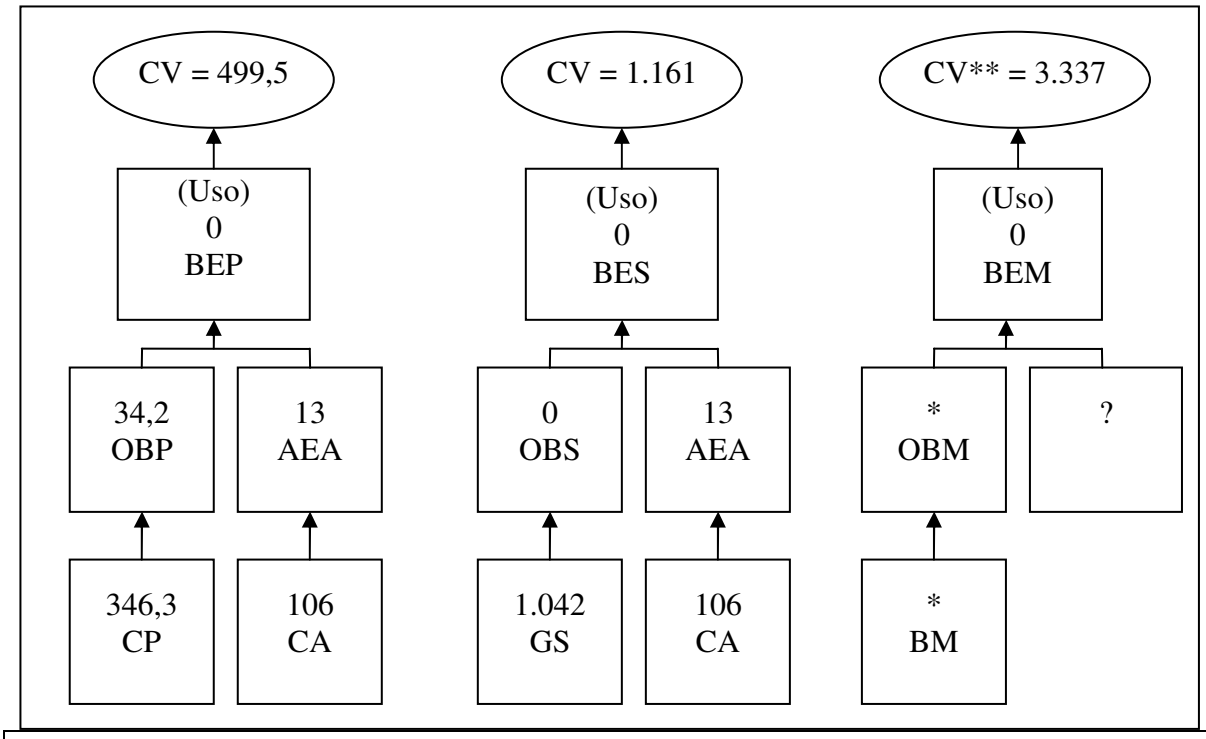
* Não foi possível determinar a partir do trabalho original

Figura 6-2 - Fluxos de Matérias-Primas Necessários para a Obtenção de 2.500 kg de cada Biodiesel, pela Rota Etílica



* Agregado para todas as entradas na obtenção do biodiesel de mamona

Figura 6-3 – Fluxos Energéticos Necessários para a Obtenção de 100 GJ de cada Biodiesel, pela Rota Etílica



* Não foi possível quantificar as origens dos custos energéticos associados às fases agrícola e industrial do óleo de mamona.
** Considerando que a intensidade de CO_2 do conteúdo energético do BEM, $kgCO_2eq/MJ$ de energia no biodiesel, é igual à média dos valores para o BEP e o BES.
Valores entre parênteses correspondem à soma das emissões nas fases agrícolas e industriais.

Figura 6-4 – Emissões na Produção e Uso de 100 GJ de Energia em Biodiesel Obtido pela Rota Etílica, em Quilogramas de Dióxido de Carbono Equivalente, $kgCO_2eq$

A Tabela 6-1 discrimina as entradas energéticas para a palma e para a soja, em relação à produção de 100 GJ de energia no biodiesel. Não foi possível realizar a mesma análise para a mamona devido ao nível de agregação dos resultados no estudo utilizado como referência.

Tabela 6-1 – Entradas de Energia para o Biodiesel Etílico de Palma e de Soja

Entradas	Biodiesel Etílico de Palma		Biodiesel Etílico de Soja	
	GJ		GJ	
Diesel	1,74E+00	17%	1,81E+01	50%
Eletricidade	0,00E+00	0%	3,33E-01	1%
Renovável	0,00E+00	0%	8,65E+00	24%
Sub-Total (Direta)	***1,74E+00***	***17%***	***2,71E+01***	***74%***
Insumos agrícolas	6,10E+00	59%	6,88E+00	19%
Insumos industriais	0,00E+00	0%	8,03E-02	0%
Insumos cana	5,05E-01	5%	5,05E-01	1%
Insumos álcool	3,51E-02	0%	3,51E-02	0%
Instalações e Equipamentos para O.V.	1,50E+00	15%	1,50E+00	4%
Instalações e Equipamentos para C&A	3,98E-01	4%	3,98E-01	1%
Sub-Total (Indireta)	***8,54E+00***	***83%***	***9,40E+00***	***26%***
TOTAL	**1,03E+01**	**100%**	**3,65E+01**	**100%**

Obs.: O.V. – Óleo Vegetal; C&A – Cana e Álcool.

