

MARIANA PASSOS

## AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE APLICADA AO BIODIESEL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José A. A. Velásquez Alegre

CURITIBA

2004

## RESUMO

Nesta dissertação, um sistema de produção de biodiesel foi avaliado quanto a sua sustentabilidade. O biodiesel considerado na análise foi um éster etílico de soja, obtido através da reação de óleo de soja degomado e álcool etílico anidro, ambos produzidos a partir de recursos repostos pelo crescimento de vegetais (soja e cana de açúcar).

Para tanto, foram aplicadas ao sistema de produção do biodiesel algumas metodologias de avaliação de sistemas: a análise de exergia, a análise de emergia e a metodologia integrada de análise ambiental. Esta contabiliza em sua análise os recursos (econômicos e ecológicos) e os processos (naturais, agrícolas e industriais) empregados na produção do biodiesel, além de considerar o impacto na natureza dos poluentes emitidos pelo sistema avaliado.

Como resultado deste trabalho são apresentados e discutidos os valores de eficiência e de sustentabilidade do sistema de produção deste biocombustível, além de alguns outros aspectos relacionados à utilização energética do biodiesel (características, vantagens, desvantagens, etc.). Dentre as maiores vantagens do biodiesel pode ser citada a redução das emissões globais de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e suas consequências para o efeito estufa. Por outro lado, o elevado custo de produção do biodiesel pode ser considerado o maior obstáculo para sua comercialização.

## ABSTRACT

In this work the biodiesel fuel production chain was analyzed with respect to its sustainability. The biodiesel considered in this study was an ethyl ester of soybean oil, produced from degummed soybean oil and anhydrous ethyl alcohol, both derived from renewable resources (soybean and sugarcane).

The production system of this liquid fuel was investigated by means of exergy and emergy analysis, as well as throughout a methodology that takes into account ecological, agricultural and industrial process to evaluate its sustainability. This methodology also considers inputs from ecological and economical resources, as well as the environmental impact of emissions.

Results from efficiency and sustainability of a production system of biodiesel fuel are reported in this study. Also in this work, it is shown some characteristics, advantages e disadvantages of this biofuel. The biodiesel offers a clear ecological advantage over fossil fuels, reducing the global emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and hence its impact on climate (Global Warming Potential). On the other hand, the production cost of biodiesel is the main obstacle to its commercialization.



## AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas do mestrado pela amizade conquistada e pelos momentos compartilhados.

Aos professores do mestrado pelo incentivo e pelos conhecimentos adquiridos.

À Jane pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador professor Velásquez pela paciência, estímulo, confiança e amizade.

À minha família, em especial à minha mãe, pelo amor e apoio.

## SUMÁRIO

|                                                                      |             |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|
| TERMO DE APROVAÇÃO                                                   | <b>ii</b>   |
| RESUMO                                                               | <b>iii</b>  |
| ABSTRACT                                                             | <b>iv</b>   |
| SUMÁRIO                                                              | <b>vii</b>  |
| LISTA DE FIGURAS                                                     | <b>x</b>    |
| LISTA DE TABELAS                                                     | <b>xi</b>   |
| LISTA DE SÍMBOLOS                                                    | <b>xiii</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                 | <b>1</b>    |
| 1.1 Panorama Atual da Demanda de Energia                             | 3           |
| 1.2 A Biomassa como Fonte Energética                                 | 4           |
| 1.2.1 Classificação dos Recursos Energéticos                         | 5           |
| 1.2.2 O Biodiesel                                                    | 5           |
| 1.3 Avaliação de Sustentabilidade dos Biocombustíveis                | 6           |
| 1.4 Bibliografia                                                     | 8           |
| <b>2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ECOLÓGICA DE SISTEMAS</b> | <b>10</b>   |
| 2.1 Introdução                                                       | 10          |
| 2.2 Análise de Ciclo de Vida                                         | 11          |
| 2.3 Análise de Exergia                                               | 12          |
| 2.4 Análise de Emergia                                               | 14          |
| 2.5 Metodologia Integrada de Análise Ambiental                       | 18          |
| 2.5.1 Os Fluxos de Entrada                                           | 21          |
| 2.5.2 Os Impactos                                                    | 22          |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.3 O Fluxo de Saída                                                      | 23        |
| 2.5.4 Os Índices                                                            | 23        |
| 2.6 Considerações Finais                                                    | 24        |
| 2.7 Bibliografia                                                            | 25        |
| <b>3. OS ÉSTERES DE ÓLEOS VEGETAIS</b>                                      | <b>27</b> |
| 3.1 Introdução                                                              | 27        |
| 3.2 O Biodiesel                                                             | 29        |
| 3.2.1 As Vantagens                                                          | 30        |
| 3.2.2 O Uso                                                                 | 32        |
| 3.2.3 A Matéria – Prima: Os Reagentes                                       | 34        |
| 3.2.4 Os Desafios                                                           | 37        |
| 3.3 Caracterização do Biodiesel                                             | 37        |
| 3.3.1 As Características dos Combustíveis para Motores do Ciclo Diesel      | 38        |
| 3.3.2 A Influência dos Reagentes no Biodiesel                               | 43        |
| 3.4 Produção de Biodiesel                                                   | 46        |
| 3.4.1 O Processo de Produção                                                | 46        |
| 3.4.2 A Reação de Transesterificação                                        | 47        |
| 3.5 Bibliografia                                                            | 48        |
| <b>4. ANÁLISE DE EXERGIA APLICADA AO BIODIESEL</b>                          | <b>51</b> |
| 4.1 Introdução                                                              | 51        |
| 4.2 Conceitos de Termodinâmica                                              | 52        |
| 4.2.1 O Ambiente de Referência                                              | 52        |
| 4.2.2 A Exergia                                                             | 52        |
| 4.2.3 A Exergia de Fluxo                                                    | 53        |
| 4.2.4 As Equações de Balanço de Massa e de Exergia para Volumes de Controle | 54        |
| 4.3 Memorial de Cálculo                                                     | 55        |
| 4.4 Considerações Finais                                                    | 58        |
| 4.5 Bibliografia                                                            | 59        |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. ANÁLISE DE ENERGIA APLICADA AO BIODIESEL</b>                         | <b>60</b>  |
| 5.1 Introdução                                                             | 60         |
| 5.2 Produção de Álcool Etílico                                             | 60         |
| 5.2.1 Fase Agrícola                                                        | 61         |
| 5.2.2 Fase Agro – Industrial                                               | 63         |
| 5.2.3 Análise Emergética                                                   | 65         |
| 5.3 Produção de Óleo de Soja Degomado                                      | 74         |
| 5.3.1 Fase Agrícola                                                        | 74         |
| 5.3.2 Fase Agro – Industrial                                               | 76         |
| 5.3.3 Análise Emergética                                                   | 78         |
| 5.4 Produção de Éster Etílico de Soja                                      | 82         |
| 5.4.1 Análise Emergética                                                   | 84         |
| 5.5 Considerações Finais                                                   | 88         |
| 5.6 Bibliografia                                                           | 88         |
| <b>6. METODOLOGIA INTEGRADA DE ANÁLISE AMBIENTAL APLICADA AO BIODIESEL</b> | <b>90</b>  |
| 6.1 Introdução                                                             | 90         |
| 6.2 Aplicação da Metodologia ao Caso do Biodiesel                          | 92         |
| 6.2.1 Memorial de Cálculo                                                  | 94         |
| 6.2.2 Resultados                                                           | 100        |
| 6.3 Considerações Finais                                                   | 103        |
| 6.4 Bibliografia                                                           | 105        |
| <b>7. CONCLUSÃO</b>                                                        | <b>107</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|            |                                                                       |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 | Representação dos fluxos do sistema para a análise de energia         | 16 |
| Figura 3.1 | Produção e importação de petróleo                                     | 28 |
| Figura 3.2 | Importação de derivados de petróleo                                   | 29 |
| Figura 3.3 | Processo de transesterificação                                        | 30 |
| Figura 3.4 | Redução média das emissões de poluentes                               | 31 |
| Figura 3.5 | Produção de álcool no Brasil                                          | 36 |
| Figura 3.6 | Número de cetano                                                      | 38 |
| Figura 3.7 | Teor de enxofre                                                       | 39 |
| Figura 3.8 | Fluxograma do processo de produção de ésteres etílicos                | 46 |
| Figura 4.1 | Limites do sistema de produção do biodiesel                           | 51 |
| Figura 4.2 | Diagrama esquemático dos fluxos de matéria e energia do sistema       | 56 |
| Figura 5.1 | Processo de produção do etanol                                        | 60 |
| Figura 5.2 | Sistema ecológico – industrial da produção do etanol                  | 66 |
| Figura 5.3 | Processo de produção do óleo de soja degomado                         | 74 |
| Figura 5.4 | Sistema ecológico – industrial da produção do óleo de soja            | 79 |
| Figura 5.5 | Processo industrial de produção do éster etílico de soja              | 82 |
| Figura 5.6 | Sistema ecológico – industrial da produção do éster etílico de soja   | 84 |
| Figura 6.1 | Avaliação das emissões do ciclo de vida do óleo diesel e do biodiesel | 96 |

## LISTA DE TABELAS

|            |                                                                                           |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1.1 | Distribuição Percentual da Oferta Interna de Energia no Brasil                            | 3  |
| Tabela 2.1 | Transformidades                                                                           | 15 |
| Tabela 2.2 | Índices da Metodologia Emergética                                                         | 17 |
| Tabela 2.3 | Índices da Metodologia Integrada de Análise Ambiental                                     | 24 |
| Tabela 3.1 | Comparação da Mistura B20 e Óleo Diesel                                                   | 33 |
| Tabela 3.2 | Potencial Energético dos Vegetais Oleaginosos                                             | 35 |
| Tabela 3.3 | Especificação do Óleo Diesel                                                              | 41 |
| Tabela 3.4 | Especificação do Biodiesel                                                                | 42 |
| Tabela 3.5 | Composição Química dos Óleos Vegetais                                                     | 44 |
| Tabela 3.6 | Propriedades dos Ésteres de Óleos Vegetais                                                | 45 |
| Tabela 4.1 | Quantidade Necessária de Insumos por Tonelada de Biodiesel                                | 55 |
| Tabela 4.2 | Estado Termodinâmico dos Fluxos de Matéria do Sistema                                     | 56 |
| Tabela 4.3 | Resultados Obtidos para Combustíveis Líquidos                                             | 57 |
| Tabela 4.4 | Exergia dos Fluxos de Massa do Sistema por Tonelada de Biodiesel                          | 58 |
| Tabela 5.1 | Prazos para a Eliminação da Queima da Palha na Pré-Colheita da Cana de Açúcar             | 63 |
| Tabela 5.2 | Classificação dos Recursos Utilizados na Produção do Etanol                               | 66 |
| Tabela 5.3 | Dados do Maquinário e da Infra-Estrutura                                                  | 71 |
| Tabela 5.4 | Dados e Fluxos de Emergia                                                                 | 71 |
| Tabela 5.5 | Fluxos de Entrada e Saída do Sistema                                                      | 72 |
| Tabela 5.6 | Índices Calculados                                                                        | 73 |
| Tabela 5.7 | Custos da Extração de Óleos Vegetais                                                      | 78 |
| Tabela 5.8 | Classificação dos Recursos Utilizados na Produção do Óleo de Soja na Fase Agro-Industrial | 79 |

|             |                                                                                         |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 5.9  | Avaliação de Emergia na Fase Agro–Industrial da Produção do Óleo de Soja                | 80  |
| Tabela 5.10 | Fluxos de Entrada e Saída do Sistema                                                    | 81  |
| Tabela 5.11 | Índices Calculados                                                                      | 81  |
| Tabela 5.12 | Quantidade Necessária de Insumos por Tonelada de Biodiesel                              | 83  |
| Tabela 5.13 | Custos de Produção de 1 Tonelada de Biodiesel                                           | 83  |
| Tabela 5.14 | Classificação dos Recursos Utilizados na Produção do Biodiesel                          | 84  |
| Tabela 5.15 | Dados e Fluxos de Emergia dos Recursos Utilizados pelo Sistema na Produção de Biodiesel | 86  |
| Tabela 5.16 | Resultados da Análise Emergética do Sistema Produtivo do Biodiesel                      | 87  |
| Tabela 6.1  | Concentração Atmosférica de Gases Causadores do Efeito Estufa                           | 91  |
| Tabela 6.2  | Potencial de Aquecimento Global de Alguns Gases                                         | 92  |
| Tabela 6.3  | Emissões dos Ciclos de Vida do Óleo Diesel e do Biodiesel                               | 95  |
| Tabela 6.4  | Padrões Nacionais de Qualidade do Ar                                                    | 98  |
| Tabela 6.5  | Cálculo de $R_2$                                                                        | 98  |
| Tabela 6.6  | Cálculo de $F_3$                                                                        | 99  |
| Tabela 6.7  | Resultados da Análise do Sistema Produtivo do Biodiesel                                 | 100 |
| Tabela 6.8  | Índices Obtidos para o Sistema Produtivo do Biodiesel                                   | 101 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |                                                                        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|
| $A$       | Área                                                                   |
| $B$       | Coeficiente de dano                                                    |
| $C$       | Calor específico                                                       |
| $E$       | Energia                                                                |
| $e$       | Espessura                                                              |
| $Ex$      | Exergia                                                                |
| $ex$      | Exergia específica                                                     |
| $ex^{TM}$ | Exergia termomecânica específica                                       |
| $ex^{ch}$ | Exergia química específica                                             |
| $Em$      | Emergia                                                                |
| $F$       | Investimento econômico                                                 |
| $F_1$     | Recursos econômicos destinados à produção                              |
| $F_2$     | Recursos econômicos destinados à reciclagem ou disposição de poluentes |
| $F_3$     | Impacto econômico das emissões de poluentes                            |
| $GWP$     | Potencial de aquecimento global                                        |
| $g$       | Energia livre de Gibbs específica                                      |
| $H$       | Entalpia                                                               |
| $h$       | Entalpia específica                                                    |
| $I$       | Irreversibilidades do sistema                                          |
| $L$       | Entalpia de vaporização                                                |
| $MDL$     | Mecanismos de desenvolvimento limpo                                    |
| $m$       | Vazão em massa                                                         |
| $m$       | Quantidade em massa                                                    |
| $N$       | Recursos naturais não renováveis                                       |
| $n$       | Número de mols                                                         |

|       |                                                                       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|
| $PCS$ | Poder calorífico superior                                             |
| $PIB$ | Produto interno bruto                                                 |
| $p$   | Pressão                                                               |
| $Q$   | Taxa de transferência de calor                                        |
| $R$   | Recursos naturais renováveis                                          |
| $R_1$ | Recursos naturais renováveis destinados à produção                    |
| $R_2$ | Serviços ambientais destinados à dissipação das emissões de poluentes |
| $R_3$ | Impacto ecológico das emissões de poluentes                           |
| $R_S$ | Fluxo de radiação solar                                               |
| $S$   | Entropia                                                              |
| $s$   | Entropia específica                                                   |
| $T$   | Temperatura                                                           |
| $t$   | Tempo                                                                 |
| $U$   | Energia interna                                                       |
| $V$   | Volume                                                                |
| $v$   | Velocidade                                                            |
| $W$   | Taxa de transferência de trabalho                                     |
| $Y$   | Produto                                                               |
| $z$   | Fração mássica                                                        |

#### *Letras Gregas*

|          |                        |
|----------|------------------------|
| $\beta$  | Fator de multiplicação |
| $\gamma$ | Concentrações molares  |
| $\mu$    | Potencial químico      |
| $\rho$   | Densidade              |
| $\tau$   | Transformidade         |

*Subscritos*

|           |                                    |
|-----------|------------------------------------|
| <i>e</i>  | Relativo à entrada                 |
| <i>s</i>  | Relativo à saída                   |
| <i>0</i>  | Relativo ao ambiente de referência |
| <i>CG</i> | Relativo ao ciclo geológico        |
| <i>CV</i> | Relativo ao ciclo de vida          |
| <i>VC</i> | Relativo ao volume de controle     |
| <i>f</i>  | Relativo a um fluxo                |
| <i>i</i>  | Relativo a uma substância          |
| <i>C</i>  | Referente ao carbono               |
| <i>H</i>  | Referente ao hidrogênio            |
| <i>O</i>  | Referente ao oxigênio              |
| <i>S</i>  | Referente ao enxofre               |
| <i>W</i>  | Referente à água                   |

## 1 INTRODUÇÃO

A biomassa, na forma de lenha, foi a primeira e, durante muitos séculos, a principal fonte de energia para o homem. Como base energética da civilização antiga, permitiu o desenvolvimento de atividades importantes como a cerâmica, a fabricação de vidro e a fundição de metais [1].

A demanda por energia cresceu de forma expressiva a partir da Revolução Industrial, chegando a proporções tão elevadas que, nas primeiras décadas do século XX, a humanidade consumiu energia em quantidade superior à consumida durante toda sua existência anterior. A partir deste período, a energia solar acumulada nos vegetais passou a não atender a demanda, justificando a exploração das fontes fósseis. Como os países pioneiros do processo de industrialização detinham grandes reservas de carvão mineral, este combustível fóssil passou a ser a principal fonte energética no início da Revolução Industrial [1][2].

A partir da segunda metade do século XIX, o petróleo começou a ganhar destaque na economia mundial, tornando-se a fonte de energia mais importante durante o século XX. Dentre os fatores que facilitaram o crescimento da importância do petróleo como insumo energético podem ser relacionados: a facilidade de manuseio e transporte deste combustível, a diversidade e a versatilidade dos seus derivados e, principalmente, a garantia de suprimento a preços relativamente estáveis, condição que viria a mudar a partir da década de setenta [2]. A primeira crise do petróleo ocorreu em 1973, quando os países produtores diminuíram a produção elevando o preço do barril, que chegou a ser cotado a um valor equivalente a US\$ 40 atuais. Em 1979, a paralisação da produção iraniana, em consequência da revolução Islâmica liderada pelo aiatolá Khomeini, provocou a segunda crise do petróleo, elevando o preço médio do barril ao equivalente a US\$ 80 atuais [3]. Assim, devido à forte elevação do preço do petróleo, a biomassa como fonte energética passou a ser considerada uma alternativa economicamente viável para atender as demandas de energia térmica (em indústrias e centrais elétricas de pequena e média capacidade) e, em alguns casos, para substituir os combustíveis fósseis. Porém, em 1986 o preço do petróleo voltou a cair, reduzindo de forma significativa o interesse pelas bioenergias [2].

Somente a partir da década de 90, o interesse pela biomassa como fonte energética é retomado, em consequência da inclusão da temática ambiental nas questões energéticas. Nesta fase, a biomassa passa a ser avaliada como fonte de energia alternativa para a satisfação da

demanda energética considerando, além dos fatores estritamente econômicos, fatores ambientais e sociais [1].

A poluição atmosférica, responsável pelas mudanças climáticas e pelo efeito estufa, vem a ser um dos grandes problemas ambientais da atualidade. Em um determinado território, a concentração de poluentes no ar atmosférico é o resultado das emissões de substâncias poluentes provenientes de fontes estacionárias (indústrias) e de fontes móveis (automóveis e outros meios de transporte), conjugado a fatores como o clima, a geografia, o uso do solo, a distribuição e a tipologia das fontes emissoras, as condições de emissão e de dispersão destes poluentes [4][5].

A valorização energética sustentável de alguns recursos vegetais pode vir reduzir, de forma direta e indireta, o impacto ambiental *efeito estufa*. De forma direta, ao substituir os combustíveis fósseis por matéria orgânica vegetal, os gases emitidos durante a queima do combustível não são computados na avaliação de impacto *efeito estufa*. Considera-se que uma quantia equivalente à produzida durante a queima do combustível é reabsorvida, pelo processo de fotossíntese, durante o crescimento da espécie vegetal empregada na fabricação do combustível. De forma indireta, desde que a biomassa seja produzida e utilizada de forma sustentável, podem ser reduzidas a degradação do solo e das matas, bem como as emissões de gases do efeito estufa decorrentes destes processos [1].

No Brasil o uso da energia renovável obtida através da conversão de biomassa vem ganhando destaque por possibilitar a redução da dependência externa de energia proveniente de combustíveis fósseis e a criação de novas oportunidades de emprego em comunidades rurais (dinamizando as economias regionais). Além disso, em termos sociais e ambientais, a utilização energética da biomassa promove a integração energética de comunidades isoladas, possibilita a redução das emissões atmosféricas (locais, regionais e globais) e atende aos anseios da sociedade em relação ao desenvolvimento sustentável (assegurando o suprimento de energia de fontes renováveis) [1][6].

Como principal desvantagem da adoção da biomassa em substituição às fontes fósseis pode ser citada a dificuldade das tecnologias das energias renováveis competirem com os mercados já consolidados dos combustíveis fósseis. De fato, esta dificuldade em competir, geralmente, devido ao custo elevado dos combustíveis alternativos, acontece no início da utilização comercial de novas fontes energéticas. No entanto, conforme o consumo destas novas fontes de energia cresce, seu custo tende a cair, como foi demonstrado pelo Programa Brasileiro de Álcool (PRÓ-ÁLCOOL) [6].



O Programa Brasileiro de Álcool pode ser citado como modelo de utilização adequada da biomassa como fonte energética. O PRÓ-ÁLCOOL apresentou resultados muito positivos em relação tanto aos aspectos econômicos quanto aos aspectos ambientais e sociais, tornando-se o mais importante programa de energia de biomassa do mundo [6].

## 1.1 PANORAMA ATUAL DA DEMANDA DE ENERGIA

A sociedade industrial foi construída e é mantida atualmente através de recursos não renováveis, visto que a principal fonte energética da sociedade moderna provém da energia química acumulada nos diferentes combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural, etc.). O consumo total de energia no mundo é de  $8 \times 10^9$  toneladas equivalentes de petróleo (tep) e as reservas disponíveis de petróleo, gás natural e carvão mineral são suficientes para atender a demanda de energia, considerando os padrões atuais de consumo, somente por cerca de 43,1 , 64,9 e 236 anos respectivamente [7].

O Brasil tem um consumo de energia *per capita* de 1,42 tep/hab (1tep = 45,22 GJ), aproximadamente igual à média mundial [7]. A distribuição da oferta interna de energia, segundo suas fontes, está descrita na Tabela 1.1. A energia proveniente da lenha pode ser considerada como fonte renovável desde que a taxa de exploração não exceda a capacidade do meio ambiente em repor este recurso vegetal. Quando esta condição é violada, esta fonte energética não pode ser qualificada como recurso renovável, visto que sua exploração é realizada de maneira não sustentável [5].

TABELA 1.1 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA NO BRASIL – 1992 - 2000

| FONTES DE ENERGIA           | 1992  | 1993  | 1994  | 1995  | 1996  | 1997  | 1998  | 1999  | 2000  |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NÃO RENOVÁVEL               | 52,8  | 53,3  | 53,3  | 55,0  | 56,9  | 57,4  | 58,2  | 58,4  | 60,6  |
| Petróleo e derivados        | 42,0  | 42,4  | 42,7  | 43,6  | 45,5  | 46,0  | 46,9  | 46,7  | 47,0  |
| Gás natural                 | 3,2   | 3,3   | 3,3   | 3,3   | 3,5   | 3,6   | 3,7   | 4,1   | 5,1   |
| Carvão mineral e derivados  | 7,4   | 7,5   | 7,3   | 7,5   | 7,4   | 7,2   | 6,8   | 6,9   | 7,5   |
| Urânio e derivados          | 0,2   | 0,1   | 0,0   | 0,6   | 0,5   | 0,6   | 0,8   | 0,7   | 1,0   |
| RENOVÁVEL                   | 47,2  | 46,7  | 46,7  | 45,0  | 43,1  | 42,6  | 41,8  | 41,6  | 39,4  |
| Hidráulica                  | 13,9  | 14,4  | 14,3  | 14,6  | 14,5  | 14,5  | 14,7  | 14,6  | 15,2  |
| Lenha e carvão vegetal      | 17,4  | 16,8  | 16,0  | 14,5  | 13,0  | 12,2  | 11,6  | 11,6  | 11,6  |
| Derivados da cana de açúcar | 13,9  | 13,5  | 14,4  | 14,0  | 13,8  | 14,1  | 13,6  | 13,4  | 10,4  |
| Outras fontes renováveis    | 2,0   | 2,0   | 2,0   | 1,9   | 1,8   | 1,8   | 1,9   | 2,0   | 2,2   |
| TOTAL                       | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

FONTE: BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro: IBGE, 2002.[5]

O aumento da participação de recursos não renováveis na oferta de energia no País está vinculado ao aumento do consumo de petróleo e de seus derivados e, também, ao crescimento da demanda de gás natural. Neste mesmo período, a oferta de energia proveniente de fontes renováveis sofreu uma redução significativa, devido ao enfraquecimento do consumo dos derivados da cana de açúcar e, também, em virtude da queda do uso da lenha como fonte energética [5].

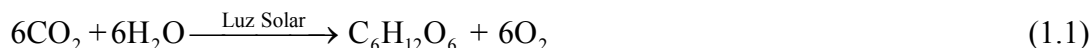
Este crescimento da participação dos combustíveis fósseis na matriz energética brasileira gera obstáculos ao desenvolvimento sustentável do País [7]. As reservas de carvão mineral do Brasil são caracterizadas pela baixa qualidade (altos teores de enxofre e cinzas) e pelas difíceis condições de extração [2]. As reservas de petróleo comprovadas em território nacional, hoje acima de 13 bilhões de barris, dariam para cerca de 20 anos de consumo, em um mercado que historicamente cresce 5% ao ano. Em 2003, foram confirmadas reservas da ordem de 4 bilhões de barris de petróleo, metade disso encontra-se em novas jazidas da Bacia de Campos, produtora de óleos superpesados, que constituem um grande desafio, tanto em relação à extração como ao refino [8].

As crescentes reservas brasileiras de gás natural, que triplicaram após a descoberta de jazidas gigantes na Bacia de Santos, além das reservas de 640 bilhões de metros cúbicos (provadas e prováveis) administradas pela Petrobrás na Bolívia, elevam o estoque nacional para a casa dos 650 bilhões de metros cúbicos de gás natural [8]. Assim, nos próximos anos, o acréscimo da potência instalada no sistema energético deverá ocorrer pela utilização de gás natural como combustível de centrais termelétricas e sistemas de co-geração de energia, promovendo uma expansão ainda maior do consumo de combustíveis fósseis pelo Brasil, ou seja, aumentando a demanda de combustíveis que, por definição, são fontes energéticas finitas e possuem elevado potencial de poluição ambiental [7].

## 1.2 A BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA

O termo biomassa engloba a matéria vegetal e os seus derivados (resíduos florestais, agrícolas e agro-industriais, além da matéria orgânica contida nos resíduos domésticos). A energia química contida na biomassa pode ser utilizada diretamente (combustão) ou pode ser convertida em fontes energéticas mais convenientes, tais como: o álcool de cana de açúcar, o carvão vegetal da madeira e os ésteres de óleos vegetais (biodiesel) [1].

A energia química contida na biomassa provém da transformação energética da radiação solar, realizada por organismos vivos primários através do processo de fotossíntese [1]. Este pode ser ilustrado pela Equação 1.1.



A transformação de gás carbônico e água em açúcar e oxigênio ocorre, na verdade, em diversas etapas intermediárias, permitindo a vida tal como existe na Terra. Entre os principais fatores que afetam a fotossíntese estão a radiação solar, a temperatura e a disponibilidade hídrica [1].

### 1.2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS

A classificação dos recursos energéticos obtidos a partir da biomassa pode ser feita de acordo com a origem da matéria que os constitui [1]:

- Dendrocombustível – biocombustível obtido de florestas plantadas ou nativas, respeitando os limites de regeneração natural destas. Inclui a lenha, o carvão vegetal, o licor negro (subproduto da indústria de celulose) e o metanol (álcool metílico) produzido a partir da madeira;
- Agrocombustível – biocombustível originário de plantações não florestais e, em geral, proveniente de cultivos anuais. Usualmente, para ser utilizado como combustível, depende de algum processo de conversão que transforme a biomassa em um produto energético mais adequado. Os agrocombustíveis podem ser distribuídos em quatro categorias: (i) os combustíveis obtidos diretamente das plantações energéticas, como é o caso do álcool da cana de açúcar; (ii) os subprodutos (ou resíduos) agrícolas, obtidos principalmente durante a colheita ou extração do produto principal (palhas, cascas, folhas, etc.); (iii) os subprodutos (ou resíduos) agroindustriais, como por exemplo o bagaço da cana de açúcar e a casca do arroz; (iv) os subprodutos animais, como gordura ou esterco provenientes das criações de aves, suínos, bovinos, entre outras;

- Biocombustível obtido a partir de resíduos orgânicos, produzidos em meio urbano.

### 1.2.2 O BIODIESEL

Dentre as diversas possibilidades consideradas na literatura, os óleos vegetais (glicerídeos) constituem a fonte renovável mais promissora para a obtenção de combustíveis líquidos capazes de substituir o óleo diesel [2]. Os combustíveis obtidos a partir de óleos vegetais apresentam qualidades que os diferenciam como combustíveis sustentáveis, entre elas a ausência de enxofre na composição química, a limitada produção de substâncias danosas ao meio ambiente durante a fase industrial e, ainda, o fato de serem elaborados a partir de culturas vegetais que, durante o processo de fotossíntese, consomem dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) — principal gás causador do efeito estufa — da atmosfera terrestre [2]. Além disso, por serem biodegradáveis, não apresentam grandes problemas em relação à disposição final. Somente o potencial relacionado à redução da camada de ozônio, devido as emissões de óxidos nitrosos ( $\text{N}_2\text{O}$ ), pode ser considerado uma grande desvantagem do biodiesel de importância ambiental [9].

## 1.3 AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE DOS BIOCOMBUSTÍVEIS

O conceito de desenvolvimento sustentável, apresentado abaixo, foi publicado pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) no relatório *"Nosso Futuro Comum"*, também conhecido como *"Relatório Brundtland"* [10][11].

*"Desenvolvimento Sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades".*

Entretanto, a maior parte das atividades econômicas empregadas para satisfazer as necessidades das modernas sociedades industriais não obedecem a este conceito de sustentabilidade. Deste modo, o estabelecimento de uma metodologia capaz de avaliar o direcionamento ou não destas atividades ao desenvolvimento sustentável torna-se necessário [12].

A medida de sustentabilidade de uma determinada atividade econômica pode ser fundamentada em alguns indicadores que consigam exprimir [12]:

- A pressão exercida pela sociedade sobre o meio ambiente, na forma de poluição, de redução de recursos, etc.;
- O estado resultante do meio ambiente comparado com o estado sustentável ou desejável;
- As possibilidades de resposta através de ações humanas, possibilitando o redirecionamento da atividade para o desenvolvimento sustentável.

Além disso, de forma a assegurar a viabilidade econômica e ecológica da utilização de biomassa como recurso para produção de combustíveis, devem ser atendidos os seguintes requisitos [13]:

- O combustível deve fornecer uma quantidade maior de energia que a requerida para sua produção;
- O combustível deve ter sua disponibilidade assegurada a longo prazo. Este requisito pode ser garantido através da sustentabilidade das atividades que compõem o sistema produtivo;
- A liberação de substâncias prejudiciais ao meio ambiente (em especial o dióxido de carbono –  $\text{CO}_2$ ), durante a produção e utilização do biocombustível, deve ser menor que a quantidade liberada por uma mesma quantia do combustível fóssil equivalente;
- A utilização da terra para fins energéticos não deve prejudicar a produção de alimentos e deve respeitar as áreas de preservação (ecossistemas) que suportam as atividades econômicas.

Uma metodologia de avaliação de sistemas econômicos deve ser capaz de apreciar todos estes elementos, considerando ainda que a avaliação do biocombustível deve abranger desde o cultivo da matéria prima, passando pelas fases de produção e utilização, até sua disposição final [14]. Como o biodiesel avaliado neste estudo é um éster etílico de soja, produzido a partir de recursos repostos pelo crescimento de vegetais (soja e cana de açúcar), que ao realizarem a fotossíntese reabsorvem o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitido durante o uso do combustível [9], este estudo irá concentrar-se, principalmente, na cadeia produtiva do biodiesel, que é composta pelas seguintes etapas:

- (i) Cultivo das espécies vegetais (cana de açúcar e soja);
- (ii) Processos industriais intermediários (produção de álcool etílico e óleo de soja);
- (iii) Processo de produção do biodiesel (ésteres etílicos de soja).

Enquanto a contribuição para a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso do biodiesel já foram comprovadas em vários estudos, os impactos indiretos devido às emissões oriundas da produção de fertilizantes e defensivos, do manejo das culturas agrícolas e dos processos industriais (intermediários e de produção do combustível) precisam ser avaliados [9].

Com base nestas considerações, a presente dissertação de mestrado tem os seguintes objetivos:

- Apresentar algumas metodologias de análise de sistemas econômicos, avaliando o alcance, as limitações e as características complementares destas teorias;
- Expor a metodologia integrada de análise ambiental, proposta por Bakshi [15] e por Ulgiati & Brown [16], capaz de avaliar a sustentabilidade de um sistema produtivo contabilizando fatores ecológicos e econômicos;
- Aplicar estas metodologias ao sistema de produção de biodiesel visando avaliar a sustentabilidade do sistema de produção deste biocombustível.

Para atender estes objetivos, no Capítulo 2 são apresentadas as metodologias Análise de Ciclo de Vida, Análise de Exergia, Análise de Emergia e a Metodologia Integrada de Análise Ambiental. O Capítulo 3 aborda diferentes aspectos — características, uso, vantagens, desvantagens, etc. — relacionados ao biodiesel. Nos Capítulos 4, 5 e 6 são aplicadas as metodologias acima citadas na avaliação do éster etílico de soja. No Capítulo 7 são sumarizadas as conclusões e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

## 1.4 BIBLIOGRAFIA

- [1] NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S.; TROSSERO, M. A. & FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2000;
- [2] PIANOVSKI JÚNIOR, G. **Utilização de misturas de óleo diesel e ésteres etílicos de óleo de soja como combustíveis alternativos: análise do desempenho e do processo de combustão no motor diesel**. Curitiba, 2001. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná;
- [3] CUCOLO, E. **Haverá o Terceiro Choque?** Folha Online. Disponível em: <[http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/petroleo\\_choque.shtml](http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/petroleo_choque.shtml)> . Acesso em: 13 maio 2004;
- [4] BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA. **Relatório de Perspectivas do Meio Ambiente Mundial – GEO Brasil 2002**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 03 ago. 2003;
- [5] BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro: IBGE, 2002;
- [6] GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. & LUCON, O. How adequate policies can push renewables. **Energy Policy**, Article in Press;
- [7] LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002. Cap. 1;
- [8] VEJA. **Petrobrás 50 anos: sonho realizado e novos desafios**. São Paulo: Abril, ano 36, 1827 ed., 2003. Suplemento Publicitário;
- [9] FRANKE, B. & REINHARDT, G. Environmental impacts of biodiesel use. In: **BioEnergy '98: Expanding BioEnergy Partnerships**;
- [10] UNICA. União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 27 out. 2003;
- [11] BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. **Agenda 21: Antecedentes**. Disponível em: <<http://www.mre.gov.br/cdbrazil/Itamaraty/web/port/meioamb/agenda21/anteced>>. Acesso em: 13 maio 2004;
- [12] WALL, G. & GONG, M. On exergy and sustainable development – Part 2: Indicators and methods. **Exergy, an International Journal**, v.1, n.4, p.217-213, 2001;
- [13] BASTIANONI, S. & MARCHETTINI, N. Ethanol production from biomass: analysis of process efficiency and sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v.11, p.411-418, 1996;

- [14]KALTSCHMITT, M., REINHARDT, G. A. & STELZER, T. Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects. **Biomass and Bioenergy**, v.12, p.121-134, 1997;
- [15]BAKSHI, R. B. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers & Chemical Engineering**, v.26, p.269-282, 2002;
- [16]ULGIATI, S. & BROWN, M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions. The case of electricity production. **Journal of Cleaner Production**, v.10, p.335-348, 2002;



## **2 METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ECOLÓGICA DE SISTEMAS**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos que possuem atributos e funções específicas, que interagem entre si e com o exterior, com o objetivo de produzir um fluxo de energia, um bem material (produto) ou um serviço [1]. O meio ambiente é formado por diversos sistemas ecológicos. A conservação do meio ambiente demanda trabalho ambiental, realizado pelos ecossistemas através de processos naturais (físicos, químicos e/ou biológicos) de transformação de energia. Os ecossistemas dispõem de duas fontes básicas de energia: o estoque interno da biosfera — a água, os gases atmosféricos, os sólidos da crosta terrestre e a reserva de biodiversidade (fauna e flora) — e os fluxos vindos de fontes externas — a radiação solar, a energia gravitacional da lua e o calor interno do planeta. A capacidade do meio ambiente de manter suas condições de conservação é, então, limitada pela energia disponível e pela habilidade dos sistemas naturais em utilizar e transformar esta energia [1][2][3].

Os sistemas ecológicos constituem a base de sustentação dos sistemas econômicos (agrícolas ou industriais), pois estes consomem recursos naturais e lançam seus resíduos naqueles. Entretanto, quando a extração de recursos naturais e a produção de resíduos pela sociedade excedem, respectivamente, as capacidades de reposição e de assimilação dos sistemas ecológicos, as condições de conservação do meio ambiente são violadas e, conseqüentemente, estes ecossistemas são degradados [4][5].

O aumento da degradação ambiental provocado pelas atividades econômicas motivou a busca por processos produtivos ecologicamente inócuos, ou seja, aqueles processos que ao atender as necessidades da sociedade não comprometem as condições de preservação do meio ambiente [6]. Um sistema econômico cujos processos violam estas condições não pode ser considerado um sistema sustentável, pois destrói os alicerces que o mantêm.

Como os processos produtivos dependem de recursos e de serviços ambientais, a sustentabilidade de um sistema econômico, seja ele agrícola ou industrial, está vinculada à sustentabilidade dos sistemas ecológicos, ou seja, à capacidade de produção de recursos naturais e de execução de serviços ambientais necessários aos processos econômicos e à conservação do meio ambiente. Portanto, uma metodologia que vise avaliar a viabilidade de

um sistema econômico deve considerar a integração entre os processos que constituem o sistema e os sistemas naturais [4][5][7].

Algumas teorias de avaliação de sistemas procuram incorporar considerações ambientais em suas análises. Entretanto, de maneira geral, estas metodologias não consideram todas as interações relevantes entre os sistemas ecológicos e econômicos, restringindo suas análises a alguns aspectos ambientais específicos. Com o objetivo de mostrar tal característica, neste capítulo são apresentadas as metodologias análise de ciclo de vida, análise de exergia e análise de emergia. A apresentação enfatiza o alcance, as limitações e as características complementares destas teorias. Além disso, neste capítulo também é apresentada a metodologia integrada de análise ambiental, proposta por Bakshi [3] e por Ulgiati & Brown [8]. Esta metodologia é capaz de avaliar a sustentabilidade de um sistema produtivo contabilizando os fatores ecológicos e econômicos mais relevantes e por isso será utilizada para avaliar o processo de produção do biodiesel.

## 2.2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

A análise de ciclo de vida é uma das ferramentas mais utilizadas na avaliação dos impactos ambientais causados por produtos ou por processos durante todas as fases do ciclo de vida — produção, utilização, manutenção e destino final. A aplicação desta metodologia envolve quatro etapas: definição de objetivos e limites, inventário, avaliação de impactos e interpretação e melhorias. A primeira etapa determina o escopo da avaliação. Nela os objetivos são estabelecidos e os limites do sistema a ser analisado são demarcados. A delimitação do sistema é muito importante, pois qualquer alteração nas fronteiras deste pode acarretar modificações significativas no resultado da análise. Na segunda etapa, todos os fluxos de entrada e de saída do sistema analisado são inventariados, levando-se em conta cada fase do ciclo de vida. Então, na terceira etapa, estes fluxos são classificados em diferentes categorias de impacto ambiental e as contribuições relativas de cada fluxo para o impacto ambiental total são avaliadas. A última etapa (interpretação e melhorias) busca identificar maneiras de evitar ou minimizar os impactos causados sobre o meio ambiente [3][7][9].

A principal vantagem da análise de ciclo de vida é proporcionar uma estrutura de aplicabilidade geral para o estudo e para a avaliação dos impactos ambientais provocados pelas atividades econômicas. A ausência de uma base comum que permita a comparação entre os impactos causados por diferentes processos é um fator limitante desta metodologia [7]. Além disso, a dificuldade na definição da abrangência da análise e a influência desta nos

resultados também podem ser consideradas limitações [5]. Entretanto, a grande deficiência da análise do ciclo de vida está relacionada aos aspectos ambientais considerados na avaliação. Em geral são levados em conta apenas os impactos ambientais associados aos resíduos descarregados na natureza, ao consumo de energia e ao uso de recursos não renováveis (combustíveis fósseis e minérios) [3][10]. Não são computados nem o trabalho ambiental envolvido na produção e na reposição dos recursos naturais renováveis, nem o trabalho ambiental despendido na assimilação ou dispersão de substâncias poluentes pelo meio ambiente. Desta forma, todo o trabalho realizado pelo meio ambiente para manter e regenerar os sistemas ecológicos que suportam as atividades econômicas é ignorado [3][7].

## 2.3 ANÁLISE DE EXERGIA

A análise exergética utiliza o conceito de exergia na avaliação de sistemas industriais. A exergia é definida como a máxima quantidade de trabalho útil que teoricamente poderia ser produzida por um sistema, ao interagir com o ambiente de referência, até atingir o equilíbrio [11]. Assim, a exergia de um sistema depende do estado termodinâmico em que este se encontra e pode ser calculada pela Equação 2.1 [6].

$$Ex = S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_i n_i (\mu_i - \mu_{i0}) \quad (2.1)$$

onde:  $S$  é entropia,  $T$  é temperatura,  $V$  é volume,  $p$  é pressão,  $n_i$  é número de mols e  $\mu_i$  é o potencial químico da substância  $i$ . O subscrito “0” indica as condições do ambiente de referência. A exergia é medida em unidades da energia, ou seja, em *Joules*.

A exergia pode também ser interpretada como uma medida do potencial que um fluxo de matéria ou de energia, em desequilíbrio com o ambiente, tem para modificar este ambiente [6]. A exergia pode ser transferida de um sistema para outro e, diferentemente da energia, pode ser destruída como resultado de irreversibilidades. Como todos os processos reais são irreversíveis, sempre ocorrerá destruição de exergia. Isto significa, portanto, que devido às irreversibilidades inerentes a todos os processos reais, a exergia que entra é sempre maior que a exergia que sai de um sistema que se encontra em regime permanente. Além da destruição de exergia, geralmente, os processos industriais também apresentam perdas de exergia na forma de resíduos. Assim, as perdas totais de exergia de um sistema industrial

compreendem tanto a destruição de exergia como a exergia dos resíduos produzidos [6][10][12][13].

A análise exergética é utilizada na otimização dos processos industriais e consiste basicamente em localizar, avaliar e reduzir a destruição e as perdas de exergia nestes processos. A análise exergética contabiliza em termos de exergia todos os fluxos relacionados ao sistema, facilitando com isso comparações entre diferentes sistemas [3][9][14].

O impacto ambiental causado por um sistema está relacionado à destruição e às perdas de exergia deste sistema. Entretanto, é conveniente ressaltar que o impacto causado pela destruição de exergia difere daquele causado pela exergia contida nos resíduos lançados na natureza. A destruição de exergia não provoca impactos ambientais diretos. Porém, a elevada destruição de exergia nos processos industriais é compensada pelo sistema através do aumento do consumo de insumos exergéticos, provocando assim a redução das reservas de recursos naturais. Para diminuir a utilização de recursos nos processos e, conseqüentemente, minimizar o impacto ambiental associado à degradação de recursos naturais, é necessário aumentar a eficiência do sistema industrial [6][10].