Da Tabela 6-1 podemos observar que o principal custo energético associado ao biodiesel etílico de palma é decorrente do uso de fertilizantes. O diesel usado apenas no transporte dos cachos para a unidade industrial e no início das operações industriais ocupa a segunda posição. No balanço do biodiesel etílico de soja, o consumo de diesel nas operações agrícolas é o principal custo energético, seguido do uso de cavacos de madeira no beneficiamento da soja e, em terceiro, pelo uso de fertilizantes e corretivos.

A questão do uso dos co-produtos e agregação de valor aos subprodutos é importante, pois afeta o critério de alocação dos custos energéticos entre os produtos do sistema do ciclo produtivo. Isto se demonstra claramente nos resultados de ALMEIDA NETO et al. (2004), onde a relação O/I de 1,26 para o biodiesel etílico de mamona, considerada no presente estudo, pode chegar a 2,14 se a torta for utilizada para a geração de energia e esta energia venha a ser comercializada.

6.2 TRANSESTERIFICAÇÃO METÍLICA DOS ÓLEOS VEGETAIS

Na transesterificação metílica dos óleos vegetais foi mantida a mesma proporção molar considerada para a transesterificação etílica, o que resultou em uma redução da quantidade mássica de álcool de cerca de 33%. O conteúdo energético do metanol foi levantado de ALMEIDA NETO et al. (2004), sendo 19,7 MJ/kg. A Figura 6-5 e a Figura 6-6 apresentam os fluxos materiais e energéticos, respectivamente, requeridos para atender à produção dos 100 GJ de energia nos biodieseis metílicos de palma, soja e mamona.

A Figura 6-7 apresenta as emissões de CO_2 equivalentes nas fases agrícolas, industriais e de uso dos ésteres obtidos pela rota metílica. As emissões diretas no uso foram calculadas considerando que todo o carbono constituinte dos ésteres, derivado do metanol, teve combustão completa.