As perdas de exergia associadas à emissão de resíduos industriais podem modificar o meio ambiente de maneira prejudicial, provocando a degradação dos ecossistemas nos quais os rejeitos foram lançados [6][15]. O potencial que os resíduos têm para provocar prejuízos nos sistemas naturais pode ser medida pela exergia destas substâncias. Devido à grande variedade de materiais, de tecnologias e de processos utilizados em sistemas industriais, a composição química dos resíduos lançados na natureza é muito variada. A fim de possibilitar a comparação entre os potenciais de prejuízo que resíduos provenientes de diferentes sistemas industriais exibem, foi proposto por Wang & Feng [13] o indicador “*Environmental Negative Effect – ENE*”. Este indicador é definido da seguinte forma.

$$ENE = \sum_i B_i Ex_i \quad (2.2)$$

onde:  $B_i$  é o coeficiente de dano e  $Ex_i$  é a exergia da substância  $i$  que compõe os resíduos analisados. O coeficiente de dano de cada substância  $i$  ao meio ambiente é determinado através da razão entre as concentrações no resíduo da própria substância  $i$  e de uma substância escolhida como referência [13]. Entretanto, deve-se destacar que a exergia, e conseqüentemente o indicador apresentado, fornece apenas uma medida do potencial de prejuízo à natureza, ou seja, não é uma medida da degradação sofrida pelo meio ambiente [7].

A maior falha da análise de exergia está em considerar somente os sistemas industriais, ou seja, as avaliações levam em conta apenas as causas de impacto ambiental, não considerando seus efeitos no meio ambiente. Da mesma forma que a análise do ciclo de vida, a análise exergética não contabiliza o trabalho realizado pelos sistemas naturais na execução dos produtos e dos serviços ambientais [3]. Logo, esta metodologia permite avaliar qual sistema é menos prejudicial ao meio ambiente, porém não permite determinar como e, tampouco, se os sistemas ecológicos envolvidos irão suportar a pressão imposta pelo sistema avaliado [7].

## 2.4 ANÁLISE DE EMERGIA

A emergia, também chamada de energia incorporada ou memória energética, é uma medida da energia utilizada, direta ou indiretamente, por um determinado sistema, para produzir um produto ou executar um serviço. O conceito de emergia contempla a história, o tempo e todos os processos envolvidos na execução de um produto ou serviço por um determinado sistema [2][9][16].

Embora possa ser aplicada a qualquer tipo de sistema, seja ele ecológico, agrícola ou industrial, a análise emergética tem sido utilizada, principalmente, nas avaliações dos sistemas ecológicos. Todo sistema necessita de insumos para fabricar um produto ou executar um serviço, e estes podem ser obtidos da natureza ou fornecidos pela sociedade. A teoria emergética converte todos os recursos (contribuições monetárias, fluxos de energia e de massa, informação, trabalho humano, entre outros) necessários ao funcionamento de um sistema, em termos de um tipo de energia. A energia solar sustenta a vida em nosso planeta então, por conveniência, na análise emergética todos os fluxos são expressos em unidades de energia solar (*solar emjoule [sej]*) [2][17].

O fator de conversão de energia, utilizado para expressar todos os fluxos de um sistema em termos de emergia é chamado de transformidade. A transformidade pode ser definida como a emergia requerida para produzir um *Joule* de um determinado serviço ou produto e é representada pela Equação 2.3.

$$\tau = \frac{\text{Emergia}}{\text{Energia}} \left[ \frac{\text{sej}}{\text{J}} \right] \quad (2.3)$$

Para fazer um produto ou realizar um serviço, os sistemas utilizam processos de transformação de energia. A cada transformação, uma quantidade de energia é utilizada para obter uma quantidade menor de outro tipo de energia. Quanto maior o valor da transformidade, maior a quantidade de energia solar empregada na obtenção do produto ou execução do serviço. Assim, o valor da transformidade pode ser obtido dividindo a soma de todos os fluxos de energia na entrada do sistema pela energia do fluxo de saída [2].

É importante ressaltar que, tal como a energia, a transformidade de um determinado produto depende dos processos envolvidos na execução deste. Conseqüentemente, a transformidade de produtos industriais pode variar muito, de acordo com as tecnologias e processos empregados na fabricação destes produtos, dificultando a aplicação desta metodologia na análise de sistemas industriais [3]. Entretanto, ao mesmo tempo em que pode ser considerada como um fator complicador da análise de energia, a transformidade pode ser utilizada para confrontar sistemas, formados por diferentes processos de produção, que fabricam um mesmo produto, auxiliando na escolha da alternativa mais adequada. Na Tabela 2.1 são apresentados alguns valores de transformidade.

TABELA 2.1 – TRANSFORMIDADES

| FONTE                |                                  | TRANSFORMIDADE  |
|----------------------|----------------------------------|-----------------|
|                      |                                  | $\frac{sej}{J}$ |
| Primária             | Sol (por definição)              | 1               |
|                      | Vento                            | 1.496 – 6.200   |
|                      | Correntes Oceânicas              | 27.874          |
| Recursos Energéticos | Carvão                           | 40.000          |
|                      | Gás natural                      | 48.000          |
|                      | Xisto                            | 1.000.000.000   |
|                      | Petróleo cru                     | 54.000          |
| Produtos Agrícolas   | Arroz                            | 24.000 – 44.000 |
|                      | Trigo                            | 68.000          |
|                      | Algodão                          | 1.900.000       |
| Produtos Pecuários   | Carne de boi                     | 1.730.000       |
|                      | Carne de frango                  | 2.000.000       |
|                      | Carne de carneiro                | 2.000.000       |
|                      | Leite                            | 1.060.000       |
| Trabalho Humano      | Meio rural                       | 400.000         |
|                      | Meio rural – operação de máquina | 1.200.000       |
|                      | Trabalho técnico agrícola        | 2.000.000       |
|                      | Trabalho nível superior          | 4.000.000       |
|                      | Trabalho professor universitário | 8.000.000       |

FONTE: ORTEGA, E. 2002. **Tabela de Transformidades**. [18]

Na metodologia emergética, os sistemas e processos são representados através de diagramas de emergia. Para tanto, todos os fluxos relacionados ao sistema são contabilizados, classificados e convertidos em unidades de emergia. A classificação dos fluxos de entrada do sistema é realizada conforme a origem e o tipo dos recursos:

- Os recursos naturais, provenientes de ecossistemas locais, são classificados em renováveis (R) e não renováveis (N);
- Os recursos econômicos (F – Feedback), provenientes de sistemas econômicos externos, são os materiais, os combustíveis, os bens de capital, os serviços e a mão de obra que mantêm o sistema produtivo.

Através destes fluxos de entrada é obtido o fluxo de saída do sistema (Y – Yield), ou seja, o produto fabricado. Estes fluxos podem ser esquematizados conforme mostra a Figura 2.1. Os sistemas podem, então, ser avaliados, em relação a aspectos econômicos e ecológicos, através de diversos indicadores. A Tabela 2.2 apresenta alguns destes indicadores.

Ao contrário das outras teorias, a análise de emergia considera os produtos e serviços ambientais. A emergia pode ser utilizada para avaliar tudo o que é produzido e mantido através do trabalho realizado por processos naturais [2]. Entretanto, a emissão de resíduos na natureza não é considerada pela metodologia emergética, inibindo a aplicação desta teoria na análise de sistemas econômicos (agrícolas e industriais), visto que os resíduos originários destas atividades estão diretamente relacionados com a poluição do meio ambiente e, portanto, não podem ser desconsiderados na avaliação de impacto ambiental de um sistema econômico [3].

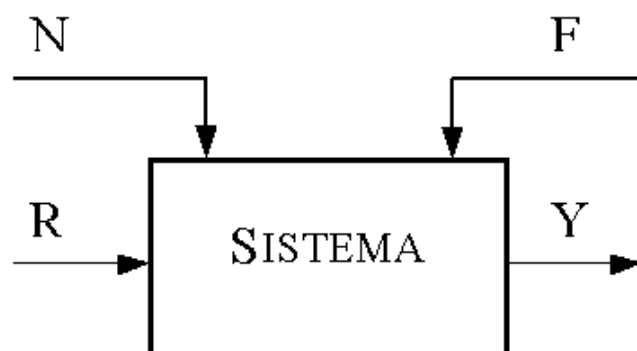


Figura 2.1: Representação dos fluxos do sistema para a análise de emergia [2]

TABELA 2.2 – INDICADORES DA METODOLOGIA EMERGÉTICA

| INDICADORES                                                                     | DESCRIÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | EQUAÇÃO                        |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Emergia Líquida<br>(ou Potencial Econômico)                                     | Representa a quantidade de emergia recebida pela economia em troca da emergia fornecida por ela ao sistema produtivo. É obtida subtraindo da emergia do produto do sistema (Y) a contribuição da economia (F). Para qualquer processo ser termodinamicamente vantajoso para a economia, a emergia líquida deve ser positiva. | $Em_{liq.} = Y - F$            |
| Razão de Rendimento em Emergia<br>( <i>Emergy Yield Ratio - EYR</i> )           | Representa o retorno do investimento econômico aplicado no sistema. É obtido dividindo-se a emergia dos produtos pela emergia investida pela economia. Quanto maior o EYR, maior o retorno do investimento econômico.                                                                                                        | $EYR = \frac{Y}{F}$            |
| Razão de Investimento em Emergia<br>( <i>Emergy Investment Ratio – EIR</i> )    | Mede a relação entre o investimento da economia e o investimento da natureza em um determinado sistema. Quanto maior o valor de EIR, maior a dependência dos recursos da economia.                                                                                                                                           | $EIR = \frac{F}{R + N}$        |
| Razão de Carregamento Ambiental<br>( <i>Environmental Loading Ratio – ELR</i> ) | A razão de carregamento ambiental, mede o impacto do sistema no meio ambiente. Um valor elevado para ELR indica um grande consumo de recursos não renováveis (locais e/ou externos).                                                                                                                                         | $ELR = \frac{F + N}{R}$        |
| Porcentagem de Emergia Renovável                                                | Permite verificar qual o percentual de recursos provenientes de fontes renováveis. Pode ser calculada dividindo-se a emergia contida nos recursos renováveis (R) pela emergia total dos recursos utilizados no processo (Y).                                                                                                 | $\%R = \frac{R}{Y} \times 100$ |

Fonte: ODUM, H. T. **Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making**. New York: John Wiley & Sons, 1996.[2]

BAKSHI, R. B. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers & Chemical Engineering**, v.26, p.269-282, 2002.[3]



## 2.5 METODOLOGIA INTEGRADA DE ANÁLISE AMBIENTAL

É inegável que as metodologias análise de ciclo de vida, análise exergética e análise emergética, quando empregadas na avaliação de sistemas econômicos permitem a adoção de medidas para reduzir o impacto ambiental gerado por estes sistemas. Entretanto, não são capazes de avaliar se o sistema econômico compromete as condições de conservação do meio ambiente e, em consequência, a sua própria sustentabilidade.

A proposta de integração entre as teorias de análise de ciclo de vida e de análise exergética resultou na análise exergética de ciclo de vida (*“Exergetic Life Cycle Assessment – ELCA”* ou *“Life Cycle Exergy Analysis – LCEA”*) [5][7][10][12], considerada a metodologia base da chamada ecologia industrial ou engenharia sustentável. A metodologia de análise exergética de ciclo de vida contabiliza todos os fluxos: insumos, produtos e emissões, utilizados ou produzidos por um sistema industrial em termos de exergia. Logo, a exergia representa um incremento na análise de ciclo de vida, pois fornece um indicador uniforme para a avaliação de impacto ambiental de sistemas industriais[10][12].

Na análise exergética de ciclo de vida, os resíduos dos processos produtivos podem ser avaliados de maneira análoga à descrita na metodologia de análise exergética. Assim, a exergia contida nas emissões de resíduos pode ser considerada como um potencial de prejuízo ao meio ambiente e, quanto maior for a quantidade de exergia, maior é a possibilidade do sistema degradar o meio ambiente [7][10].

A análise exergética de ciclo de vida contabiliza todos os recursos naturais, renováveis ou não, consumidos por um sistema econômico durante todo o ciclo de vida. O consumo de recursos naturais é uma forma de impacto ambiental, pois reduz a quantidade de recursos disponíveis na natureza. Entretanto, a redução dos recursos naturais renováveis, em regra, não é considerada nas avaliações de impacto ambiental da análise exergética de ciclo de vida [5][7][12][19]. Estes recursos são considerados gratuitos e ilimitados, ou seja, todo o trabalho ambiental despendido na produção e na reposição destes recursos é ignorado. Portanto, é necessário distinguir os recursos renováveis e os não renováveis dentro da análise exergética de ciclo de vida. Wall & Gong [10] classificam os recursos naturais em: depósitos, fontes e fluxos naturais. Os depósitos, também chamados de estoques mortos, são aqueles em que a utilização implica na redução da quantidade dos recursos, ou seja, são recursos não renováveis. As fontes ou estoques vivos compreendem as florestas, as plantações, etc., e os fluxos naturais incluem a luz solar, os ventos, a chuva, entre outros. As fontes e os fluxos naturais são considerados recursos renováveis [5][10].

O impacto ambiental relacionado ao consumo de recursos naturais é, então, avaliado através da redução dos recursos não renováveis. Esta redução dos recursos não renováveis é interpretada por alguns autores como o custo ecológico do sistema econômico [5][7][12][19]. Quanto maior o custo ecológico do sistema, maior o impacto ambiental relacionado ao consumo dos recursos naturais. Assim, o custo ecológico pode ser utilizado na comparação de diferentes sistemas econômicos.

A redução dos recursos naturais pode ser calculada, segundo Cornelissen & Hirs [12], utilizando a Equação 2.4.

$$\text{Redução de recursos não renováveis} = I_{CV} - Ex_R \quad (2.4)$$

onde:  $I_{CV}$  são as irreversibilidades do sistema durante todo o ciclo de vida e  $Ex_R$  é a exergia dos recursos renováveis consumidos pelo sistema. Assim, as irreversibilidades do sistema, subtraída a exergia dos recursos renováveis consumidos, constituem o custo ecológico deste sistema econômico [12].

Embora seja muito importante, a redução dos recursos naturais não renováveis não é o único fator associado à sustentabilidade de um sistema econômico. É claro que a redução de recursos não renováveis representa um grande impacto ambiental e, conseqüentemente, constitui uma ameaça para a sustentabilidade do sistema. Porém, considerar os recursos naturais renováveis como ilimitados e gratuitos também pode representar um grande perigo na difusão da deterioração do meio ambiente [3].

Uma concepção mais abrangente para o conceito de custo ecológico, proposta por Valero [14], contempla no cálculo do custo ecológico os seguintes elementos:

- A exergia de todos os recursos naturais;
- A exergia utilizada pelo sistema durante todo o ciclo de vida, ou seja, toda a exergia necessária à produção, ao transporte, à distribuição, ao uso, à manutenção e à disposição final dos produtos fabricados pelo sistema;
- A exergia necessária, considerando a tecnologia existente, para tornar os resíduos do sistema inofensivos ao meio ambiente;

- A exergia necessária para repor, com a tecnologia disponível, todos os recursos naturais consumidos nos processos, a fim de devolver para a natureza tudo o que foi retirado dela.

Certamente, esta concepção de custo ecológico é muito mais ampla, pois na avaliação do sistema econômico são considerados tanto os processos que compõem a cadeia produtiva, como os processos utilizados no tratamento de resíduos e na restauração do meio ambiente. Por outro lado, somente os processos econômicos são considerados, ou seja, os processos naturais, que atuam em conjunto com eles, tanto na reposição dos recursos naturais renováveis quanto na transformação dos resíduos em substâncias inócuas, não são avaliados nesta definição de custo ecológico. Além disso, nem sempre é possível transformar os resíduos em substâncias inócuas ao meio ambiente e, portanto, a contabilização dos processos ecológicos que atuam na assimilação e dissipação destes resíduos é necessária.

A avaliação dos recursos naturais através da exergia, também pode ser considerada uma medida incompleta. Processos naturais, atuando durante bilhões de anos, formaram os recursos naturais. A exergia fornece, somente, uma medida da energia disponível para ser utilizada pelo sistema e não avalia o trabalho ambiental utilizado na produção destes recursos.

A emergia permite avaliar tudo o que é produzido ou mantido por processos naturais, auxiliados ou não por processos artificiais. Logo, a análise emergética pode ser utilizada para suprir as deficiências da análise exergética de ciclo de vida, ou seja, incluir nas avaliações o trabalho ambiental realizado por processos naturais. A integração das três metodologias, ou seja, da análise de ciclo de vida, da análise exergética e da análise emergética resulta na metodologia integrada de análise ambiental.

A integração destas metodologias tem como objetivo possibilitar a avaliação da sustentabilidade de um sistema econômico, considerando todas as interações entre o sistema e o meio ambiente. Os recursos naturais e os serviços ambientais podem ser avaliados através da emergia. O sistema industrial pode ser otimizado através da análise exergética. Todos os recursos, investimentos e emissões relacionados aos processos que compõem o sistema analisado, podem ser computados utilizando o método de análise de ciclo de vida. É importante ressaltar que todos estes fluxos precisam ser convertidos em termos de uma única unidade de medida e, tanto a emergia como a exergia podem ser utilizadas para representar estes fluxos. A proposta de integração das três metodologias, apresentada por Bakshi [3], utiliza a emergia como unidade de representação dos fluxos (matéria, energia, dinheiro,

informação) do sistema e, a transformidade ( $\tau$ ) pode ser utilizada para relacionar a exergia e a emergia, conforme apresentado na Equação 2.5 [3].

$$Em [sej] = \tau [sej / J] \times Ex [J] \quad (2.5)$$

Os elementos considerados pela metodologia integrada de análise ambiental na avaliação do sistema são: os fluxos de entrada, os impactos econômico e ambiental e o fluxo de saída.

#### 2.5.1 OS FLUXOS DE ENTRADA

- Recursos Naturais Renováveis ( $R_1$ ) - São os fluxos naturais provenientes da energia solar direta, da energia gravitacional da lua e da energia do ciclo geológico, além dos produtos e serviços dos ecossistemas locais que alimentam o sistema produtivo. A emergia dos recursos naturais renováveis considera toda a energia utilizada por processos, naturais ou artificiais, na produção ou reposição dos recursos renováveis utilizados pelo sistema econômico analisado [2][3][8];
- Serviços Ambientais Destinados à Dissipação das Emissões ( $R_2$ ) - Contabiliza o trabalho empregado pelos sistemas naturais locais para dissipar os poluentes emitidos pelo sistema econômico analisado. A emergia de um determinado serviço ambiental pode ser determinada através da quantidade de serviço ambiental requerido e da transformidade deste serviço [3][8];
- Recursos Naturais Não Renováveis (N) - Compreendem os recursos naturais provenientes de sistemas naturais locais, consumidos pelo sistema econômico a taxas acima da velocidade de reposição destes pelo meio ambiente. A emergia dos recursos naturais não renováveis contabiliza toda a energia utilizada pelos processos naturais na fabricação dos recursos não renováveis [2][3][8];

- Investimentos da Economia (sistemas econômicos externos) no Sistema Produtivo (F) - Compreende os recursos econômicos ( $F_1$ ) — materiais, combustíveis, bens de capital, serviços e mão de obra — e o investimento econômico utilizado para abater, dispor ou reciclar as substâncias poluentes produzidas pelo sistema produtivo ( $F_2$ ). Contabiliza tudo aquilo que possui valor monetário e é utilizado pelo sistema produtivo. Os valores monetários podem ser convertidos em unidades de energia (sej) através da razão energia/dinheiro [2][3][8]. Na análise apresentada nos Capítulos 5 e 6, esta razão é obtida pela seguinte equação:

$$\left( \frac{\text{Energia}}{\text{Dinheiro}} \right)_{\text{Brasil}} = \frac{\text{Energia Incorporada pelo Brasil}}{\text{PIB do Brasil}} \left[ \frac{\text{sej}}{\text{US\$}} \right] \quad (2.6)$$

### 2.5.2 OS IMPACTOS

- Impacto Ecológico das Emissões ( $R_3$ ) - Estima o dano causado ao meio ambiente pelas emissões de poluentes do sistema econômico avaliado, através da quantidade de exergia perdida pelos ecossistemas afetados pela poluição [3]. Pelo enfoque ecológico, a exergia pode ser interpretada como uma medida do estado de um sistema natural (medida do nível de organização do ecossistema) [3][16][20]. Assim, a redução da exergia armazenada pelo ecossistema fornece uma medida geral do impacto ambiental provocados pelas substâncias poluentes [3]. A exergia como medida do nível de organização de um sistema, também pode ser utilizada para avaliar a capacidade do ecossistema de suportar a pressão das atividades econômicas, ou seja, estabelecer um limite a partir do qual o meio ambiente é degradado. A definição de poluição, proposta por Bastianoni [20], consiste na razão entre a variação da exergia armazenada pelo ecossistema ( $\Delta Ex_{\text{ecossistema}}$ ) e a quantidade de energia que entra neste ecossistema ( $\Delta Em_{\text{entrada no ecossistema}}$ ), como mostra a Equação 2.7. A energia que entra no ecossistema pode ser decorrente de resíduos de um determinado sistema econômico (agrícola ou industrial). O ecossistema é degradado quando  $\sigma < 0$ ,

ou seja, quando a entrada de energia provoca uma diminuição na organização do ecossistema (perda de exergia) [20].

$$\sigma = \frac{\Delta Ex_{\text{ecossistema}}}{\Delta Em_{\text{entrada no ecossistema}}} \quad (2.7)$$

- Impacto Econômico das Emissões ( $F_3$ ) - Busca medir o impacto econômico causado por substâncias poluentes emitidas pelo sistema em análise. Estas substâncias são prejudiciais tanto aos seres humanos (doenças) quanto ao meio ambiente (degradação ambiental, alterações climáticas, perda de biodiversidade, etc). O impacto econômico das emissões estima os custos, em termos de energia, do prejuízo causado pela poluição do meio ambiente [3].

### 2.5.3 O FLUXO DE SAÍDA

- Produto Fabricado pelo Sistema Econômico ( $Y$ ) - A energia do produto é obtida através do somatório das energias empregadas pelo sistema econômico na fabricação do produto.

### 2.5.4 OS INDICADORES

Analogamente à metodologia de análise emergética, a metodologia integrada de análise ambiental utiliza indicadores para avaliar os sistemas econômicos. Estes indicadores permitem comparar as contribuições da natureza e da economia para a constituição de um produto, além de estimar a sustentabilidade do sistema econômico e o impacto deste sobre o meio ambiente [1]. Os indicadores utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 2.3.

A razão de rendimento em energia (EYR) é um indicador do retorno do investimento econômico feito no sistema. A razão de investimento em energia (EIR) aponta o grau de dependência do sistema de recursos econômicos. A razão de carregamento ambiental (ELR) é um indicador do impacto do sistema sobre o meio ambiente. O indicador de sustentabilidade busca averiguar o quão sustentável é o sistema.

TABELA 2.3 – INDICADORES DA METODOLOGIA INTEGRADA DE ANÁLISE AMBIENTAL

| INDICADOR                                | FÓRMULA                                                                 |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Razão de Rendimento em Energia           | $EYR = \frac{Y}{(F_1 + F_2 + F_3)}$                                     |
| Razão de Investimento em Energia         | $EIR = \frac{(F_1 + F_2)}{(R_{\text{máximo}}[R_1; R_2] + N)}$           |
| Razão de Carregamento Ambiental          | $ELR = \frac{(F_1 + F_2 + F_3 + N + R_3)}{R_{\text{máximo}}[R_1; R_2]}$ |
| Indicador de Sustentabilidade do Sistema | $\text{Sustentabilidade} = EYR/ELR$                                     |

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O meio ambiente é essencial não só para a manutenção das atividades econômicas, mas também para a preservação da vida. Como a capacidade de regeneração do meio ambiente é limitada, o impacto ambiental causado por sistemas agrícolas e industriais não pode ser ignorado, uma vez que a degradação do meio ambiente prejudica a todos.

Os problemas ambientais provocados pelas atividades humanas são inúmeros, considerando que grande parte dos processos produtivos, universalmente disponíveis, causam algum tipo de prejuízo ao meio ambiente. Assim, a integração das metodologias análise de ciclo de vida, análise exergética e análise emergética, tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação ambiental ampla, que permita medir e minimizar as implicações ambientais relacionadas às atividades humanas.

A metodologia integrada de análise ambiental, ao considerar tanto os fatores econômicos como os fatores ecológicos, busca assegurar, sem comprometer a viabilidade econômica das atividades econômicas, a preservação do meio ambiente.

## 2.7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ORTEGA E. **Engenharia Ecológica: conceitos básicos e importância do trabalho de H. T. Odum.** Disponível em: <<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C01-Eng.Ecol.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [2] ODUM, H. T. **Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making.** New York: John Wiley & Sons, 1996;
- [3] BAKSHI, R. B. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers & Chemical Engineering**, v.26, p.269-282, 2002;
- [4] DALY, H. E. Toward some operational principles of sustainable development. **Ecological Economics**, v.2, p.1-6, 1990;
- [5] WALL, G. & GONG, M. On exergy and sustainable development – Part 2: Indicators and methods. **Exergy, an International Journal**, v.1, n.4, p.217-213, 2001;
- [6] ROSEN, M. A. & DINCER, I. Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. **Exergy, an International Journal**, v.1, p.3-13, 2001;
- [7] SEAGER, T. P. & THEIS, T. L. A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology. **Journal of Cleaner Production**, v.10, p.225-235, 2002;
- [8] ULGIATI, S. & BROWN, M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions. The case of electricity production. **Journal of Cleaner Production**, v.10, p.335-348, 2002;
- [9] UKIDWE, N. U. **Tutorials:** life cycle assessment, economic input-output analysis, basic thermodynamics with emergy analysis, eco-indicator99. Disponível em: <<http://www.che.eng.ohio-state.edu/~ukidwe/tutorial.htm>>, spring 2002;
- [10] WALL, G. & GONG, M. On exergy and sustainable development – Part 1: Conditions and concepts. **Exergy, an International Journal**, v.1, n.3, p.128-145, 2001;
- [11] MORAN, M. J. & SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Cap.7 e 13;
- [12] CORNELISSEM, R. L. & HIRS, G. G. The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. **Energy Conversion & Management**, v. 43, p. 1417-1424, 2002;
- [13] WANG, Y. & FENG, X. Exergy analysis involving resource utilization and environmental influence. **Computers & Chemical Engineering**, v.24, p.1243-1246, 2000;
- [14] VALERO, A. **Termoeconomics as a Conceptual basis for Energy Ecological Analysis.** Centre for Research of Energy Resources and Consumption (CIRCE) – University of Zaragoza. Disponível em: <<http://circe.cps.unizar.es>>;



- [15]SVIREZHEV, Y. M. Thermodynamics and ecology. **Ecological Modelling**, v.132, p.11-22, 2000;
- [16]BASTIANONI, S. & MARCHETTINI, N. Emergy/exergy ratio as a measure of the level of organization of systems. **Ecological Modelling**, v.99, p.33-40, 1997;
- [17]ORTEGA, E. **Contabilidade e diagnóstico de sistemas usando os valores dos recursos expressos em energia**. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega>> Acesso em: 19 fev. 2003;
- [18]ORTEGA, E. **Tabela de Transformidades**. Revisão 2002. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm>> Acesso em: 19 fev. 2003;
- [19]SZARGUT, J.; ZIEBIK, A. & STANEK, W. Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost. **Energy, Conversion & Management**, v.43, p.1149-1163, 2002;
- [20]BASTIANONI, S. A definition of 'pollution' based on thermodynamic goal functions. **Ecological Modelling**, v.113, p.163-166, 1998.

### 3 OS ÉSTERES DE ÓLEOS VEGETAIS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos grandes problemas ambientais da atualidade. A atmosfera terrestre é formada por diversos gases, como Nitrogênio, Oxigênio, Argônio, Dióxido de Carbono, Ozônio, entre outros. Estes gases regulam o regime climático da Terra e, portanto, são imprescindíveis à manutenção da vida no planeta. Entretanto, quando estão presentes na atmosfera em concentrações anormais, tornam-se extremamente nocivos ao meio ambiente. Além da deterioração da qualidade do ar, fenômenos como efeito estufa, redução da camada de Ozônio e chuva ácida, estão fortemente relacionados à variação na proporção dos gases que constituem a atmosfera, provocada, sobretudo, pela emissão desenfreada de substâncias poluentes originárias das atividades humanas [1][2]. Ao lado dos sistemas industriais, tais como centrais térmicas, refinarias petrolíferas, siderúrgicas e fábricas de cimento, os veículos automotores, grandes consumidores de combustíveis fósseis, destacam-se como fontes poluidoras da atmosfera, principalmente devido à emissão de gases, como Monóxido e Dióxido de Carbono, Dióxido de Enxofre e material particulado [1][3].

A busca por substitutos renováveis para os combustíveis fósseis vem aumentando nos últimos anos, em virtude do agravamento dos problemas ambientais relacionados ao uso dessas fontes de energia. Os ésteres de óleos vegetais, também denominados biodiesel, combustíveis obtidos a partir de fontes renováveis, despontam como opção à utilização do óleo diesel, combustível derivado de petróleo.

O óleo diesel é constituído principalmente por hidrocarbonetos, compostos orgânicos formados por Carbono e Hidrogênio. Os demais componentes são Nitrogênio, Enxofre, Oxigênio e metais na forma de sais de ácidos orgânicos [4]. Este combustível é utilizado, principalmente, no transporte coletivo urbano, em frotas de carga ou de passageiros, em equipamentos agrícolas e no transporte marítimo e fluvial. No setor de transportes, os veículos movidos a óleo diesel constituem a fonte mais importante de emissão de gases de efeito estufa, visto que geram cerca de 50% a mais de Dióxido de Carbono que os veículos leves [1].

Além das implicações ambientais, a poluição atmosférica tem também consequências sociais e econômicas. A deterioração da qualidade do ar atmosférico provoca sérios danos à saúde humana. Estudos indicam que, principalmente em áreas urbanas, a degradação do ar atmosférico tem sérias implicações na saúde da população, contribuindo para o surgimento ou agravamento de diversos problemas, como mortes prematuras e doenças respiratórias [1]. No

caso específico do óleo diesel, as emissões de poluentes, provenientes da queima deste óleo combustível, contribuem para o incremento da taxa de morbidade e mortalidade por doenças respiratórias da população exposta às mesmas, especialmente entre crianças e idosos [5].

Em termos econômicos, é preciso considerar que os combustíveis fósseis são recursos não renováveis e, portanto, finitos. O valor de mercado pode variar, entre outros fatores, de acordo com a escassez ou abundância de um determinado recurso. Portanto, a tendência é que os preços aumentem à medida que as reservas de recursos fósseis sejam consumidas e, deste modo, quanto maior for a participação de combustíveis não renováveis na matriz energética brasileira, maior será o impacto econômico relacionado à falta destes recursos [3].

Outro fator de importância econômica e também estratégica, é a dependência de importações de combustíveis. O Brasil ainda não produz petróleo suficiente para abastecer o mercado interno, embora a produção tenha aumentado consideravelmente nos últimos anos. A Figura 3.1 mostra o crescimento da produção brasileira de petróleo e a conseqüente diminuição das importações deste produto [6]. A situação do óleo diesel é crítica neste aspecto. Este combustível é o derivado de petróleo mais consumido no Brasil e uma grande parte deste produto vem sendo importada nos últimos anos. Em 2001, as importações de derivados de petróleo totalizaram 18,3 milhões de metros cúbicos, sendo o óleo diesel responsável por 36,2% deste total (aproximadamente  $6,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

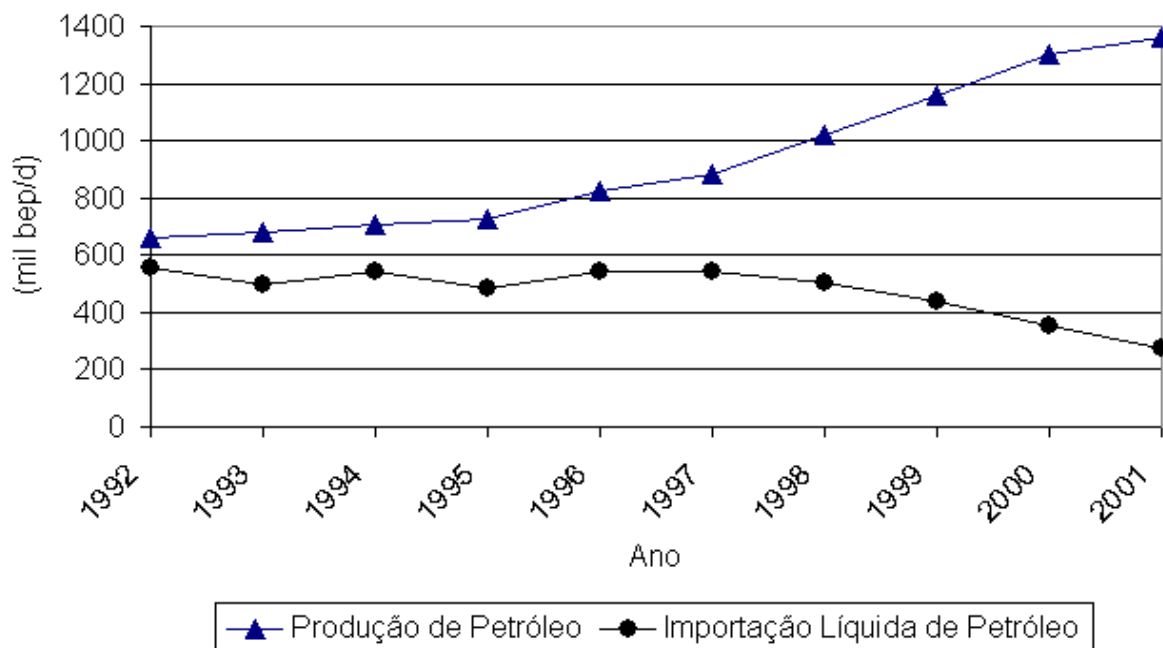


Figura 3.1: Produção e importação de petróleo [6]

Além de ser o derivado de petróleo com maior percentual de importação, como mostra a Figura 3.2, é atualmente o responsável por grande parte das despesas com as importações de derivados. Em torno de 43,3% do montante total de US\$ 2,8 bilhões despendidos em 2001 com a importação de derivados de petróleo foram gastos com o óleo diesel [6].

Neste contexto e, tendo em conta o potencial agrícola brasileiro, a adoção do biodiesel, um substituto sustentável para o óleo diesel, surge como alternativa para minimizar os problemas ambientais, econômicos e sociais relacionados ao uso deste derivado de petróleo [3][7][8].

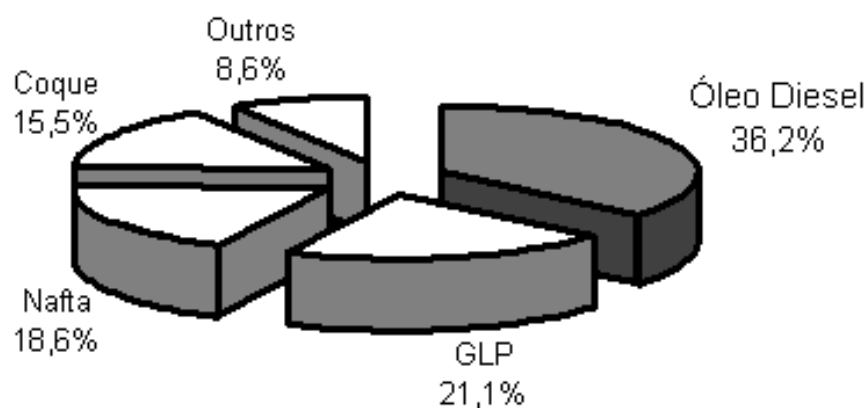


Figura 3.2: Importação de derivados de petróleo [6]

### 3.2 O BIODIESEL

O biodiesel é um combustível líquido originário do ciclo produtivo agro-industrial, produzido a partir de recursos biológicos renováveis, ou seja, recursos repostos pelo crescimento de vegetais. O biodiesel é obtido através da conversão da energia armazenada nos vegetais em combustível e, portanto, a principal fonte de energia contida neste biocombustível provém do Sol. As técnicas mais utilizadas na fabricação do biodiesel são: o preparo de emulsões, o craqueamento térmico (pirólise) e o processo de transesterificação (alcoólise), sendo esta última a mais empregada [9][10][11][12].

O processo de transesterificação, também conhecido por alcoólise de óleos vegetais, consiste na reação de um óleo vegetal com um álcool, na presença de um catalisador, para formar ésteres e glicerol, conforme esquematizado na Figura 3.3. Durante este processo, os componentes do óleo vegetal, os glicerídeos, são convertidos em ésteres dos respectivos óleos, que compõem o biodiesel. Diversos tipos de álcoois podem ser utilizados, entretanto, o metanol e o etanol são os mais comuns [9][10][11][12].

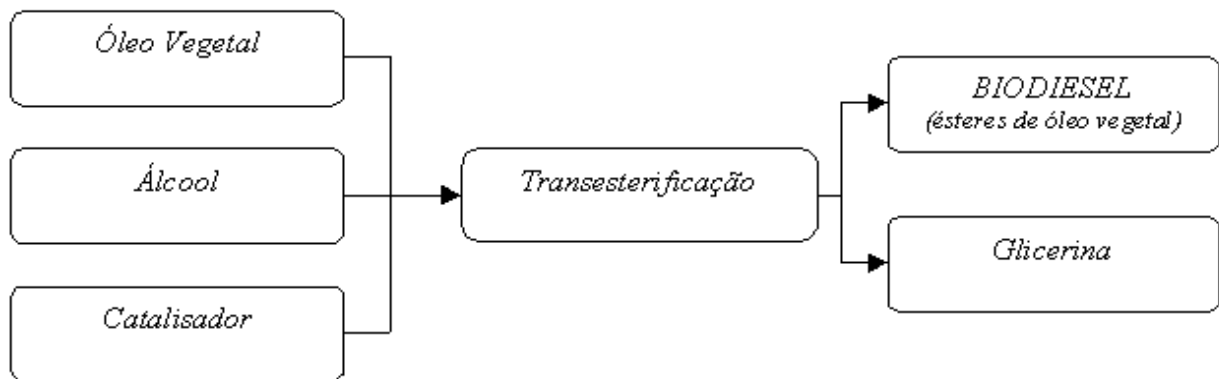


Figura 3.3: Processo de Transesterificação

O biodiesel é completamente miscível com o diesel de origem mineral e, portanto, pode ser utilizado tanto na sua forma pura, quanto na forma de uma mistura de combustíveis. Estas misturas são descritas pela porcentagem, em volume, de biodiesel na mistura de combustível. Uma mistura B5 indica que o combustível é constituído por 5% de biodiesel e 95% de óleo diesel. Quando o biodiesel é utilizado na forma pura, é denominado B100 [13][14].

Os veículos do ciclo Diesel podem operar com biodiesel, puro ou misturado, sem necessidade de efetuar qualquer modificação no motor e sem provocar alterações significativas em sua capacidade de carga ou em sua autonomia. Desta forma, os mercados para o biodiesel são os mesmos do óleo diesel, ou seja, transporte coletivo urbano, frotas de carga ou de passageiros, equipamentos agrícolas, transporte marítimo e fluvial, entre outros [12][15].

### 3.2.1 AS VANTAGENS

As motivações de natureza ambiental para a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira são muitas. O biodiesel é uma fonte de energia renovável, biodegradável e apresenta baixa toxicidade. Por ser um combustível oxigenado, tem uma queima mais completa, reduzindo as emissões de diversos gases poluentes, tais como Monóxido de Carbono, hidrocarbonetos e material particulado, minimizando, deste modo, a poluição do ar atmosférico e as conseqüentes implicações ambientais, como o efeito estufa, a contaminação do solo e a acidificação do ar. Quanto maior for a porcentagem de biodiesel utilizado na mistura de combustível, maior será a redução de poluentes emitidos [1][3][12][14].

A Figura 3.4 mostra o percentual médio de redução nas emissões de Dióxido de Carbono, hidrocarbonetos não queimados, Dióxido de Enxofre e material particulado, das misturas B5 e B20 e, também, do biodiesel puro em relação ao óleo diesel convencional [16]. A redução das emissões destes poluentes possibilita, além das vantagens ambientais, resguardar a saúde da população, visto que estas substâncias são suspeitas de causar ou agravar problemas de saúde no ser humano, tais como: confusão mental, prejuízo aos reflexos, prejuízo à oxigenação dos tecidos, problemas respiratórios e cardiovasculares [1].

No campo econômico, além de diminuir a dependência externa de óleo diesel, reduzindo a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética brasileira, a adoção do biodiesel possibilita diversificar a economia, criando um novo mercado para as oleaginosas [7]. A introdução deste biocombustível na matriz energética brasileira pode, ainda, constituir uma fonte de geração de divisas para o País, visto que a substituição, mesmo que parcial, de recursos não renováveis por fontes energéticas renováveis pode ampliar as possibilidades de negociação de créditos de carbono [17].

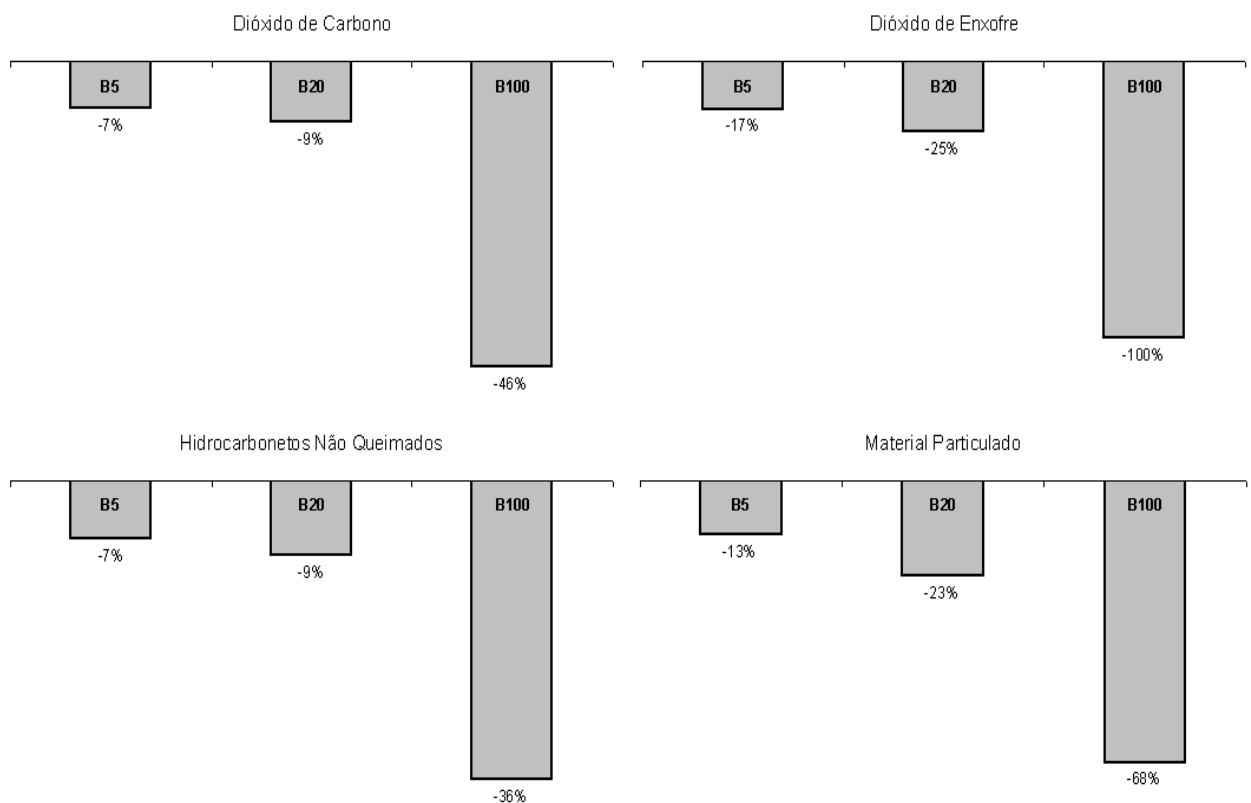


Figura 3.4: Redução média das emissões de poluentes [16]

A Terra é um grande sistema de reciclagem de carbono. Mais de 100 Gton/ano de Carbono, na forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), são absorvidas pelas plantas vivas. Durante o último século, porém, a concentração de Dióxido de Carbono na atmosfera aumentou muito, devido às emissões de poluentes relacionadas às atividades humanas [2]. O Protocolo de *Kyoto* estabeleceu como meta que a emissão de gases causadores do efeito estufa deve ser reduzida em torno de 8%, em relação ao que era emitido em 1990, até o ano de 2010 [18]. Para atingir esta meta, foram criadas flexibilizações através das quais os países podem promover a redução fora de seu território. Essas alternativas ficaram conhecidas como Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo a negociação de Créditos de Carbono sua forma mais conhecida. A moeda de padronização é o Carbono Equivalente, ou seja, quantas toneladas de Carbono correspondem à redução do gás que está sendo eliminado [17].