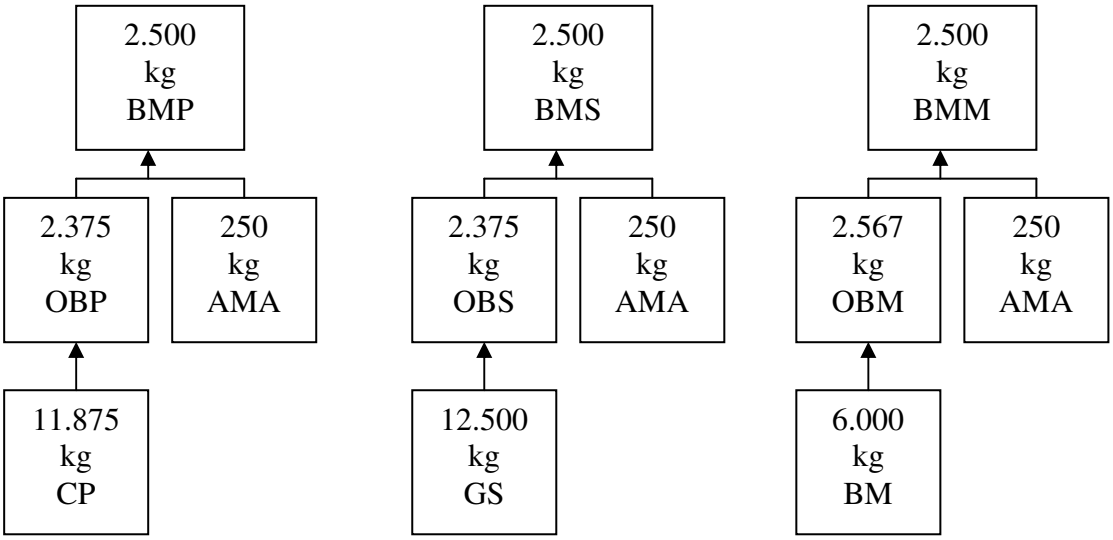
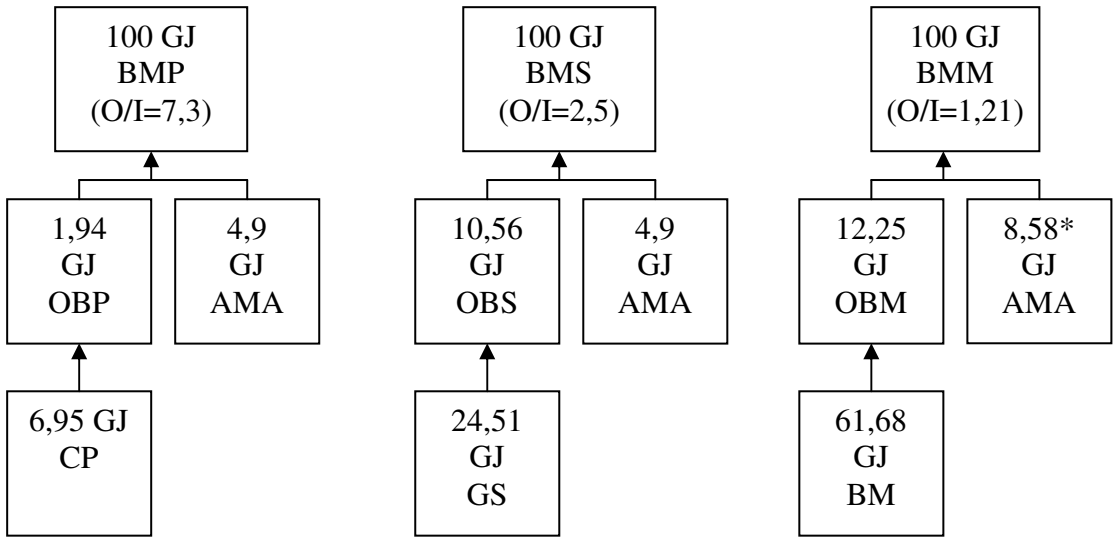
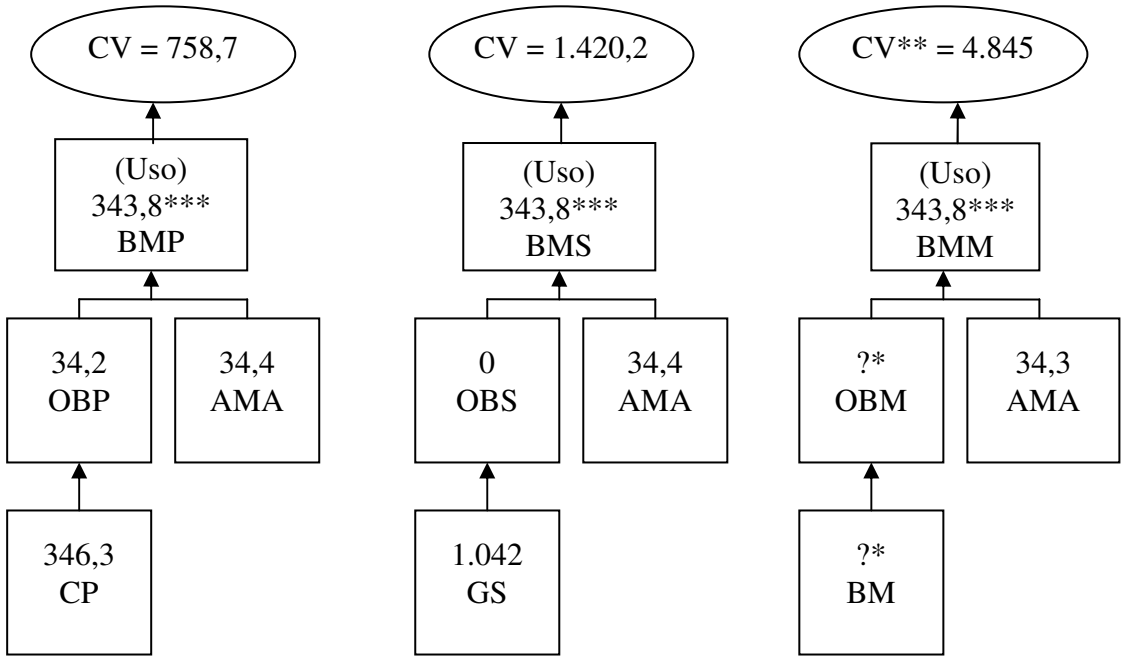


Figura 6-5 – Fluxos de Matérias-Primas Necessários para a Obtenção de 2.500 kg de cada Biodiesel pela Rota Metílica



* Agregado para todas as entradas na obtenção do biodiesel de mamona.

Figura 6-6 – Fluxos Energéticos Necessários para a Obtenção de 100 GJ de cada Biodiesel, pela Rota Metílica



* Não foi possível quantificar as emissões de CO_2eq, pois não foi identificada a origem dos custos energéticos associados às fases agrícola e industrial do óleo de mamona.
** Considerando que a intensidade de CO_2 do conteúdo energético do BMM (kgCO_2eq/MJ de energia no biodiesel) é igual à média dos valores para o BMP e o BMS.
*** - Devidos ao metanol.
Valores entre parênteses correspondem à soma das emissões nas fases agrícolas e industriais.

Figura 6-7 – Emissões na Produção e Uso de 100 GJ de Energia em Biodiesel Obtido pela Rota Etílica, em Quilogramas de Dióxido de Carbono Equivalente, kgCO_2eq

Os resultados apresentados nos itens de transesterificação etílica e transesterificação metílica dos óleos vegetais são apresentados conjuntamente nas figuras a seguir. Na Figura 6-8, é possível perceber a superioridade relativa nos balanços energéticos dos biodieseis etílico e metílico de palma, em relação aos de soja e de mamona. Na Figura 6-9, observa-se que os ésteres de mamona têm uma elevada emissão de CO_2 equivalentes em relação aos demais.

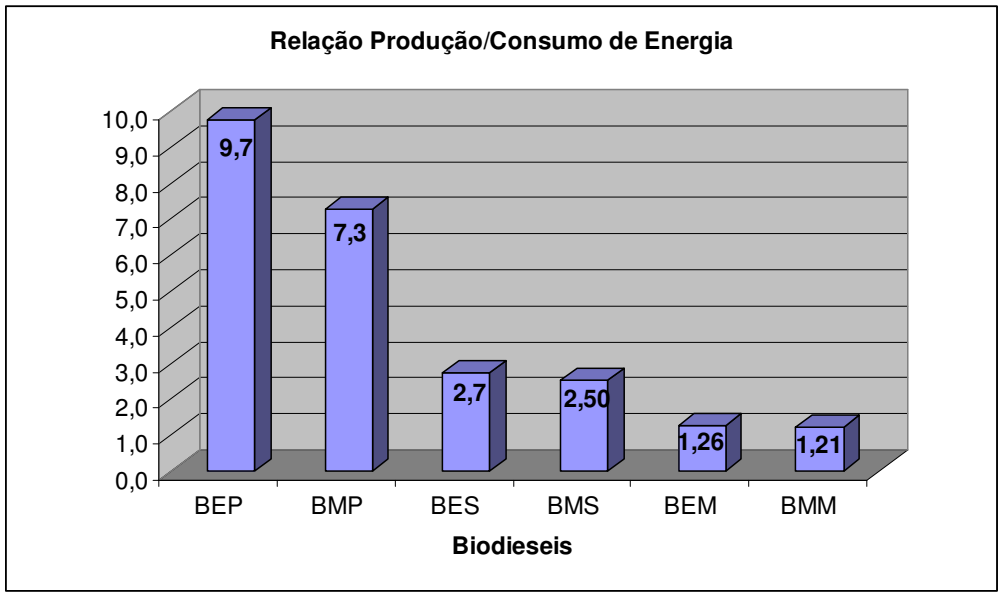


Figura 6-8 – Relação Entrada / Saída de Energia na Produção de Biodiesel

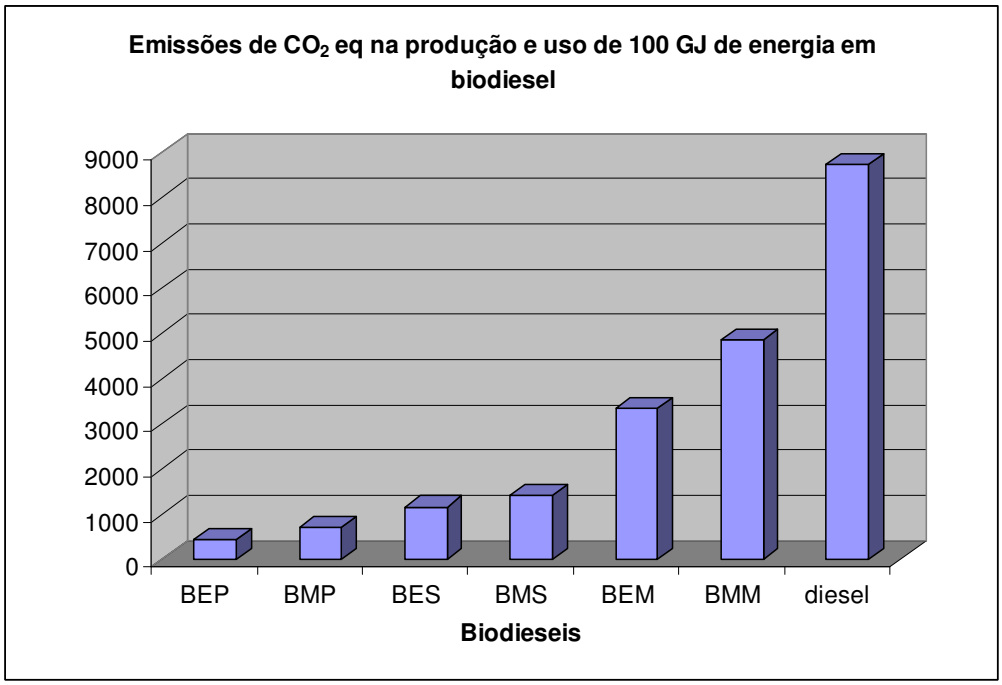


Figura 6-9 – Emissões de CO_2 Equivalentes na Produção e Uso de 100 GJ de Energia em Biodiesel e no Diesel de Petróleo

6.3 REDUÇÃO NAS EMISSÕES DE GEE PELO USO DO BIODIESEL NAS MISTURAS B-2 E B-5

No cálculo da redução de emissões de GEE's, será considerado que as misturas de biodiesel até 5% em massa não alteram o rendimento do veículo. A emissão total no ciclo de vida do diesel é de 3,49[19]$kgCO_2eq/kg$ de diesel (MACEDO et al, 2004).