O biodiesel pode ser considerado neutro na produção de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ). Quando as espécies vegetais estão crescendo, absorvem aproximadamente a mesma quantidade de dióxido de carbono que é emitida durante o processo de combustão, tornando o balanço de Carbono praticamente zero. Como o óleo diesel é uma fonte importante de gases associados à poluição do ar atmosférico, a redução do consumo deste derivado de petróleo, devido à introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, resultará na redução das emissões de gases poluentes, possibilitando a negociação dos Créditos de Carbono excedentes e, deste modo, gerando divisas para o País [1][2][15].

### 3.2.2 O Uso

O biodiesel vem sendo utilizado principalmente na Europa, tanto na forma pura como na forma de misturas com o óleo diesel. A mistura B5 é muito utilizada em países como a França, a Alemanha, a Áustria, a Espanha e em países da Europa central. Particularmente na Alemanha, existe uma frota significativa de veículos leves, coletivos e de cargas utilizando biodiesel puro (B100). O biodiesel europeu é produzido, principalmente, a partir dos óleos de colza ou de girassol, associados ao álcool metílico (metanol). A produção total de biodiesel da União Européia foi de aproximadamente 1075 mil toneladas em 2002, e já existem 38 plantas industriais em funcionamento. Os Estados Unidos também utilizam a mistura B5, sendo o biodiesel produzido a partir de óleo de soja combinado com metanol [11][12][19][20].

No Brasil, antes mesmo das crises mundiais de petróleo, o exército brasileiro já realizava experiências utilizando óleos vegetais como combustíveis veiculares. As crises do

petróleo ocorridas na década de setenta motivaram o desenvolvimento de fontes alternativas de energia, especialmente para substituição de produtos derivados do petróleo e, desde a década de oitenta, diversas oleaginosas vêm sendo avaliadas em relação ao seu potencial energético [21].

Recentemente, testes com ésteres de óleos vegetais, a fim de verificar a viabilidade econômica e ambiental destes biocombustíveis vêm sendo realizados. O Instituto de Tecnologia do Paraná - TECPAR, desde 2000 vem avaliando, em uma frota de ônibus urbanos na cidade de Curitiba, a viabilidade da substituição do combustível utilizado rotineiramente neste tipo de transporte (Diesel Metropolitano Tipo C) por uma mistura B20 (80% de óleo diesel e 20% de biodiesel em volume) [15]. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 3.1.

Em termos ambientais, as vantagens da substituição do diesel pela mistura de diesel-biodiesel são extremamente significativas. Porém, em termos econômicos, o diesel de origem mineral mostra-se mais competitivo, com um custo final em torno de 26% menor que o da mistura B20 [15][20]. No entanto, considerando que nestes testes o volume de biodiesel utilizado foi relativamente pequeno, é provável que o custo do combustível diminua para volumes maiores, tornando o biodiesel um produto economicamente viável.

Outro teste de campo vem sendo feito desde novembro de 2002 pelo Centro de Referência em Biomassa – CERBIO. Um veículo VW GOLF TDI 1.9 Diesel, operando com B20, sendo: 20% de éster etílico de soja fornecido pela ECOMAT e 80% de diesel D fornecido pela Petrobrás - REPAR, vem sendo monitorado. O veículo já rodou 14000km, apresentando consumo médio de 11,04km/l na cidade e 15,13km/l na estrada [22].

TABELA 3.1 – COMPARAÇÃO MISTURA B20 E ÓLEO DIESEL

| ITENS COMPARADOS       | MISTURA B20               |
|------------------------|---------------------------|
|                        | EM RELAÇÃO AO ÓLEO DIESEL |
| Consumo de Combustível | + 3 %                     |
| Custo do Combustível   | + 26 %                    |
| Impacto na Tarifa      | + 2,7 %                   |
| Emissões BOSH          | – 18 %                    |
| Opacidade              | – 35,82 %                 |

FONTE: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIESEL. Curitiba, out. 2002.[15]



Estão tramitando na Câmara Federal dois projetos de lei (n. 6983, de 12 de junho de 2002, e n. 526, de 27 de março de 2003) que visam implantar e regulamentar o uso do biodiesel no Brasil, através do programa PRÓ-BIODIESEL. Tais projetos propõem a obrigatoriedade de produção e uso de biodiesel, na forma de éster etílico de óleos vegetais, de maneira progressiva, na porcentagem mínima de mistura de 5% (B5) no óleo diesel derivado de petróleo. Para tanto, uma produção anual de 1,3 milhões de toneladas de biodiesel é requerida [3][7][19][23][24].

### 3.2.3 A MATÉRIA – PRIMA: OS REAGENTES

#### 3.2.3.1 Os Óleos Vegetais

O Brasil tem um grande potencial para produzir biodiesel a partir de óleos vegetais, devido a sua localização geográfica, a sua vocação agrícola e, também, à grande diversidade em termos de oleaginosas. O aproveitamento energético de óleos vegetais possibilita a geração de novos postos de trabalho principalmente na área rural, além de aumentar a oferta da fração protéica das oleaginosas, importante insumo para as indústrias de alimentos e ração animal [3][11][12].

Podem constituir matéria-prima para a produção de biodiesel, as seguintes espécies vegetais oleaginosas: soja, amendoim, dendê, coco, algodão, babaçu, girassol, mamona, colza, maracujá, abacate, linhaça, piqui, buriti, macaúba, indaiá, entre outras [7][25][26]. A Tabela 3.2 relaciona alguns vegetais oleaginosos com potencial de uso energético no Brasil.

TABELA 3.2 – POTENCIAL ENERGÉTICO DOS VEGETAIS OLEAGINOSOS

| ESPÉCIES DE OLEAGINOSAS | CONTEÚDO DE ÓLEO (%) | CICLO PARA MÁXIMA EFICIÊNCIA | MESES DE COLHEITA | RENDIMENTO EM ÓLEO (t/ ha) |
|-------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------|
| Abacate                 | 7 – 35               | 7 anos                       | 12                | 3,0 – 6,0                  |
| Algodão                 | 15                   | anual                        | 3                 | 0,1 – 0,2                  |
| Amendoim                | 40 – 43              | anual                        | 3                 | 0,6 – 0,8                  |
| Babaçu                  | 66                   | 7 anos                       | 12                | 0,1 – 0,3                  |
| Coco                    | 55 – 60              | 7 anos                       | 12                | 1,3 – 1,9                  |
| Colza                   | 40 – 48              | anual                        | 3                 | 0,5 – 0,9                  |
| Dendê                   | 20                   | 8 anos                       | 12                | 3,0 – 6,0                  |
| Girassol                | 38 – 48              | anual                        | 3                 | 0,5 – 1,9                  |
| Ricino                  | 43 – 45              | anual                        | 3                 | 0,5 – 0,9                  |
| Soja                    | 17                   | anual                        | 3                 | 0,2 – 0,4                  |

FONTE: NOGUEIRA, L. A. H. & PIKMAN, B. Informe Conjuntura & Informação, ANP, ago. /out., 2002. [7]

Atualmente, a soja é a única oleaginosa que apresenta a escala necessária, em nível nacional, para atender ao programa B5. Com uma safra, em 2003, em torno de 51 milhões de toneladas e com capacidade instalada de processamento de 36,4 milhões de toneladas de soja, o Brasil tem capacidade nominal para produzir 6,9 milhões de toneladas de óleo de soja. Em 2003, foram produzidos 5,4 milhões de toneladas de óleo de soja, restando portanto uma capacidade ociosa de produção de 1,5 milhões de toneladas de óleo vegetal, que pode ser aproveitada para a produção de biodiesel (ésteres de óleo de soja) [19][27].

Outras culturas, de importância regional, podem ser utilizadas na produção deste biocombustível, visto que a tecnologia a ser usada na obtenção do biodiesel é muito semelhante, qualquer que seja o óleo vegetal adotado. Não há dúvida que os óleos vegetais extraídos de culturas perenes, pouco ou ainda não exploradas no país, poderão representar uma possibilidade interessante de substituição do óleo diesel a nível regional. Tais culturas podem utilizar solos menos férteis e podem ser desenvolvidas em áreas não competitivas com a agricultura de subsistência [26].

### 3.2.3.2 Os Álcoois

O álcool utilizado na reação pode ser de origem vegetal ou mineral e, dentre os diversos álcoois que podem ser utilizados na obtenção do biodiesel, o metanol e o etanol se destacam.

O metanol, também chamado de álcool metílico, é um álcool obtido de fontes fósseis e, portanto, não renováveis, a partir do gás metano ou gás natural. Pode ser obtido, também, em pequenas quantidades, por destilação seca da madeira. O metanol, em relação ao etanol, apresenta vantagens no processo produtivo do biodiesel, tais como menor consumo de álcool e de outros insumos. Entretanto, para utilizar o metanol na produção de biodiesel, o Brasil precisaria recorrer às importações, uma incoerência considerando que um dos benefícios do biodiesel é a redução da dependência externa, através da substituição de um produto importado por outro obtido a partir de matéria prima produzida no país [25][27][28].

O álcool etílico, também conhecido como etanol, é composto por dois átomos de Carbono, cinco átomos de Hidrogênio e uma hidroxila ( $C_2H_5OH$ ). No Brasil, é obtido pelo processo de fermentação do caldo da cana-de-açúcar e usado nas formas de etanol anidro ou de etanol hidratado. O álcool etílico anidro apresenta teor alcoólico mínimo de 99,3° INPM (fixado pela portaria ANP n.45/01), e é atualmente utilizado na forma de mistura com a gasolina, sendo o teor de álcool permitido entre 20 a 24%. O etanol hidratado apresenta teor

alcoólico na faixa de 92,6° a 93,8° INPM. É utilizado em motores do ciclo Otto, em veículos denominados tipo álcool [6].

As vantagens brasileiras em se utilizar o etanol na produção do biodiesel são muitas. O etanol é um combustível de baixa toxicidade e totalmente biodegradável. O Brasil é um grande produtor de etanol, além de ser altamente competitivo: possui a infra-estrutura de produção e distribuição, além do domínio das tecnologias desenvolvidas para a cadeia produtiva da cana de açúcar e do setor automotivo. A capacidade brasileira de produção de etanol é da ordem de 16 bilhões de litros ( $16 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) por ano [6][8][9][27]. A Figura 3.5 mostra a evolução da produção de álcool etílico no Brasil.

Além das vantagens citadas, a adoção do álcool de origem vegetal (etanol) possibilita melhores oportunidades na negociação de Créditos de Carbono para o Brasil. Quando de origem vegetal (rota etílica), a emissão de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), decorrente da combustão do biodiesel, é reabsorvida na íntegra pela fotossíntese, durante o crescimento das próximas safras das biomassas das quais se produz o álcool e o óleo vegetal. Quando o álcool é mineral (rota metélica), apenas o percentual do  $\text{CO}_2$  referente à queima do óleo vegetal é reabsorvido [11][15].

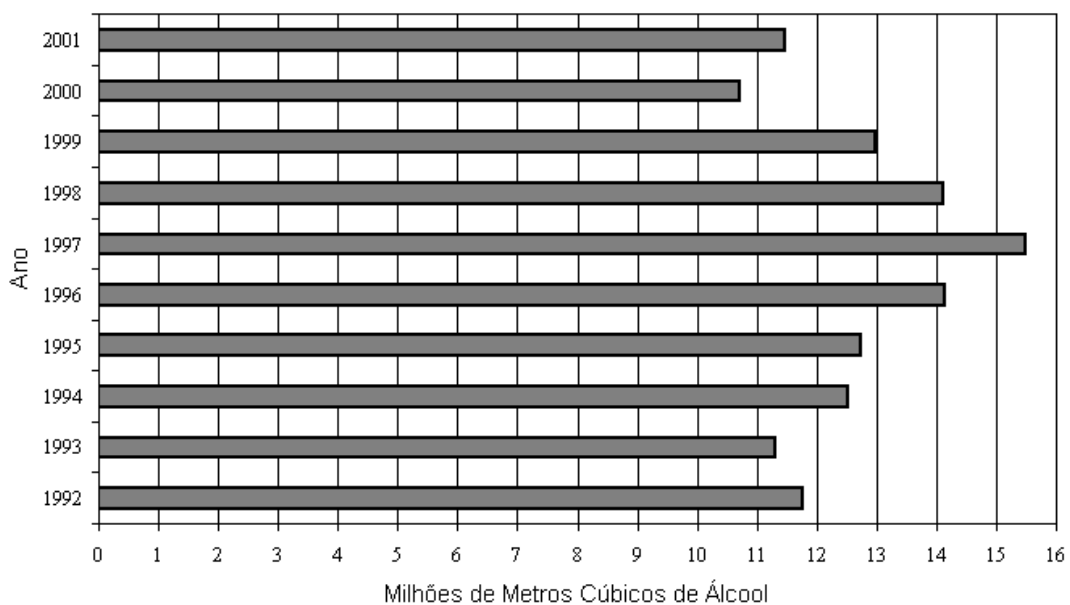


Figura 3.5: Produção de álcool no Brasil [6]

### 3.2.4 OS DESAFIOS

O principal obstáculo para a utilização de ésteres de óleos vegetais como combustíveis é o elevado custo dos produtos acabados em relação ao petróleo. Na Europa, o uso do biodiesel recebe incentivo à produção através da redução da carga tributária. Assim sendo, a implantação de uma política energética de incentivo à utilização do biodiesel pode contribuir para a redução do custo final deste combustível [14][20][24].

Outro aspecto que deve ser levado em conta para a adoção do biodiesel consiste na necessidade de expandir o mercado do subproduto gerado no seu processo de fabricação: a glicerina. A glicerina, nome usual dado ao 1, 2, 3-propanotriol, é um líquido incolor, inodoro, viscoso e tem diversas aplicações, como por exemplo: na fabricação de celofane, de adesivos, de tintas, de produtos têxteis, de produtos fotográficos, de produtos alimentícios, de produtos cosméticos, como agente emulsificante, agente bacteriostático, na produção de dinamite, na produção de misturas anti-congelantes, e quando em alta pureza, tem aplicações na medicina, como na produção de fármacos contra doenças cardíacas [27][29]. Apesar de todo o vasto campo de aplicação, a produção de biodiesel em quantidade suficiente para substituir 1% do diesel total no Brasil produzirá glicerina em quantidade igual à necessidade do mercado nacional, ou seja, aproximadamente 30 mil toneladas/ano. Em volumes maiores, a glicerina não poderá ser absorvida pelo mercado tradicional e, portanto, buscar desenvolver outras aplicações para a glicerina em novos mercados é um dos grandes desafios a serem vencidos. Além disso, para viabilizar economicamente a produção industrial do biodiesel, é necessário obter glicerina com elevado grau de pureza, ou seja, um produto com alto valor agregado, a fim de contribuir para a obtenção de um preço competitivo no mercado para o biodiesel [8][15][25][29].

## 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL

No Brasil, a determinação de uma especificação padrão para o biodiesel está em debate. O biodiesel deve atender às especificações técnicas como sendo um produto único, sem necessidade da definição do óleo vegetal ou do álcool a serem usados na produção, garantindo apenas a sua adequação ao uso em motores do ciclo Diesel. Para tanto, pode-se utilizar como base padrão a especificação do óleo diesel, eliminando as características não aplicáveis e incluindo as particularidades do biodiesel [8][15].

### 3.3.1 AS CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS PARA MOTORES DIESEL

A viabilidade técnica de um combustível para motores diesel pode ser avaliada de acordo com os seguintes fatores: qualidade da combustão, emissão de poluentes, compatibilidade ao uso e compatibilidade ao manuseio [25].

Nos motores do ciclo Diesel, a qualidade da combustão está relacionada principalmente ao poder calorífico e ao índice de cetano. O poder calorífico permite estabelecer o calor máximo que pode ser liberado durante a combustão no motor em operação. Embora o poder calorífico do diesel seja ligeiramente maior que o do biodiesel ( $42,5 \text{ MJ/kg}_{\text{diesel}}$  contra  $40 \text{ MJ/kg}_{\text{biodiesel}}$ ), não há variação significativa no desempenho do motor quando o biodiesel (puro ou na forma de misturas) é empregado em substituição ao óleo diesel [12][25].

Para que o funcionamento de um motor a óleo diesel possa ser considerado satisfatório, é necessário que o tempo decorrido entre a injeção de combustível e a sua ignição seja o menor possível [30]. O número de cetano representa a medida deste tempo de ignição e, define o poder de auto-inflamação do combustível, sendo que seu valor condiciona o desempenho global do motor. Quanto maior o número de cetano, melhor o combustível [12][14].

O número de cetano dos ésteres de óleos vegetais é, em geral, superior ao número de cetano do diesel de origem mineral. Na Figura 3.6, foram confrontados: éster etílico de óleo de soja, óleo diesel do tipo D e suas misturas B5, B10, B15 e B20. Quanto maior a porcentagem de biodiesel na mistura de combustível, maior o número de cetano [31].

Participam, também, como fatores de qualidade na combustão, a viscosidade cinemática e a tensão superficial. Pelo fato de influenciarem na qualidade de pulverização da injeção do combustível, afetam o funcionamento do sistema de injeção, refletindo no processo de combustão, de cuja eficiência máxima dependerá a potencia máxima desenvolvida no motor [12][25].

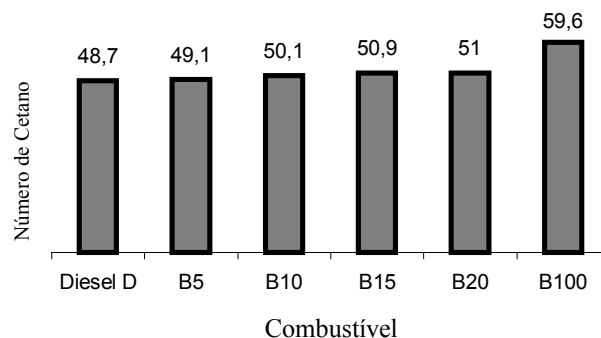


Figura 3.6: Número de cetano [31]

A emissão de poluentes é influenciada pela qualidade da combustão e pela composição química do combustível. A fim de evitar a emissão excessiva de poluentes, o teor dos constituintes do combustível, cujos produtos da combustão são gases tóxicos, devem ser limitados, a exemplo do teor de Enxofre de um combustível. O excesso de Dióxido de Enxofre na atmosfera pode levar à formação da chuva ácida e causar o agravamento de problemas respiratórios e cardiovasculares da população. Uma das grandes vantagens dos combustíveis produzidos a partir dos óleos vegetais reside na ausência de Enxofre e, conseqüentemente, os gases gerados na sua queima não contêm Dióxido de Enxofre [1][15]. Pode ser observado na Figura 3.7, para o caso de um éster etílico de soja e suas misturas com óleo diesel tipo D, que quanto maior for a porcentagem de biodiesel na mistura, menor o teor de Enxofre (% em massa) [31].

A compatibilidade ao uso pode ser avaliada através dos seguintes fatores: estabilidade à oxidação, propriedades lubrificantes, teor de Enxofre, presença de água e de sedimentos e acidez do combustível. Os produtos da oxidação do combustível podem afetar a sua durabilidade e contribuir para a formação de depósitos no tanque, no sistema e nos filtros de combustível [12][14][25][30].

A corrosão e o desgaste são, principalmente, função do teor de Enxofre, visto que o Enxofre contido nos combustíveis Diesel, devido à natureza corrosiva de seus produtos de combustão (Dióxido de Enxofre), provoca desgaste no motor [30].

As propriedades lubrificantes de um combustível são importantes devido à utilização do próprio combustível como lubrificante das partes móveis das bombas de combustíveis. Neste aspecto o biodiesel é mais vantajoso que o óleo diesel convencional, pois possui maior capacidade de lubrificação [14].

A presença de água e sedimentos no combustível é indesejada. A água pode congelar e obstruir os filtros e canalizações estreitas, além de provocar formação de ferrugem nos motores. Os sedimentos podem ocasionar desgaste e criar depósitos tanto no sistema de injeção como no motor propriamente dito [30].

Uma acidez elevada tem um efeito negativo sobre a qualidade do óleo, a ponto de torná-lo impróprio para fins carburantes, pois tem ação corrosiva sobre componentes metálicos do motor. A acidez de um combustível é medida através do índice de acidez, que é a medida, em miligramas, da quantidade de hidróxido de Potássio necessária para neutralizar os ácidos livres contidos em um grama de amostra. O diesel convencional possui um valor de acidez muito baixo, em torno de 0,002 mg KOH/g [12][13].

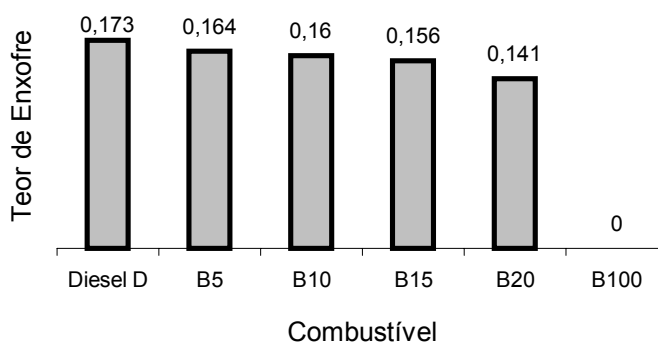


Figura 3.7: Teor de Enxofre [31]

A compatibilidade ao manuseio está relacionada às condições de transporte, de armazenamento e de distribuição do combustível, sendo o ponto de fulgor, o ponto de névoa e o ponto de fluidez os fatores mais importantes. A corrosividade e a toxicidade também estão relacionadas a este aspecto [25]. O ponto de fulgor indica a temperatura mínima na qual o óleo forma com o ar uma mistura inflamável. Assim, o ponto de fulgor aponta a temperatura abaixo da qual o combustível pode ser manuseado sem risco de fogo. Quanto maior é o ponto de fulgor, mais seguro é o combustível. O ponto de fulgor do biodiesel, em geral, é alto ( $>90^{\circ}\text{C}$ ) e, portanto, este biocombustível pode ser considerado seguro em termos de transporte e armazenagem [12][14][30]. O ponto de névoa é a temperatura, expressa em números inteiros, na qual se inicia a cristalização ou separação de parafinas contidas no combustível, evidenciadas pelo aparecimento de névoa ou de turvação. O ponto de fluidez é a temperatura na qual o combustível assume a forma de um gel e não é mais passível de bombeamento. O ponto de fluidez é ligeiramente menor que o ponto de névoa. Tanto o ponto de névoa como o ponto de fluidez são freqüentemente utilizados para especificar a temperatura mais baixa de utilização dos óleos combustíveis [12][13][14][30].