A Tabela 6-2 apresenta os resultados.

Tabela 6-2 – Emissões de GEE e Emissões Evitadas em Misturas B-2 e B-5 ($kgCO_2$ eq/kg de Combustível)

Combustível Puro Emissões		B-2	Redução	Emissões Evitadas	B-5	Redução	Emissões Evitadas
Diesel	3,49				-	-	-
BEP	0,19	3,424	1,9%	0,07	3,325	4,7%	0,17
BMP	0,30	3,426	1,8%	0,06	3,331	4,6%	0,16
BES	0,46	3,429	1,7%	0,06	3,339	4,3%	0,15
BMS	0,57	3,432	1,7%	0,06	3,344	4,2%	0,15
BEM	1,33*	3,447	1,2%	0,04	3,382	3,1%	0,11
BMM	1,94*	3,459	0,9%	0,03	3,413	2,2%	0,08

* Valor estimado como a média das intensidades de dióxido de carbono equivalente por conteúdos energético dos biodieseis etílicos de palma e de soja.

Estes mesmos dados podem ser apresentados em termos de emissões por litro do combustível (Tabela 6-3 e Figura 6-10).

Tabela 6-3 – Emissões de GEE e Emissões Evitadas em Misturas B-2 e B-5 ($kgCO_2eq/L$ de Combustível)

Combustível Puro Emissões		B-2	*Redução*	*Emissões Evitadas*	B-5	*Redução.*	*Emissões Evitadas*
Diesel	2,93						
BEP	0,17	2,876	1,9%	0,06	2,789	4,9%	0,14
BMP	0,26	2,878	1,8%	0,05	2,797	4,6%	0,13
BES	0,40	2,881	1,7%	0,05	2,806	4,3%	0,13
BMS	0,50	2,883	1,7%	0,05	2,806	4,3%	0,13
BEM	1,17*	2,895	1,2%	0,04	2,839	3,2%	0,09
BMM	1,71*	2,906	0,9%	0,03	2,864	2,3%	0,07

* Valor estimado como a média das intensidades de dióxido de carbono equivalente por conteúdos energético dos biodieseis etílicos de palma e de soja.

As densidades do diesel e das misturas B2- e B-5 forami consideradas como sendo 0,84kg/L. As densidades dos biodieseis puros foram consideradas como sendo 0,88kg/L.

[19] Considerando a densidade do diesel igual a 0,84kg/L (BRASIL, 2006 – Balanço Energético Nacional).

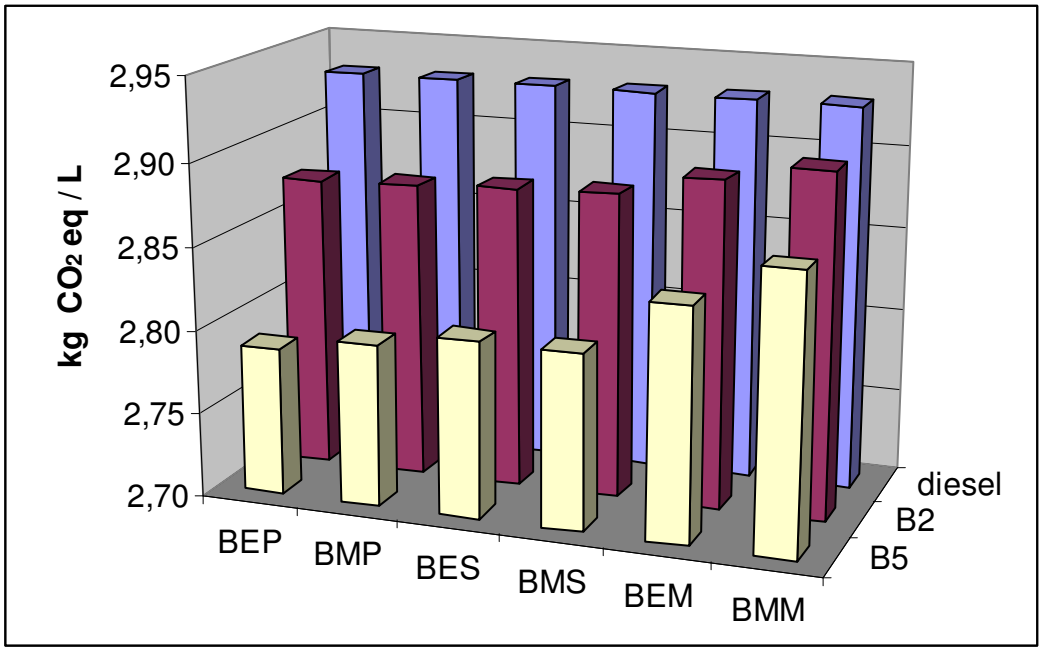


Figura 6-10 – Emissões Não Renováveis do Diesel e das Misturas B-2 e B-5 ($kgCO_2eq./L$ de Combustível)

O impacto do tipo de álcool utilizado na transesterificação nas emissões evitadas de gases de efeito estufa é pequeno, uma vez que a principal fonte de carbono no sistema são os óleos vegetais, com suas longas cadeias orgânicas. Entretanto, a razão Saída / Entrada (O/I) do balanço energético é reduzida significativamente. A Figura 6-11 apresenta as emissões evitadas no ciclo de vida das misturas B-2 e B-5.

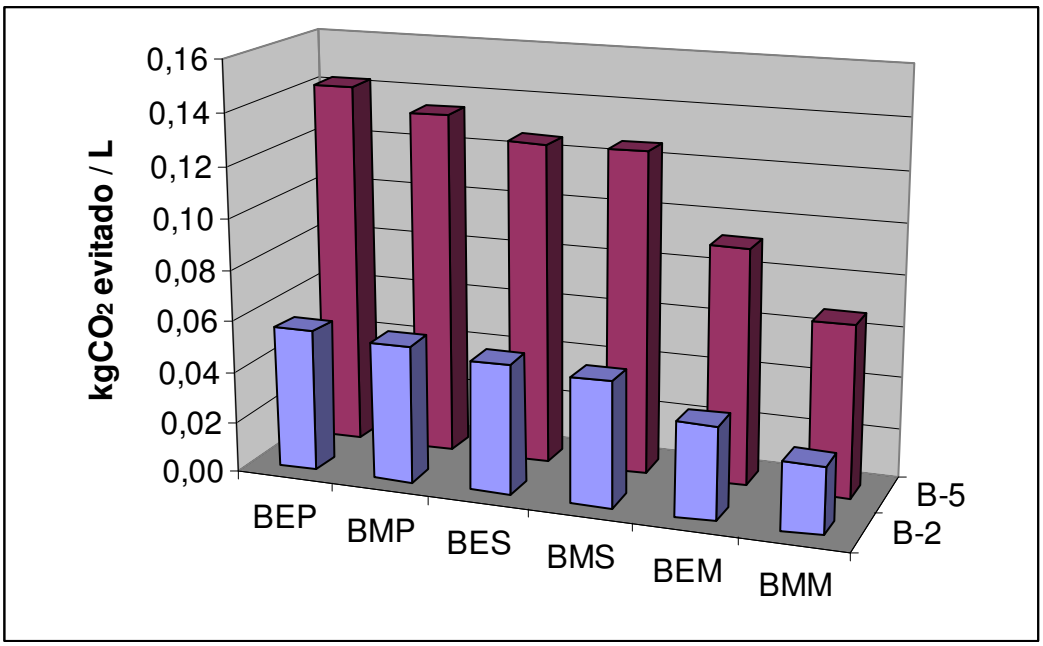


Figura 6-11 – Emissões Evitadas no Ciclo de Vida das Misturas B-2 e B5

7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O balanço de energia na produção do etanol, obtido dos dados médios (cenário 1) do setor sucro-alcooleiro da região Centro-Sul do Brasil, foi de 8,3 (saída 24,31 MJ/litro etanol para entrada 2,92 MJ/L etanol). Se consideradas apenas as usinas detentoras das melhores práticas do setor (cenário 2), o balanço de energia é 10,2 (saída 27,54 MJ/L etanol para entrada de 2,70 MJ/L etanol).

Conforme demonstrado por MACEDO et al. (2004), as unidades produtoras de cana de açúcar e de etanol que detêm as melhores práticas agrícolas e industriais também conseguem obter melhores balanços energéticos e de emissões. Tais usinas alcançam melhores produtividades, da ordem de 91,8 litros de etanol/ tonelada de cana contra 86,0L etanol/t cana, valor médio obtido pelas usinas da região Centro-Sul do Brasil.

Nas usinas com as melhores práticas é possível obter uma melhora de 22,8% no balanço de energia e uma redução de 10% no balanço de emissões com a introdução da ferti-irrigação, com a aplicação de vinhaça e torta de filtro em 30% da área de cana e a conseqüente redução da quantidade de adubo químico, bem como através do uso parcial de mecanização da colheita e de veículos de maior capacidade de transporte da cana. Isto resulta em um aumento dos créditos de carbono passíveis de serem recebidos de 6% (anidro) a 8,8% (hidratado).