Alguns aspectos do combustível, como a aparência, a cor e a limpidez não influenciam o desempenho do combustível, porém, auxiliam na avaliação de sua contaminação por óleos residuais, água ou partículas sólidas, ou seja, servem para indicar a uniformidade e a isenção de impurezas grosseiras nos combustíveis [30].

Assim, entre as propriedades importantes para a avaliação da qualidade dos óleos vegetais como combustíveis, podem ser relacionadas as seguintes características: o poder calorífico, o número de cetano, o ponto de fulgor, a viscosidade, as propriedades de escoamento (ponto de névoa e ponto de fluidez), as propriedades lubrificantes, entre outras [12][14]. Na Tabela 3.3, são apresentadas as especificações para o óleo diesel, estabelecidas pela Portaria n. 310, de 27 de dezembro de 2001.

TABELA 3.3 – ESPECIFICAÇÃO DO ÓLEO DIESEL

| CARACTERÍSTICAS                                                       | LIMITES<br>(TIPO: METROPOLITANO) | MÉTODOS             |                                     |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
|                                                                       |                                  | ABNT                | ASTM                                |
| <b>Aparência</b>                                                      |                                  |                     |                                     |
| Aspecto                                                               | Límpido, isento de impurezas     | Visual              |                                     |
| Cor ASTM, máx.                                                        | 3,0                              | NBR14483            | D1500                               |
| <b>Composição</b>                                                     |                                  |                     |                                     |
| Enxofre Total, máx. [% massa]                                         | 0,20                             |                     | D1553<br>D2622<br>NBR14533<br>D4294 |
| <b>Volatilidade</b>                                                   |                                  |                     |                                     |
| Destilação [°C]                                                       |                                  | NBR 9619            | D86                                 |
| 50% vol. recuperado, máx.                                             | 245,0 – 310,0                    |                     |                                     |
| 85% vol. recuperado, máx.                                             | 360,0                            |                     |                                     |
| Massa Específica a 20°C [kg/m³]                                       | 820 – 865                        | NBR7148<br>NBR14065 | D1298<br>D4052                      |
| Ponto de Fulgor, min. [°C]                                            | 38,0                             | NBR7974<br>NBR14598 | D56<br>D93<br>D3828                 |
| <b>Fluidez</b>                                                        |                                  |                     |                                     |
| Viscosidade a 40°C [mm²/s cSt]                                        | 2,5 a 5,5                        | NBR10441            | D445                                |
| Ponto de Entupimento de Filtro à Frio [°C]                            | (5)                              | NBR14747            | D6371                               |
| <b>Combustão</b>                                                      |                                  |                     |                                     |
| Número de Cetano, min.                                                | 42                               |                     | D613                                |
| Resíduos de Carbono, máx. [% massa]<br>(nos 10% finais da destilação) | 0,25                             | NBR14318            | D524                                |
| Cinzas, máx. [% massa]                                                | 0,020                            | NBR9842             | D482                                |
| <b>Corrosão</b>                                                       |                                  |                     |                                     |
| Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C, máx.                               | 1                                | NBR14359            | D130                                |
| <b>Contaminantes</b>                                                  |                                  |                     |                                     |
| Água e Sedimentos, máx. [% volume]                                    | 0,05                             | NBR14647            | D1796                               |

FONTE: Portaria n. 310, de 27 de dezembro de 2001. Estabelece as especificações para comercialização de óleo diesel automotivo em todo o território nacional e define obrigações dos agentes econômicos sobre o controle de qualidade do produto. **Agência Nacional do Petróleo – ANP**. Publicada no DOU em 28 dez. 2001. Republicada no DOU em 16 ago. 2002 e 16 set. 2001. [32]

A Tabela 3.4 apresenta uma proposta de especificação preliminar para o biodiesel, apresentada em 2002 no Seminário Internacional de Biodiesel, além da especificação do Biodiesel B100 – Norma ASTM PS121/99 para comparação.

Devido às particularidades do biodiesel, são consideradas também na determinação do padrão as seguintes características [13][14][15]:

- teor de mono, di e triglicerídeos; teor de glicerina total, que inclui a glicerina ligada e a glicerina livre; teor de glicerina livre (necessários para assegurar a reação completa dos reagentes);



- Índice de Iodo máximo. Este índice varia com o tipo de óleo vegetal empregado na fabricação do biodiesel. Não deve exceder 135, a fim de evitar a formação de depósitos de carbono nos motores. Em relação ao diesel convencional, os ésteres de óleos vegetais possuem elevado índice de iodo, visto que o índice de Iodo do diesel convencional é igual a 10 (aproximadamente).

TABELA 3.4 – ESPECIFICAÇÃO DO BIODIESEL

| CARACTERÍSTICAS                              | PROPOSTA PRELIMINAR | BIODIESEL B100<br>(ASTM PS121/99) |        |
|----------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------|
|                                              |                     | Limites                           | Método |
| <b>Composição</b>                            |                     |                                   |        |
| Enxofre Total, máx. [% massa]                | 0,001               | 0,05                              | D2622  |
| <b>Volatilidade</b>                          |                     |                                   |        |
| Destilação (95% vol., recuperado, máx.) [°C] | 360,0               |                                   |        |
| Massa Específica a 20°C [kg/m³]              | 850 – 900           |                                   |        |
| Ponto de Fulgor, min. [°C]                   | 100                 | 100                               | D93    |
| <b>Fluidez</b>                               |                     |                                   |        |
| Viscosidade a 40°C [mm²/s cSt]               | 2,5 a 5,5           | 1,9 a 6,0                         | D445   |
| Ponto de Névoa, máx. [°C]                    | 0                   | ANOTAR                            | D2500  |
| <b>Combustão</b>                             |                     |                                   |        |
| Número de Cetano, min.                       | 45                  | 40                                | D613   |
| Resíduos de Carbono, máx. [% massa]          | 0,05                | 0,05                              | D4530  |
| Cinzas, máx. [% massa]                       | 0,02                | 0,02                              | D874   |
| <b>Corrosão</b>                              |                     |                                   |        |
| Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C, máx.      | 1                   | 3                                 | D130   |
| <b>Contaminantes</b>                         |                     |                                   |        |
| Água e Sedimentos, máx. [% volume]           | 0,05                | 0,05                              | D2709  |
| <b>Particularidades do Biodiesel</b>         |                     |                                   |        |
| Acidez, máx. [mg KOH/g]                      | 0,8                 | 0,8                               | D664   |
| Glicerina Livre, máx. [% massa]              | 0,02                | 0,02                              |        |
| Glicerina Total, máx. [% massa]              | 0,25                | 0,024                             | D6584  |
| Teor de Álcool, máx. [% massa]               | 0,1                 |                                   |        |
| Monoglicerídeos, máx. [% massa]              | 0,8                 |                                   |        |
| Diglicerídeos, máx. [% massa]                | 0,2                 |                                   |        |
| Triglicerídeos, máx. [% massa]               | 0,2                 |                                   |        |
| Teor de Metais Alcalinos, máx. [mg/kg]       | 10                  |                                   |        |
| Teor de Fósforo [% massa]                    | 10                  |                                   |        |

FONTE: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIESEL. Curitiba, out. 2002. [15]

### 3.3.2 A INFLUÊNCIA DOS REAGENTES NO BIODIESEL

Entre os reagentes, o que mais interfere nas características finais do biodiesel é o óleo vegetal, pois o tipo de álcool empregado na produção, embora tenha grande influência no processo de transesterificação, não altera de forma significativa as características finais do combustível [13]. A influência que o tipo de óleo vegetal exerce sobre o biodiesel está relacionada ao grau de insaturação do óleo vegetal utilizado. Os óleos vegetais são classificados, quanto ao grau de insaturação, em três grupos distintos: os óleos do tipo saturado, os óleos de insaturação intermediária e os óleos polinsaturados [26]. A Tabela 3.5 apresenta a composição química de alguns tipos de óleos vegetais.

Os óleos do tipo saturado, extraídos comumente das amêndoas de palmáceas como babaçu, macaúba, dendê, entre outros, são constituídos, sobretudo por glicerídeos derivados do ácido láurico. Os óleos de insaturação intermediária são constituídos principalmente por glicerídeos derivados do ácido oléico e do ácido palmítico, ambos representando mais de 55% da mistura, como os óleos de piqui e de buriti. Os óleos polinsaturados são constituídos, sobretudo, por glicerídeos do ácido linoléico e do ácido linolênico, a exemplo dos óleos de soja, algodão e linhaça [26].

TABELA 3.5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ÓLEOS VEGETAIS

| TIPOS DE ÓLEOS         | COMPOSIÇÃO (% em massa) |                 |                 |                 |              |                 |                  |        |
|------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------|--------|
|                        | Ácido Láurico           | Ácido Mirístico | Ácido Palmítico | Ácido Estéarico | Ácido Oléico | Ácido Linoléico | Ácido Linolênico | Outros |
| Soja <sup>(1)</sup>    | 0,1                     | 0,1             | 10,2            | 3,7             | 22,8         | 53,7            | 8,6              | 0,8    |
| Algodão <sup>(1)</sup> | 0,1                     | 0,7             | 20,1            | 2,6             | 19,2         | 55,2            | 0,6              | 1,5    |
| Côco <sup>(1)</sup>    | 46,5                    | 19,2            | 9,8             | 3,0             | 6,9          | 2,2             | -                | 12,4   |
| Linhaça <sup>(2)</sup> | -                       | -               | 5,0             | 3,5             | 13,0         | 17,5            | 60,7             | 0,3    |
| Babaçu <sup>(2)</sup>  | 41,0                    | 16,2            | 9,4             | 3,4             | 14,2         | 2,5             | -                | 13,3   |
| Macaúba <sup>(2)</sup> | 43,6                    | 8,5             | 5,3             | 2,4             | 25,5         | 3,3             | -                | 11,4   |
| Dendê <sup>(2)</sup>   | 46,9                    | 14,1            | 8,8             | 1,3             | 18,5         | 0,7             | -                | 9,7    |
| Buriti <sup>(2)</sup>  | -                       | -               | 16,3            | 1,3             | 79,2         | 1,4             | 1,3              | 0,5    |
| Piqui <sup>(2)</sup>   | -                       | -               | 34,4            | 1,8             | 57,4         | 2,8             | 1,0              | 2,6    |

FONTES: (1) MA, F. & HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v.70, p.1-15, 1999. [10]

(2) Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985. [26]

As características do combustível que mais sofrem influência da composição química do óleo vegetal empregado são: o ponto de fulgor, o número de cetano, a viscosidade, o índice de iodo e os pontos de névoa e fluidez. Os ésteres, metílicos ou etílicos, originários dos óleos do tipo saturado apresentam acentuada fluidez e índice de cetano superior a 60, assegurando uma boa qualidade de combustão. Os ésteres dos óleos de insaturação intermediária têm, em geral, elevado número de cetano e índice de Iodo dentro da faixa de especificação (< 135). Os ésteres derivados dos óleos vegetais polinsaturados possuem índice de cetano mais baixo que os demais óleos e elevado índice de iodo [14][26]. A Tabela 3.6 apresenta algumas características dos ésteres de óleos vegetais.

TABELA 3.6 – PROPRIEDADES DOS ÉSTERES DE ÓLEOS VEGETAIS

| COMBUSTÍVEL                               | PROPRIEDADES            |                  |                                                |                        |                |
|-------------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------------------------|------------------------|----------------|
|                                           | Ponto de Fulgor<br>(°C) | Número de Cetano | Viscosidade a 40°C<br>[mm <sup>2</sup> /s cSt] | Ponto de Névoa<br>(°C) | Índice de Iodo |
| Biodiesel – Especificação <sup>(1)</sup>  | > 100                   | > 45             | 2,5 a 5,5                                      | < 0                    | < 135          |
| Éster Metílico de Soja <sup>(2)</sup>     | 131                     | 50,9             | 4,08                                           | -0,5                   | 133,2          |
| Éster Etílico de Soja <sup>(2)</sup>      | 160                     | 48,2             | 4,41                                           | -1                     | 123            |
| Éster Butílico de Soja <sup>(2)</sup>     | 158                     | 51,7             |                                                |                        |                |
| Éster Metílico de Colza <sup>(2)</sup>    | 170                     | 52,9             | 4,83                                           | -4,0                   | 97,4           |
| Éster Etílico de Colza <sup>(2)</sup>     | 185                     | 64,9             | 6,71                                           | -2                     | 99,7           |
| Éster Metílico de Girassol <sup>(2)</sup> | 183                     | 49,0             |                                                |                        | 125,5          |
| Éster Metílico de Algodão <sup>(2)</sup>  | 110                     | 51,2             |                                                |                        | 105,7          |
| Éster Etílico de Milho <sup>(3)</sup>     | 196                     |                  | 5,4                                            |                        |                |
| Éster Metílico de Babaçu <sup>(3)</sup>   |                         |                  | 3,43                                           | -6,0                   | 16,2           |
| Éster Etílico de Babaçu <sup>(3)</sup>    |                         | 65,0             | 3,93                                           | -6,0                   | 15,8           |
| Éster Metílico de Mamona <sup>(3)</sup>   |                         |                  | 17,02                                          | -6,0                   | 84,7           |
| Éster Etílico de Mamona <sup>(3)</sup>    | 208                     |                  | 19,75                                          | -6,0                   | 81,5           |
| Éster Metílico de Dendê <sup>(3)</sup>    |                         |                  | 6,25                                           | 11                     | 57,0           |
| Éster Etílico de Dendê <sup>(3)</sup>     |                         |                  | 6,39                                           | 6                      | 54,9           |
| Éster Metílico de Piqui <sup>(3)</sup>    |                         | 60,0             | 6,54                                           | 15                     | 52,0           |
| Éster Etílico de Piqui <sup>(3)</sup>     | 186                     |                  | 6,63                                           | 8                      | 50,1           |

FONTES: (1) SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIESEL. Curitiba, out. 2002. [15]

(2) GRABOSKI, M. S. & MCCORMICK, R. L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.24, p. 125-164, 1998.[14]

(3) Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985.[26]

De maneira geral, os ésteres de óleos vegetais possuem propriedades compatíveis com as do diesel convencional, atendendo às especificações [13]. Entretanto, alguns destes ésteres, em especial os derivados do óleo de mamona, apresentam viscosidade elevada, o que pode vir a comprometer a qualidade da combustão. Também, para os ésteres de dendê e piqui, o ponto de névoa, que determina o limite inferior de temperatura de utilização do combustível, apresenta valores relativamente elevados, inviabilizando o uso destes combustíveis em regiões de temperaturas amenas.

### 3.4 PRODUÇÃO DE BIODIESEL

#### 3.4.1 O PROCESSO DE PRODUÇÃO

O processo de produção consiste basicamente em introduzir a carga de óleo vegetal em um reator, onde é submetido ao ataque por um álcool, em excesso, na presença de um catalisador. A Figura 3.8 mostra o fluxograma da produção de um éster etílico de soja. Após a reação de transesterificação, o álcool não consumido deve ser destilado e reutilizado no processo. Em seguida, a glicerina, subproduto deste processo, deve ser separada do éster por centrifugação. Por fim, a mistura de ésteres deve ser lavada com água quente, a fim de eliminar traços de catalisador, de sabão ou de glicerina residual [26].

Os equipamentos necessários são semelhantes aos utilizados nas usinas de extração de óleos vegetais, como por exemplo: reatores, trocadores de calor, bombas de alimentação e de descarga, tanques de decantação, centrífugas, bombas de vácuo, destiladores e condensadores, filtros e outros [26].

Nos capítulos 4 e 5, o sistema de produção do éster etílico de soja será submetido respectivamente às análises de Exergia e Emergia. No capítulo 6, este sistema produtivo será avaliado através da Metodologia Integrada de Análise Ambiental. O objetivo principal é verificar a sustentabilidade deste processo, considerando a integração entre o sistema econômico (agrícola e industrial) e os sistemas ecológicos envolvidos.

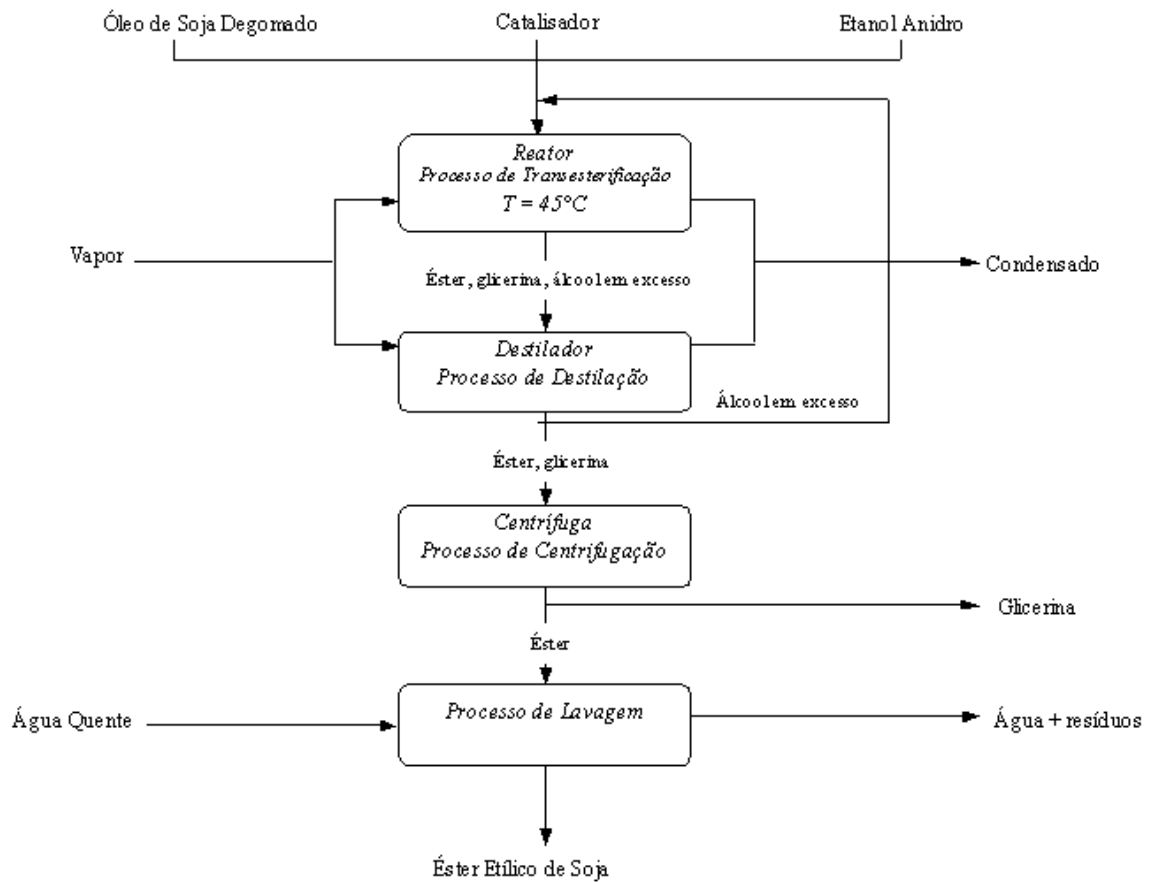


Figura 3.8: Fluxograma do processo de produção de ésteres etílicos [26]

### 3.4.2 A REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

Os aspectos mais importantes para o processo de transesterificação são: o tipo de álcool, a relação molar entre o álcool e o óleo vegetal, a temperatura da reação, o tipo e a quantidade de catalisador e a agitação da mistura [3][12].

Como mencionado anteriormente, o álcool etílico e o metílico são os mais empregados na produção do biodiesel. Quando o etanol é utilizado no processo de transesterificação, uma quantidade maior de álcool, em relação ao metanol, é necessária [25]. A razão estequiométrica para a transesterificação é de 3 mols de álcool para um mol de ácido graxo, produzindo 3 mols de éster, o biodiesel, e um mol de glicerol [3][10][14].

A concentração de álcool tem efeito considerável no rendimento final da reação. Uma possibilidade para aumentar o rendimento, obtendo a maior quantidade possível de ésteres, é utilizar álcool em excesso. A adição de álcool na reação não pode ser feita à vontade, pois o

mesmo interfere na separação do glicerol além de ser necessário sua retirada posterior. Um valor limite seria 100% de excesso de álcool, ou seja, uma relação molar de 6:1 [10][12].

A temperatura é a variável que mais influencia a velocidade da reação. A temperatura da reação de transesterificação está relacionada ao tipo de álcool utilizado, visto que, normalmente, a reação é conduzida a baixas temperaturas, tendo como limite superior a temperatura do ponto de ebulição do álcool utilizado à pressão atmosférica [12].

Outra variável importante para obter bons rendimentos na reação de transesterificação é o tipo de catalisador utilizado e a quantidade. A reação pode ser ácida ou alcalina, sendo que os catalisadores mais utilizados são os alcalinos: o hidróxido de Potássio (KOH) e o hidróxido de Sódio (NaOH). Sua quantidade em massa vai depender da acidez do óleo de origem, podendo variar de 0,5 a 2,5 gramas para cada 100ml de óleo. Na produção industrial os catalisadores ácidos são evitados, pois corroem os equipamentos utilizados [3][12].

A agitação da mistura de óleo e álcool favorece o processo de obtenção do biodiesel. No início da transesterificação os reagentes não se misturam, formando um sistema líquido bifásico. Nesta fase, é necessário que os reagentes, óleo vegetal e álcool, sejam agitados para melhorar a difusão entre as fases. A medida em que o éster é produzido, passa a agir como um solvente para os reagentes, formando um sistema monofásico. Portanto, esta variável tem relevância somente no início da reação de transesterificação [12].