Assim, MACEDO et al. (2004) calculou as emissões evitadas[20] pelo uso do etanol como combustível veicular no Brasil, álcool etílico anidro e álcool etílico hidratado carburantes, nos seguintes valores para a média do setor produtivo (cenário 1):

- 2,564 kg CO_2 eq / litro de etanol anidro
- 1,722 kg CO_2 eq / litro de etanol hidratado

Para as usinas de melhores práticas (cenário 2):

- 2,716 kg CO_2 eq / litro de etanol anidro
- 1,867 kg CO_2 eq / litro de etanol hidratado

As emissões evitadas resultantes da adição de etanol à gasolina pura, não são provavelmente elegíveis a créditos de carbono, por serem obrigatórias por lei nacional. Entretanto, o deslocamento do consumo de gasolina tipo C pelo álcool hidratado, decorrente da tecnologia *Flex-Fuel*, não sofre este impedimento. A emissão de gases de efeito estufa (GEE) da gasolina tipo C é reduzida pelo teor de álcool anidro adicionado, atualmente de 23%. Deste modo, a emissão de GEE da gasolina tipo C é de 2,264 kgCO_2eq/L ou de 2,254 kgCO_2eq/L – com o álcool

[20] Em relação à quantidade de gasolina pura substituída, cuja emissão no ciclo de vida é de 2,82kgCO_2eq/L.

anidro do cenário 1 e com o álcool anidro do cenário 2 de MACEDO et al. (2004), respectivamente, ver

Tabela 4-3 ou Tabela 4-5. A emissão do álcool etílico hidratado é de 0,389kgCO_2eq/L (cenário 1) ou de 0,348kgCO_2eq/L (cenário 2), de acordo com dados do mesmo autor, apresentados na Tabela 4-5. Portanto, para o cenário 1 que corresponde à média atual do setor sucroalcooleiro, as emissões evitadas por litro de álcool etílico hidratado, potencialmente elegíveis como créditos de carbono, seriam 1,196 kgCO_2eq/L; e para o cenário 2 seriam de 1,230 kgCO_2eq/L (considerando que 1L de álcool etílico hidratado substitui 0,7L de gasolina tipo C).

O balanço de energia determinado para o biodiesel obtido pela rota etílica foi 9,7 para a Palma, 2,7 para a Soja e 1,26 para a Mamona. Pela rota metílica o balanço de energia foi 7,3 para a Palma, 2,5 para a Soja e 1,21 para a Mamona.

As condições edafoclimáticas (solo e clima) e a seleção da oleaginosa têm grande influência sobre o balanço energético do biodiesel. Oleaginosas com elevadas produtividades de óleo por hectare, em regiões onde a demanda por fertilizantes, corretivos e irrigação da cultura sejam baixas terão melhores resultados que culturas com baixa produtividade em regiões que requerem maiores usos de fertilizantes, corretivos e irrigação. Ressalta-se que nenhuma das culturas avaliadas neste relatório demanda irrigação devido a necessidades hídricas, mas apenas para aproveitamento como ferti-irrigação dos resíduos orgânicos produzidos nas etapas de industrialização dos produtos agrícolas. Entretanto, somente a avaliação do consumo energético ou das emissões de gases de efeito estufa em função da produção da unidade energética de referência, sem a consideração da área ocupada, ou de outros aspectos de interesse, pode levar a resultados equivocados ao se utilizar os resultados para realizar comparações.

Os veículos motorizados utilizados nas diversas etapas de produção – operações agrícolas e transporte – consomem quantidades de óleo diesel tais que influenciam o balanço energético. A substituição do diesel de petróleo por biodiesel, quando possível, concorrerá para a melhoria do balanço e por conseqüência para a elegibilidade de uma maior quantidade de créditos de carbono.

As emissões evitadas pelo uso do biodiesel puro em motores de ciclo Diesel e nas misturas 2% (B2, mandatória a partir de 2008) e 5% (B5, mandatória a partir de 2013) em substituição ao diesel de petróleo (emissão de 2,93 kg CO_2/L) foram determinadas e resultaram nos seguintes valores[21]:

[21] Os cálculos nas planilhas do excel consideram os valores completos dos resultados de cálculos anteriores ao resultado apresentado. Desta forma, não necessariamente os valores apresentados para B-5 refletem, de forma exata, o aumento linear do teor de biodiesel.

- Biodiesel Etílico de Palma, 2,76 kg CO_2 eq / litro (B100)
- Biodiesel Etílico de Palma, 0,056 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Palma, 0,140 kg CO_2 eq / litro (B5)
- Biodiesel Metílico de Palma, 2,67 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Palma, 0,054 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Palma, 0,135 kg CO_2 eq / litro (B5)

- Biodiesel Etílico de Soja, 2,53 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Soja, 0,051 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Soja, 0,128 kg CO_2 eq / litro (B5)
- Biodiesel Metílico de Soja, 2,43 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Soja, 0,049 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Soja, 0,123 kg CO_2 eq / litro (B5)

- Biodiesel Etílico de Mamona, 1,76 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Mamona, 0,036 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Etílico de Mamona, 0,090 kg CO_2 eq / litro (B5)
- Biodiesel Metílico de Mamona, 1,22 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Mamona, 0,026 kg CO_2 eq / litro (B2)
- Biodiesel Metílico de Mamona, 0,065 kg CO_2 eq / litro (B5)

O impacto nas emissões evitadas de gases de efeito estufa decorrente do tipo de álcool utilizado na transesterificação é pequeno, uma vez que a principal fonte de carbono no sistema são os óleos vegetais, com suas longas cadeias orgânicas. Entretanto, conforme mostrado, a rota etílica contribui em até 4,7% para a melhoria do balanço energético (relação Saída / Entrada de energia), como no caso do biodiesel etílico de palma.