### 3.5 BIBLIOGRAFIA

- [1] BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA. **Relatório de Perspectivas do Meio Ambiente Mundial – GEO Brasil 2002**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 03 ago. 2003;
- [2] RIBEIRO, S. K. Vantagem ambiental a nível internacional da utilização da biomassa nos transportes urbanos, 1999. In: **Série de Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas** – Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. 1 CD-ROM;
- [3] RABELO, I. D. **Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura**. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná;
- [4] THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia do Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001. Cap. 1;
- [5] BRASIL. Resolução n. 251, de 12 de janeiro de 1999. Estabelece os critérios, procedimentos e limites máximos de opacidade da emissão de escapamento para avaliação do estado de manutenção dos veículos automotores do ciclo Diesel. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em 03 ago. 2003;
- [6] BRASIL. Agência Nacional do Petróleo – ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural 2002**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 24 jul. 2003;
- [7] NOGUEIRA, L. A. H. & PIKMAN, B. Biodiesel: novas perspectivas de sustentabilidade. **Informe Conjuntura & Informação**, ANP, n.19, p.1-4, ago. – out. / 2002;
- [8] BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT. Programa Brasileiro de Biocombustíveis - Rede Brasileira de Biodiesel;
- [9] ANDRADE, E. B. Uso do biodiesel a partir do etanol é solução estratégica para o Brasil. Disponível em: <<http://dabdoub-labs.com.br>>. Acesso em: 21 fev. 2003. Entrevista concedida ao Jornal da Cana, abr. 2002;
- [10] MA, F. & HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v.70, p.1-15, 1999;
- [11] OLIVEIRA, L. B. & COSTA, A. O. DA. Biodiesel: uma experiência de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <<http://www.ivig.coppe.ufrj.br/arquivos/biodiesel.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2003;

- [12]PIANOVSKI JÚNIOR, G. **Utilização de misturas de óleo diesel e ésteres etílicos de óleo de soja como combustíveis alternativos: análise do desempenho e do processo de combustão no motor diesel**. Curitiba, 2001. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná;
- [13]LANG, X. ; DALAI, A.K. ; BAKHSHI, N.N. ; REANEY, M.J. & HERTZ, P.B. Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils. **Bioresource Technology**, v.80, p.53-62, 2001;
- [14]GRABOSKI, M. S. & MCCORMICK, R. L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.24, p. 125-164, 1998;
- [15]SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIESEL. Curitiba, out. 2002. **Anais...** Disponível em: <<http://www.idealiza.com.br/workshops/biodiesel>> Acesso em: 05 abr. 2003;
- [16]DABDOUB, M. A Produção de Biodiesel é Tecnicamente e Economicamente Viável? In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra. 2 CD-ROM;
- [17]LOJUDICE, M. Brasil já lucra com crédito de carbono. São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://dabdoub-labs.com.br>>. Acesso em 24 jul. 2003;
- [18]FRANKE, B. & REINHARDT, G. Environmental impacts of biodiesel use. In: **BioEnergy '98: Expanding BioEnergy Partnerships**;
- [19]FERRES, J. D. Viabilidade da produção do biodiesel no Brasil empregando óleo de soja. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra. 2 CD-ROM;
- [20]SILVA, O. C. Guia de Investimento em Energias Renováveis no Brasil – Óleos Vegetais, 1998. In: **Série de Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas** – Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. 1 CD-ROM;
- [21]PASTURA, N. M. R.; GARÇÃO, C. E.; SCOFIELD, C. F.; ARAÚJO, L. R. R. DE.; MARTINES, M. A. U.; NUNES, P.P.; BORGES, L. E. P.; OLIVEIRA, P. G. P. DE; GONZALEZ, W. DE A. Biodiesel no exercito brasileiro: quatro décadas de pesquisa. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Trabalhos. 2 CD-ROM;
- [22]LAURINDO, J. C. Caracterização Preliminar do Biodiesel Brasileiro. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra. 2 CD-ROM;
- [23]BRASIL. Projeto de Lei n. 6983, de 12 de junho de 2002 (PL– 6983/2002). Institui o Programa Biodiesel. Obrigando a implementação do biodiesel, mistura de no mínimo 5% de éster etílico de óleos vegetais. Autor: Antônio Carlos Mendes Thame. **Câmara dos Deputados**. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br>>. Acesso em: 05 ago. 2003;



- [24]BRASIL. Projeto de Lei n. 526, de 27 de março de 2003 (PL– 526/2003). Regulamenta o uso do Biodiesel no Brasil. Tramitando em conjunto com PL – 6983/2002. Autor: Rubens Otoni. **Câmara dos Deputados**. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br>>. Acesso em: 05 ago. 2003;
- [25]PARENTE, E. J. DE S. Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado. Disponível em: <<http://www.tecbio.com.br>>. Acesso em 24 jul. 2003;
- [26]BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985. 364p.;
- [27]BOCCARDO, R. C. **Panorama Atual do Biodiesel**. Curitiba, 2003. 68f. Monografia (Especialização em Motores e Combustíveis) – Programa Brasileiro de Formação em Motores e Combustíveis – PUC-PR, CEFET-PR, UFPR e UFSC;
- [28]BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Obtenção de combustível de óleo vegetal a nível de propriedade rural**. Brasília, STI/CIT, 1985. 98p.;
- [29]DABDOUB, M. J.; DABDOUB, V. B.; HURTADO, G.R.; AGUIAR, F. B.; BATISTA, A.C.F.; HURTADO, C.R. & FIGUEIRA, A.C.B. Glicerina: tratamento e purificação de um subproduto do Biodiesel. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Trabalhos. 2 CD-ROM;
- [30]**PETRÓLEO e derivados**: noções básicas. Rio de Janeiro: IBP, 1989. Cap. 6;
- [31]BOCCARDO, R. C. & VELÁSQUEZ, J. A. Determinação do número de cetano e do teor de enxofre em misturas biodiesel/diesel. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Trabalhos. 2 CD-ROM;
- [32]BRASIL. Portaria n. 310, de 27 de dezembro de 2001. Estabelece as especificações para comercialização de óleo diesel automotivo em todo o território nacional e define obrigações dos agentes econômicos sobre o controle de qualidade do produto. **Agência Nacional do Petróleo – ANP**. Publicada no DOU em 28 dez. 2001. Republicada no DOU em 16 ago. 2002 e 16 set. 2001;

## 4 ANÁLISE DE EXERGIA APLICADA AO BIODIESEL

### 4.1 INTRODUÇÃO

A análise de exergia é utilizada para otimizar sistemas industriais. Um sistema industrial qualquer é composto por uma série de equipamentos, com funções definidas dentro do processo produtivo, que interagem entre si e com suas vizinhanças por meio de transferências de massa e de energia, além de provocar alterações nos estados termodinâmicos dos fluxos de matéria que passam através deles.

Neste Capítulo, a análise de exergia é aplicada na avaliação de um sistema produtivo de éster etílico de soja, que utiliza como matéria-prima o óleo de soja degomado e o etanol anidro. Este sistema é constituído por quatro processos: transesterificação (produção do biodiesel), destilação (remoção do excesso de álcool), centrifugação (separação da glicerina) e lavagem (retirada de resíduos). A Figura 4.1 mostra os limites do sistema (volume de controle) e os respectivos fluxos de entrada e saída de matéria.

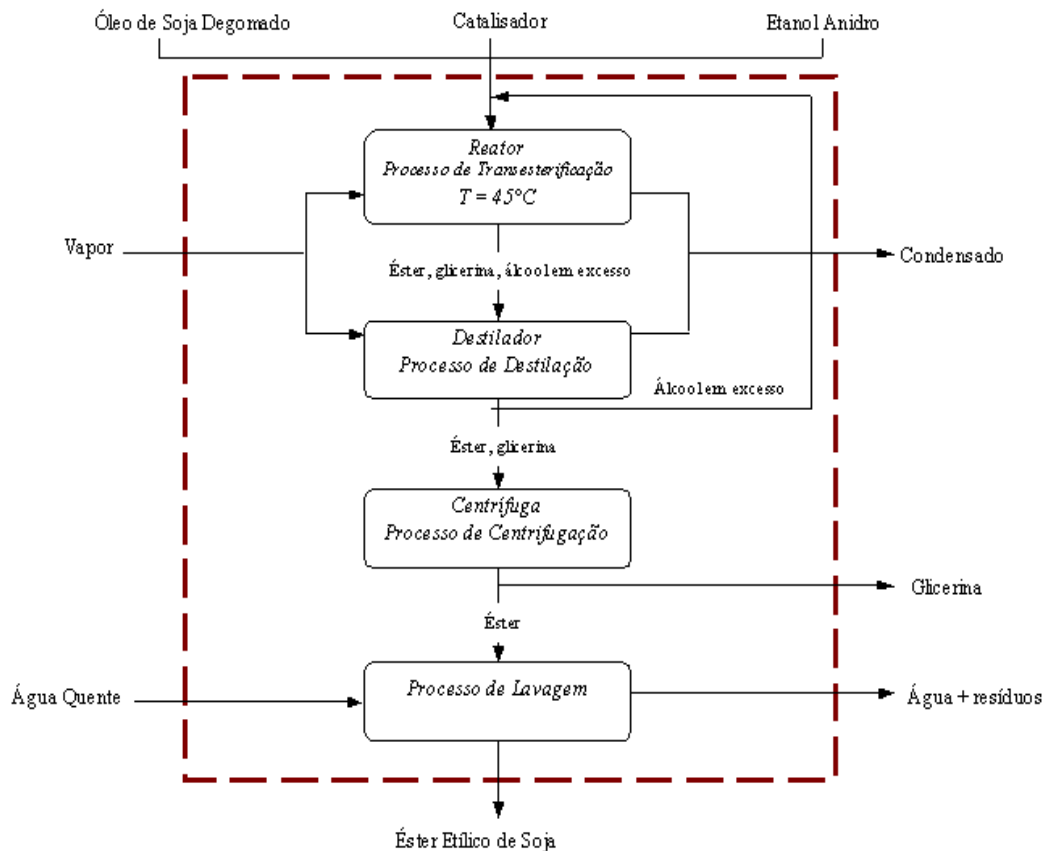


Figura 4.1: Limites do sistema de produção de biodiesel

## 4.2 CONCEITOS DE TERMODINÂMICA

### 4.2.1 O AMBIENTE DE REFERÊNCIA

Na avaliação de um sistema por meio de exergia deve ser considerado, além do sistema de interesse, um ambiente de referência. O ambiente de referência para avaliação de exergia consiste em um reservatório térmico (temperatura constante), mecânico (pressão constante) e químico (composição constante) [1][2].

O ambiente de referência adotado neste estudo é aquele definido por Szargut, Morris & Steward [3] e utiliza a temperatura  $T_0 = 298,15\text{K}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) e a pressão  $p_0 = 1\text{atm}$  ( $101,325\text{ kPa}$ ). Em relação à composição química, o ambiente de referência é considerado como sendo constituído por um grupo de substâncias  $i$ , cujas concentrações molares ( $\gamma_{0,i}$ ) reproduzem, tão próximo quanto possível, o ambiente natural.

### 4.2.2 A EXERGIA

Considere-se um sistema que se encontra em um estado definido pela temperatura  $T$ , pela pressão  $p$  e cuja composição é dada pelas frações molares  $\gamma_i$ . A exergia deste sistema, em relação ao ambiente de referência, consiste na soma das parcelas de exergia termomecânica e química. A parcela de exergia denominada termomecânica corresponde à máxima quantidade de trabalho útil que poderia ser obtida permitindo que o sistema interaja com o ambiente de referência até atingir o equilíbrio térmico e mecânico mantendo, porém, a mesma composição química que tinha no estado inicial. A parcela referente à exergia química consiste na exergia que poderia ser obtida permitindo ao sistema, já em equilíbrio térmico e mecânico, atingir também o equilíbrio químico com o ambiente de referência [1][2].

A exergia total associada a um sistema pode, portanto, ser expressa da seguinte maneira [1]:

$$Ex = (E - U_0) + S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_i n_i (\mu_i - \mu_{i,0}) \quad [J] \quad (4.1)$$

onde:  $E$  é energia,  $U$  é energia interna,  $S$  é entropia,  $T$  é temperatura,  $V$  é volume,  $p$  é pressão,  $n$  é número de moles e  $\mu$  é o potencial químico. O subscrito  $0$  indica as condições do estado de referência, enquanto que o subscrito  $i$  identifica cada uma das espécies químicas presentes no sistema.

### 4.2.3 A EXERGIA DE FLUXO

Da mesma forma que a energia, a exergia pode ser transferida através das fronteiras de um sistema, acompanhando as transferências de calor, de trabalho e de escoamento de massa [1]. A exergia associada aos fluxos de matéria de entrada ou de saída de um sistema depende do estado termodinâmico e da composição química destes fluxos e não dos processos empregados em sua produção [4]. Esta exergia é obtida através da soma das exergias termomecânica ( $ex^{TM}$ ) e química ( $ex^{ch}$ ) das substâncias que constituem estes fluxos.

Quando um fluxo de matéria escoar através das fronteiras de um sistema, existe uma transferência de exergia associada à massa que forma o fluxo e, também, uma que acompanha o trabalho de escoamento. Assim, a exergia termomecânica de um fluxo de matéria pode ser calculada através da Equação 4.2, que leva em conta estas duas componentes [1]:

$$ex^{TM} = (h - h_0) - [T_0 (s - s_0)] \quad \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (4.2)$$

onde:  $h$  e  $s$  representam a entalpia e a entropia específica dos fluxos nas condições  $[T; p]$  e  $h_0$  e  $s_0$  representam os valores destas propriedades no estado inativo  $[T_0; p_0]$ .

A exergia química dos fluxos de matéria que escoam através das fronteiras do sistema pode ser obtida em tabelas que contenham a *exergia química padrão* das substâncias que constituem estes fluxos. Caso a exergia química de uma determinada substância não esteja disponível em tais tabelas, devem ser empregadas as formulações específicas para o cálculo da exergia química. Szargut, Morris & Steward [3] propõem para o cálculo da exergia química dos combustíveis líquidos a seguinte equação:

$$ex^{ch} = \beta (PCS - 9L_w z_H) + ex_w^{ch} z_w \quad \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (4.3)$$

onde:  $PCS$  é o poder calorífico superior do combustível;  $L_w$  e  $ex_w^{ch}$  são, respectivamente, a entalpia de vaporização e a exergia química da água;  $z_i$  representa a fração mássica de cada substância  $i$  que compõe o combustível e  $\beta$  é obtido através da seguinte equação:

$$\beta = 1,0401 + 0,1728 \frac{z_H}{z_C} + 0,0432 \frac{z_O}{z_C} + 0,2169 \frac{z_S}{z_C} \left( 1 - 2,0628 \frac{z_H}{z_C} \right) \quad (4.4)$$

#### 4.2.4 AS EQUAÇÕES DE BALANÇO DE MASSA E DE EXERGIA PARA VOLUMES DE CONTROLE

A equação de Balanço de Massa tem a seguinte forma [1]:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_e m_e - \sum_s m_s \quad \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (4.5)$$

Esta equação leva em conta uma variação de massa em um volume de controle com várias entradas e saídas. Os valores de  $m_e$  e  $m_s$  designam respectivamente as vazões em massa das correntes que entram e saem do sistema em um determinado instante  $t$ . O termo  $dm_{VC}/dt$  representa a taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle no instante  $t$ . Em condições de regime permanente,  $dm_{VC}/dt = 0$ .

O Balanço de Exergia para o Volume de Controle considerado pode ser expresso da seguinte maneira [1]:

$$\frac{dEx}{dt} = \sum_i Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{fronteira},i}} \right) - \left[ W - p_0 \frac{dV}{dt} \right] + \sum_e m_e ex_{f,e} - \sum_s m_s ex_{f,s} - I \quad \left[ \frac{kJ}{s} \right] \quad (4.6)$$

onde:

$\frac{dEx}{dt}$  representa a taxa de variação de exergia dentro do sistema no instante  $t$ ;

$\sum_i Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{fronteira},i}} \right)$  representa a taxa de transferência de exergia associada à transferência de calor;

$\left[ W - p_0 \frac{dV}{dt} \right]$  representa a taxa de transferência de exergia associada ao trabalho;

$\sum m_e ex_{f,e}$  representa a taxa de transferência de exergia associada aos fluxos de entrada do sistema;

$\sum m_s ex_{f,s}$  representa a taxa de transferência de exergia associada aos fluxos de saída do sistema;

$I$  representa a taxa de destruição de exergia no sistema (taxa de irreversibilidade).

O potencial de impacto de um determinado sistema industrial sobre o meio ambiente pode ser mensurado através da destruição e das perdas de exergia deste sistema. A destruição de exergia (I) não provoca impacto ambiental direto. Entretanto, quando há elevada destruição de exergia em um sistema, a tendência é que esta destruição seja compensada pelo aumento do consumo de insumos exergéticos, promovendo, assim, a degradação de recursos naturais [5][6]. Por outro lado, o impacto das perdas de exergia sobre o meio ambiente é direto, visto que as perdas de exergia estão relacionadas aos fluxos residuais despejados pelo sistema na natureza. Estes resíduos industriais podem prejudicar o meio ambiente, promovendo a degradação dos ecossistemas nos quais são lançados. O potencial de prejuízo ao meio ambiente destes resíduos pode ser mensurado através da exergia das substâncias que os constituem [5][7].

### 4.3 MEMORIAL DE CÁLCULO

A quantidade de insumos necessários para produzir uma tonelada de éster etílico de soja está apresentada na Tabela 4.1. Além do biodiesel, são produzidos, também, 121 kg de glicerina, dos quais 104 kg são recuperados (sub-produto do sistema) [8]. O restante (glicerina residual) é separado do biodiesel, durante o processo de lavagem do combustível, e constitui uma perda.

TABELA 4.1– QUANTIDADE NECESSÁRIA DE INSUMOS POR TONELADA DE BIODIESEL

| INSUMOS               | QUANTIDADE POR TONELADA DE BIODIESEL |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Óleo de Soja Degomado | 965 kg                               |
| Etanol Anidro         | 156 kg                               |
| Hidróxido de Sódio    | 14,98 kg                             |
| Água (*)              | 1250 kg                              |
| Vapor                 | 706 kg                               |
| Energia Elétrica      | 34,5 kWh                             |

FONTE: FERRES, J. D. Viabilidade da produção do biodiesel no Brasil empregando óleo de soja. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra.[8]

(\*) BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985. 364p.[9]

Os fluxos de matéria e de energia que compõem o sistema produtivo do biodiesel estão esquematizados na Figura 4.2. A definição dos estados termodinâmicos destes fluxos é descrita na Tabela 4.2.

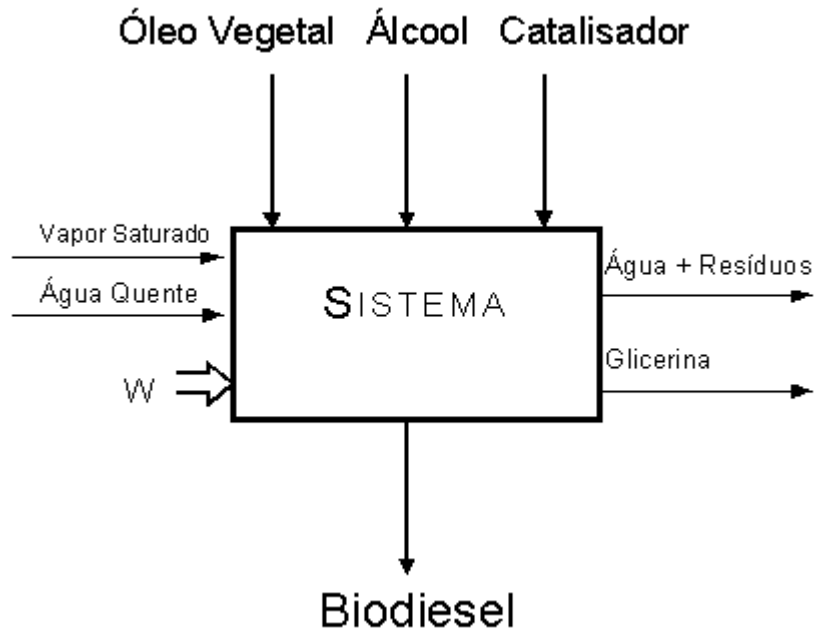


Figura 4.2: Diagrama esquemático dos fluxos de matéria e energia do sistema

A exergia termomecânica dos fluxos de entrada de vapor saturado e de água quente, que encontram-se fora das condições  $[T_0; p_0]$ , foram obtidos através da Equação 4.2.

TABELA 4.2 – ESTADO TERMODINÂMICO DOS FLUXOS DE MATÉRIA DO SISTEMA

|         | FLUXOS                      | TEMPERATURA         | PRESSÃO                |
|---------|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| Entrada | Óleo de Soja Degomado       | $T_0$               | $p_0$                  |
|         | Etanol Anidro ( $C_2H_6O$ ) | $T_0$               | $p_0$                  |
|         | Catalisador (NaOH)          | $T_0$               | $p_0$                  |
|         | Vapor Saturado              | $120^\circ\text{C}$ | $p_{\text{Saturação}}$ |
|         | Água Quente                 | $50^\circ\text{C}$  | $p_0$                  |
| Saída   | Éster Etilíco de Soja       | $T_0$               | $p_0$                  |
|         | Glicerina ( $C_3H_8O_3$ )   | $T_0$               | $p_0$                  |
|         | Água e Resíduos             | $T_0$               | $p_0$                  |

Os valores de exergia química de  $1,87 \times 10^3$  kJ/kg para o catalisador e 49,96 kJ/kg para a água, foram obtidos em tabelas de *exergia química padrão* [3]. Os demais valores de exergia química (éster etílico de soja, óleo de soja, álcool etílico e glicerina) foram calculados através das Equações 4.3 e 4.4. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.3. No cálculo das frações mássicas ( $z$ ) do óleo de soja e do éster etílico de soja foram adotadas as composições definidas por Ma & Hanna [10] e Pianovski Jr. [11], respectivamente.