8 REFERÊNCIAS

AGRIANUAL – Anuário da Agricultura Brasileira – Editora FNP – 2006

ALMEIDA NETO, J.A.; CRUZ, R.S.; ALVES, J.M.; PIRES, M.M.; ROBRA, S.; PARENTE, E. Balanço energético de ésteres metílicos e etílicos de óleo de mamona. I Congresso Brasileiro de Mamona. 2004.

BARCELOS, E. et al. A Cultura do dendê. Coleção Plantar n° 32. EMBRAPA-SPI. Brasília, 1995.

EPE/MME - Empresa de Pesquisa Energética - Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. 2006.

CARVALHO, J. F. – Fotossíntese e Energia Renovável. X Congresso Brasileiro de Energia (2004).

DEL VECCHIO, E. Apresentação - Investimentos em Biodiesel. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/conhecimento/seminario/Biodiesel_DEDINI.pdf Acesso em: 31 de mar de 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistemas de Produção, 4 - 2a. edição. Cultivo da Mamona. 2006.

FREITAS, S,P - Professora Doutora Suely Pereira Freitas (EQ/UFRJ), comunicação pessoal por e-mail. (25/07/2005) e entrevista durante visita à UFRJ em outubro/2005.

HOLANDA, A. Biodiesel e Inclusão Social: Relatório apresentado ao Conselho de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica. Centro de Documentação e Informação, Coordenação de Publicação. Caderno de Altos Estudos 1. Brasília. 2004.

IPCC – International Panel on Climate Change. Climate Change 2001: The Scientific Basis. 2001.

MARZULLO, R.C.M. Inventário do ciclo de vida do óleo de soja para a produção de biodiesel capaz de gerar 40 GJ de energia. Texto para exame de qualificação ao mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2006.

MACEDO, I.C. et al. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e uso do etanol no Brasil. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo. Abril, 2004.

MELLO, C.A. et al. Estimativa da área necessária na produção da soja objetivando a sustentabilidade energética utilizando o biodiesel. – Artigo publicado nos anais do II Congresso de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, realizado pela Universidade Federal de Lavras. Varginha-MG, 2005.

OPÇÃO VERDE. Materiais, tipos, origens e dados técnicos. http://www.opcaoverde.com.br/residuosflorestais. 2006.

PIMENTEL, D. Handbook of energy utilization in agriculture. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 1980.

SEAGRI – Secretaria de Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária. Cultura – Cana-de-Açúcar. 2006.

TECPAR - Instituto de Tecnologia do Paraná - O Biodiesel - Publicação da Divisão de Biocombustíveis- DBIO e do Centro Brasileiro de Referência em Biocombustíveis - Cerbio Ano II- Edição 12 - Maio de 2006. Disponível em http://www.tecpar.br/cerbio/biodiesel/Ed_012.pdf. Acesso em 21 de agosto de 2006.

VIANNA, F.C. Análise de Ecoeficiência: Análise do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e petrodiesel. Dissertação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2006.

ANEXO 1

Fatores para cálculo do conteúdo energético das substâncias listadas nos inventários.

Substância	GJ/kg	Fonte: Calculado a partir de:
Diesel	5,689E-02	Nota 1 de MACEDO et al, 2004
metanol	1,970E-02	ALMEIDA NETO et al. (2004)
Nitrogênio - N	6,155E-02	Tabela 11 de MACEDO et al, 2004
Fósforo - P_2O_5	9,630E-03	Tabela 11 de MACEDO et al, 2004
Potássio - K_2O	6,699E-03	Tabela 11 de MACEDO et al, 2004
calcário	1,312E-03	Tabela 16 de MACEDO et al, 2004
Defensivos (média)	4,183E-01	Nota 3 de MACEDO et al, 2004
ácido sulfúrico	4,028E-03	Tabela 16 de MACEDO et al, 2004
Ciclo Hexano	1,067E-02	Tabela 16 de MACEDO et al, 2004
lubrificantes	1,351E-03	Tabela 16 de MACEDO et al, 2004
cal	5,324E-02	Tabela 16 de MACEDO et al, 2004
Carvão	1,884E-02	EPE, 2006
Gás Natural	3,684E-02	EPE, 2006
Glyphosate	4,526E-01	PIMENTEL, 1980
Carbaryl	1,525E-01	PIMENTEL, 1980
cavacos de madeira	1,005E-02	OPÇÃO VERDE, 2006.
herbicidas média	2,546E-01	PIMENTEL, 1980
inseticidas média	1,848E-01	PIMENTEL, 1980
fungicidas média	9,715E-02	PIMENTEL, 1980