O valor do poder calorífico superior ( $PCS$ ) de cada componente foi obtido através da seguinte equação [4]:

$$PCS = 102720 + (27360 \times h) - (32320 \times o) + (19890 \times n) + (85740 \times s) \left[ \frac{\text{cal}}{\text{mol C}} \right] \quad (4.7)$$

A equação acima considera que a fórmula molecular dos combustíveis é expressa na forma  $\text{CH}_h\text{O}_o\text{N}_n\text{S}_s$ , ou seja, com referência a um mol de carbono presente no combustível. Assim, os coeficientes ( $h, o, n, s$ ) representam o número de átomos de cada elemento por átomo de carbono na molécula de combustível, sendo calculados da seguinte forma [4]:

$$h = \frac{z_H}{z_C} \times \frac{12,011}{1,008} ; \quad o = \frac{z_O}{z_C} \times \frac{12,011}{15,999} ; \quad n = \frac{z_N}{z_C} \times \frac{12,011}{14,007} ; \quad s = \frac{z_S}{z_C} \times \frac{12,011}{32,064} \quad (4.8)$$

Ainda, para obter os valores de poder calorífico superior ( $PCS$ ) em unidades do SI, foram utilizados os seguintes fatores de conversão:

$$f_C = \frac{1000}{12,011} \times z_C \left[ \frac{\text{mol C}}{\text{kg}} \right] \quad \text{e} \quad f_{\text{cal} \rightarrow \text{kJ}} = 4,1868 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{cal}} \right].$$

TABELA 4.3 – RESULTADOS OBTIDOS PARA OS COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

| ITEM                  | $z_C$   | $z_H$   | $z_O$   | $z_N$  | $z_S$  | PCS     | $\beta$ | $\text{ex}^{\text{ch}}$ |
|-----------------------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|-------------------------|
|                       | (%)     | (%)     | (%)     | (%)    | (%)    | [kJ/kg] |         | [kJ/kg]                 |
| Óleo de Soja          | 76,7957 | 11,6758 | 11,5285 | 0,0000 | 0,0000 | 39791   | 1,7229  | 39937                   |
| Álcool Etílico        | 52,1739 | 13,0435 | 34,7826 | 0,0000 | 0,0000 | 30562   | 1,1121  | 30800                   |
| Éster Etílico de Soja | 76,7277 | 11,7373 | 11,5350 | 0,0000 | 0,0000 | 39836   | 1,0730  | 39977                   |
| Glicerina             | 39,1231 | 8,7563  | 52,1207 | 0,0000 | 0,0000 | 19480   | 1,1363  | 19949                   |



A exergia total de cada fluxo de massa ( $ex_f$ ) que escoar através das fronteiras do sistema corresponde à soma das exergias termomecânica ( $ex^{TM}$ ) e química ( $ex^{ch}$ ) associadas a cada fluxo. A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para a exergia dos fluxos de massa de entrada e de saída do sistema, para cada tonelada de biodiesel produzido.

Aplicando as Equações de Balanço de Massa (4.5) e de Balanço de Exergia (4.6) e considerando o sistema em regime permanente ( $dm_{VC}/dt = 0$  ;  $dEx/dt = 0$ ) e que as fronteiras se encontram na temperatura de referência  $T_0$ , foram obtidos os seguintes resultados:

i. Destruição de exergia:  $I_{sistema} = 1,83 \times 10^6 \frac{kJ}{t_{biodiesel}}$  ;

ii. Perdas de exergia do sistema na forma de resíduos (água, glicerina residual e

traços de catalisador):  $Ex_{perdas} = 4,30 \times 10^5 \frac{kJ}{t_{biodiesel}}$  .

TABELA 4.4 – EXERGIA DOS FLUXOS DE MASSA DO SISTEMA POR TONELADA DE BIODIESEL

| FLUXOS  |                          | $Ex^{Total}$<br>$[kJ/t_{biodiesel}]$ |
|---------|--------------------------|--------------------------------------|
| Entrada | Óleo de soja degomado    | $3,85 \times 10^7$                   |
|         | Álcool etílico anidro    | $4,80 \times 10^6$                   |
|         | Catalisador              | $2,81 \times 10^4$                   |
|         | Vapor saturado           | $7,85 \times 10^5$                   |
|         | Água quente              | $6,77 \times 10^4$                   |
| Saída   | Éster etílico de soja    | $4,00 \times 10^7$                   |
|         | Glicerina recuperada     | $2,07 \times 10^6$                   |
|         | Água de saída do sistema | $9,77 \times 10^4$                   |
|         | Catalisador              | $2,81 \times 10^4$                   |
|         | Glicerina residual       | $3,39 \times 10^5$                   |

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto maiores as quantidades de exergia destruída e de perdas de exergia, maior o potencial de prejuízo ambiental do sistema avaliado. As irreversibilidades do sistema de produção do éster etílico de soja são um pouco maiores que 4% da exergia consumida pelo

sistema. As perdas de exergia, associadas aos resíduos lançados na natureza, representam menos de 1% da exergia total utilizada pelo sistema para produzir o éster etílico de soja.

Considerando os valores das perdas e da destruição de exergia, aproximadamente 5% do total de insumos exergéticos, é possível afirmar que o sistema industrial de produção do éster etílico de soja possui um baixo potencial de prejuízo ao meio ambiente. No entanto, em virtude da análise não contabilizar o trabalho realizado pelos sistemas naturais, não é possível afirmar que os ecossistemas irão suportar a pressão imposta por este sistema industrial.

#### 4.5 BIBLIOGRAFIA

- [1] MORAN, M. J. & SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Cap.7 e 13;
- [2] BORGERT JR., J. A. **Otimização exergoeconômica de ciclos de absorção para geração de potência**. Curitiba, 2003. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Cap.2;
- [3] SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R. & STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. Hemisphere, New York, 1988. Cap. 1 e 3;
- [4] VALERO, A. & LOZANO, M. A. **Curso de Termoeconomía**. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. Julio, 1994. p. 38-39;
- [5] ROSEN, M. A. & DINCER, I. Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. **Exergy, an International Journal**, v.1, p.3-13, 2001;
- [6] WALL, G. & GONG, M. On exergy and sustainable development – Part1: Conditions and concepts. **Exergy, an International Journal**, v.1, n.3, p.128-145, 2001;
- [7] SEAGER, T. P. & THEIS, T. L. A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology. **Journal of Cleaner Production**, v.10, p.225-235, 2002;
- [8] FERRES, J. D. Viabilidade da produção do biodiesel no Brasil empregando óleo de soja. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra;
- [9] BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985. 364p;
- [10] MA, F. & HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v.70, p.1-15, 1999;
- [11] PIANOVSKI JÚNIOR, G. **Utilização de misturas de óleo diesel e ésteres etílicos de óleo de soja como combustíveis alternativos: análise do desempenho e do processo de combustão no motor diesel**. Curitiba, 2001. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

## 5 ANÁLISE DE ENERGIA APLICADA AO BIODIESEL

### 5.1 INTRODUÇÃO

O biodiesel é um combustível líquido produzido a partir de recursos renováveis que são repostos através do crescimento das espécies vegetais empregadas no processo produtivo. A matéria vegetal gerada através do processo de fotossíntese contém energia química, provinda da transformação energética da radiação solar. Esta energia química pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida através de algum processo em outras fontes energéticas mais adequadas, como por exemplo em biodiesel [1].

O biodiesel analisado neste estudo é um éster etílico de óleo de soja, obtido através da reação de óleo de soja degomado e de etanol anidro. A análise emergética considera todos os processos envolvidos na execução de um produto ou serviço e, portanto, toda a cadeia produtiva do biodiesel deve ser avaliada. As fases compreendidas no sistema de produção do biodiesel são: produção do etanol (fases agrícola e agroindustrial), produção do óleo de soja (fases agrícola e agroindustrial) e produção do éster por transesterificação (processo industrial).

### 5.2 PRODUÇÃO DE ÁLCOOL ETÍLICO

O processo de produção do etanol engloba as fases agrícola e agroindustrial, esquematizadas na Figura 5.1.

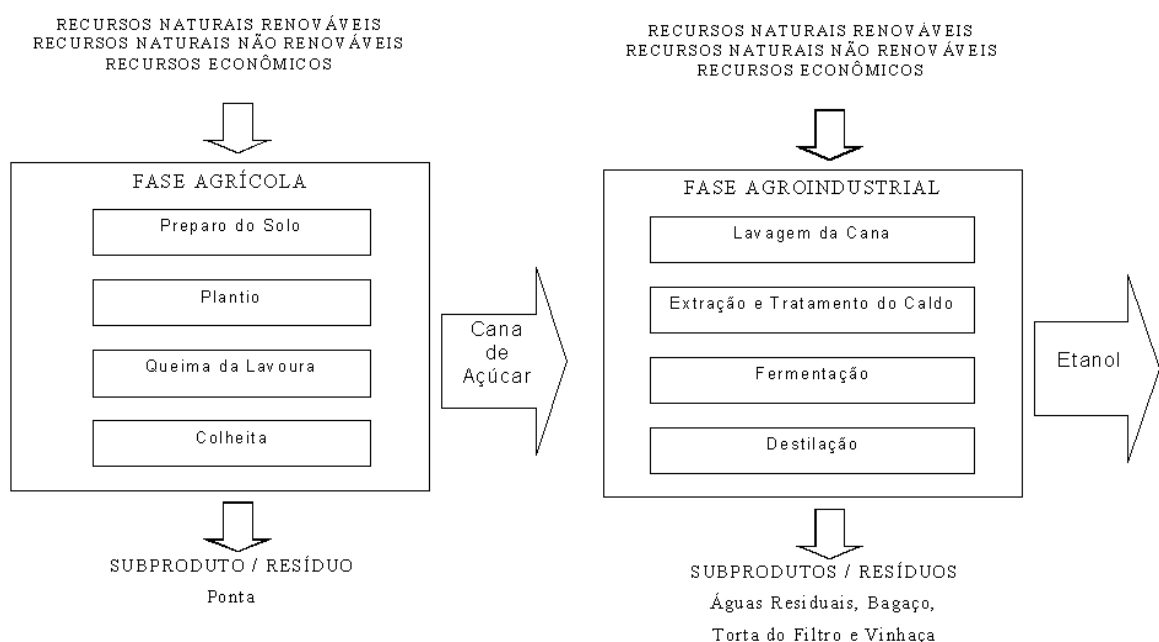


Figura 5.1: Processo de produção do etanol [4][6]

### 5.2.1 FASE AGRÍCOLA

A cana de açúcar é um dos principais recursos econômicos do setor rural Brasileiro. Atualmente, os canaviais ocupam uma área maior que cinco milhões de hectares. A produção, em 2003, foi de 385,41 milhões de toneladas de cana de açúcar, com produtividade média de 72,945 t/ha [2].

A atividade canavieira do Brasil é responsável por cerca de um milhão de empregos diretos. A fase agrícola emprega cerca de 511 mil trabalhadores e o restante está distribuído na agroindústria do açúcar e do álcool. A remuneração média do trabalhador empregado no corte manual da cana é pelo menos duas vezes maior que o salário mínimo nacional [3].

A cana de açúcar é uma planta da família das gramíneas. A haste principal da cana de açúcar, denominada colmo, é constituída de uma parte dura (casca e nós), que contém cerca de 15% do caldo, e de uma parte mole (medula), que contém 85% de todo o suco extraído. Necessita de solos férteis e profundos, de precipitação pluviométrica mínima de 1300 mm anuais e de uma temperatura entre 20° e 24°C, não tolerando geadas [1][4].

A cana de açúcar é produzida por safra. Como é cultivada nas regiões Centro-Sul e Norte-Nordeste, há dois períodos de safra por ano. Plantada, a cana demora de um a um ano e meio para poder ser colhida pela primeira vez. Em geral, logo após o primeiro corte, a cana rebrota e produz 4 ou 5 vezes, com produtividade entre 50 e 100 t/ha por ano, dependendo das práticas agrícolas adotadas. A agricultura tradicional da cana de açúcar envolve extenso uso da terra, monocultura, uso intensivo de fertilizantes, pesticidas e água [1][3][5].

O processo de produção da cana de açúcar envolve as seguintes etapas: preparo do solo, plantio e tratos culturais, queima da lavoura e colheita. A preparação do solo é considerada uma das principais tarefas da cultura da cana de açúcar, pois visa oferecer condições ótimas para a germinação e desenvolvimento da planta, abrir passagem na superfície do solo para facilitar a penetração da água das chuvas, controlar as larvas dos insetos, enterrar os restos de culturas plantadas anteriormente e misturar no solo os adubos e defensivos aplicados na superfície. A preparação do solo inclui as operações agrícolas de aragem do solo, calagem (distribuição de pó calcário), gradeamento (desmanche dos torrões de terra), preparação de curvas de nível (combate à erosão), abertura de sulcos para o plantio, aplicação de formicidas, inseticidas e adubação com fertilizantes [6]. A vinhaça, subproduto da fase agroindustrial, pode ser utilizada como fertilizante para a adubação do solo, reduzindo o emprego de outros fertilizantes [7].

O plantio inclui a preparação das mudas (corte da cana em toletes) e a distribuição e cobertura destas na terra. Os tratos culturais devem ser iniciados logo após a brotação dos toletes de cana, para evitar que o mato não venha a concorrer com a cana e prejudique a produção do canavial. Os tratos culturais podem ser feitos através de capinas manuais (enxada), carpideiras de tração animal, cultivadores de tração mecânica ou capinas químicas (aplicação de herbicidas), este último muito empregado atualmente no País [6].

A queima da cana de açúcar é um procedimento muito comum no Brasil. Visa diminuir o volume de palha e facilitar a colheita, especialmente quando esta é realizada de forma manual (aproximadamente 80% da cana colhida é cortada manualmente). A quantidade de palha queimada nas lavouras de cana é de aproximadamente 48 milhões de toneladas, causando grande impacto ao meio ambiente. A significativa emissão de gases tóxicos ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , hidrocarbonetos entre outros) na atmosfera, a perda de material orgânico e microrganismos do solo, a perda de vegetação e o aumento da erosão, são os principais prejuízos em termos ambientais. A utilização do fogo na lavoura de cana tem também grande impacto econômico. Além de provocar perdas na produção final de álcool entre 2% e 4%, ao queimar a palha da cana, parte do trabalho empregado pelo meio ambiente na produção da cana de açúcar está sendo desperdiçado, bem como seu potencial energético [3][5][7]. Considerando que a palha apresenta uma exergia específica de 20485,45 kJ/kg, um potencial considerável para geração de energia está sendo perdido com a queima da palha na pré-colheita, visto que o bagaço da cana, subproduto da atividade canavieira usado na cogeração de energia, tem exergia específica de 10259,335 kJ/kg (aproximadamente a metade do potencial da palha) [5]. Assim, além dos benefícios ambientais, a substituição do fogo por práticas agrícolas menos agressivas pode acarretar vantagens econômicas através do uso da palha como biomassa para a geração de energia.

No estado de São Paulo existe uma Lei (n. 11.241 de 19 de setembro de 2002) já regulamentada (Decreto n. 47.700 de 11 de março de 2003) que estipula prazos para que o fogo deixe de ser usado no manejo da cana [8]. A eliminação da queimada como método de pré-colheita deve ser realizada de forma gradativa como mostra a Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – PRAZOS PARA A ELIMINAÇÃO DA QUEIMA DA PALHA NA PRÉ-COLHEITA DA CANA DE AÇÚCAR

| ANO            | ÁREA MECANIZÁVEL ONDE NÃO SE PODE EFETUAR A QUEIMA                                                       | PERCENTAGEM DE ELIMINAÇÃO DA QUEIMA |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1º ano (2002)  | 20% da área cortada                                                                                      | 20% da queima eliminada             |
| 5º ano (2006)  | 30% da área cortada                                                                                      | 30% da queima eliminada             |
| 10º ano (2011) | 50% da área cortada                                                                                      | 50% da queima eliminada             |
| 15º ano (2016) | 80% da área cortada                                                                                      | 80% da queima eliminada             |
| 20º ano (2021) | 100% da área cortada                                                                                     | Eliminação total da queima          |
| ANO            | ÁREA NÃO MECANIZÁVEL, COM DECLIVE SUPERIOR A 12% E/OU MENOR QUE 150ha, ONDE NÃO SE PODE EFETUAR A QUEIMA | PERCENTAGEM DE ELIMINAÇÃO DA QUEIMA |
| 10º ano (2011) | 10% da área cortada                                                                                      | 10% da queima eliminada             |
| 15º ano (2016) | 20% da área cortada                                                                                      | 20% da queima eliminada             |
| 20º ano (2021) | 30% da área cortada                                                                                      | 30% da queima eliminada             |
| 25º ano (2026) | 50% da área cortada                                                                                      | 50% da queima eliminada             |
| 30º ano (2031) | 100% da área cortada                                                                                     | 100% da queima eliminada            |

FONTE: SÃO PAULO. Decreto n. 47.700, de 11 de março de 2003. Regulamenta a Lei n.11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana de açúcar e dá providências correlatas. Publicado na Casa Civil, aos 11 de março de 2003.[8]

A colheita engloba o corte e o transporte da cana de açúcar para a usina. O corte da cana pode ser realizado de forma manual ou semimecanizado. No processo manual de corte, após a queima, a cana é cortada rente ao solo, eliminando-se as pontas e outras partes não utilizadas na fase agroindustrial. Estes resíduos, ou subprodutos agrícolas, podem ser utilizados como adubo visando melhorar a qualidade do solo. A quantidade de resíduos produzidos (ponta) é de aproximadamente 10 t/ha [6].

### 5.2.2 FASE AGROINDUSTRIAL

Em 1975, foi implementado no Brasil o Programa Nacional do Alcool (PRO-ÁLCOOL) visando a substituição da gasolina pelo álcool e, assim, reduzir a necessidade de importação de petróleo. Outro aspecto importante desta época foi o declínio do preço do açúcar no mercado internacional, tornando vantajosa a substituição da produção de açúcar pela de álcool. Entre os anos de 1975 e 1985, o álcool tornou-se um combustível de grande importância para o Brasil [9].

A cana de açúcar cultivada para produção de etanol ocupa apenas 4,8% da terra destinada ao plantio de culturas alimentícias no Brasil, e utiliza menos área que o milho (24%), feijão (10,7%) e arroz (10,8%). A área total utilizada para o plantio da cana representa

apenas 7,5% da área destinada à produção agrícola no Brasil ou, aproximadamente, 0,4% do território brasileiro. A região centro-sul, que corresponde a 17,6% da área do país, produz 74% da cana de açúcar e possui a maior concentração de usinas de beneficiamento de cana [7][9].

O processo de produção do etanol compreende os seguintes passos: lavagem da cana, extração, purificação e fermentação do caldo e destilação do etanol. O rendimento de etanol é em média de 80 litros por tonelada de cana de açúcar processada [1]. O custo da mão de obra é de US\$0,006 por litro de etanol produzido [9].

Na lavagem da cana de açúcar uma grande quantidade de água é consumida. Os setores de açúcar e álcool consomem anualmente 3,6 bilhões de metros cúbicos de água, que são utilizados principalmente para lavar a cana antes da moagem, resultando em uma grande produção de resíduos líquidos. A fim de minimizar a possibilidade de contaminação ambiental por parte destas águas residuais, medidas como circuitos fechados de circulação da água ou a utilização de lagoas de aeração (antes de descarregar a água no solo) têm sido adotadas. Após a lavagem, o caldo da cana é extraído e enviado para tratamento (purificação). A utilização do bagaço, sub-produto desta etapa, para geração de energia traz vantagens econômicas e ambientais. A cogeração de energia é uma prática bastante comum no processamento industrial da cana de açúcar e, ainda, pode ser ampliada pela utilização de outros resíduos da cana, a exemplo da palha. Em média, 280 kg de bagaço são produzidos por tonelada de cana de açúcar, o que equivale a 2,1 GJ de energia por tonelada de cana. Entretanto, em grande parte das usinas produtoras de álcool no Brasil, o potencial energético do bagaço da cana é subaproveitado, sendo utilizado apenas para suprir a necessidade das unidades de produção (15 – 20 kWh/t de cana). Assim, o Brasil tem um grande potencial para cogeração de energia ainda inexplorado [9][10].

As etapas finais da produção do etanol são a fermentação e a destilação. Na fase de destilação, pode-se obter álcool anidro ou álcool hidratado. Atualmente, o método mais empregado no Brasil para a obtenção de álcool anidro é o *Mélie-Guinot* (método das misturas azeotrópicas), que utiliza o benzeno para promover a desidratação do álcool hidratado. Assim, na fabricação do álcool anidro, empregam-se, além das 5 colunas de destilação usadas na produção do álcool hidratado, mais duas: a coluna de desidratação, onde o benzeno é adicionado através de um decantador, e a coluna onde é realizada a recuperação do benzeno. O benzeno ao encontrar com o álcool hidratado muda sua composição azeotrópica, formando o álcool desidratado e outras substâncias [4].

Na destilação é produzida a vinhaça, maior efluente do processo agroindustrial, que consiste em uma substância líquida com elevada concentração orgânica e mineral. Produzida em grandes quantidades, em torno de 15 litros por litro de etanol, o destino da produção anual de aproximadamente 160 bilhões de litros de vinhaça não pode ser ignorado. Assim como a torta de filtro, resíduo sólido da etapa de purificação do caldo da cana, a vinhaça pode ser aplicada como adubo nos canaviais. Entretanto, para que não ocorra a contaminação da água do subsolo, a quantidade de vinhaça não deve ultrapassar o limite de 100 m<sup>3</sup>/ha. Há indicações que a aplicação da vinhaça, em quantidade igual ao limite, aumenta a produtividade dos canaviais em até 1 t/ha [1][5][7].

A produção de álcool gera outros resíduos sólidos, tais como: as cinzas da queima do bagaço, a fuligem das caldeiras e o lodo dos sistemas de tratamento. Estes resíduos, em geral, são incorporados ao solo com o objetivo de aumentar a qualidade deste e, conseqüentemente, aumentar a produção agrícola [7].

### 5.2.3 ANÁLISE EMERGÉTICA

Na produção do álcool etílico são utilizados recursos naturais locais e recursos provenientes de sistemas econômicos externos, tanto na fase agrícola como na agroindustrial. Entre os recursos naturais podem ser distinguidos os recursos renováveis (R) e os não renováveis (N).

Os recursos naturais renováveis compreendem os fluxos naturais provenientes da energia solar direta (chuva, vento e radiação solar), da energia gravitacional da lua (influência nos sistemas à beira mar) e da energia produzida no interior da Terra (energia do ciclo geológico), além dos produtos e serviços dos ecossistemas naturais, quando utilizados de maneira sustentável [11].

Os recursos naturais não renováveis compreendem o solo (visto que, em geral, a produção de solo pela natureza ocorre a taxas muito menores que seu consumo) e outros recursos consumidos a taxas acima da velocidade de reposição [11].

As contribuições provenientes de sistemas econômicos externos (F) compreendem os materiais (água tratada e insumos agrícolas como fertilizantes, pesticidas e calcário), os combustíveis, os bens de capital (máquinas e equipamentos utilizados na produção agrícola e agroindustrial), os serviços e a mão de obra [11]. O sistema de produção do etanol anidro está representado na Figura 5.2.



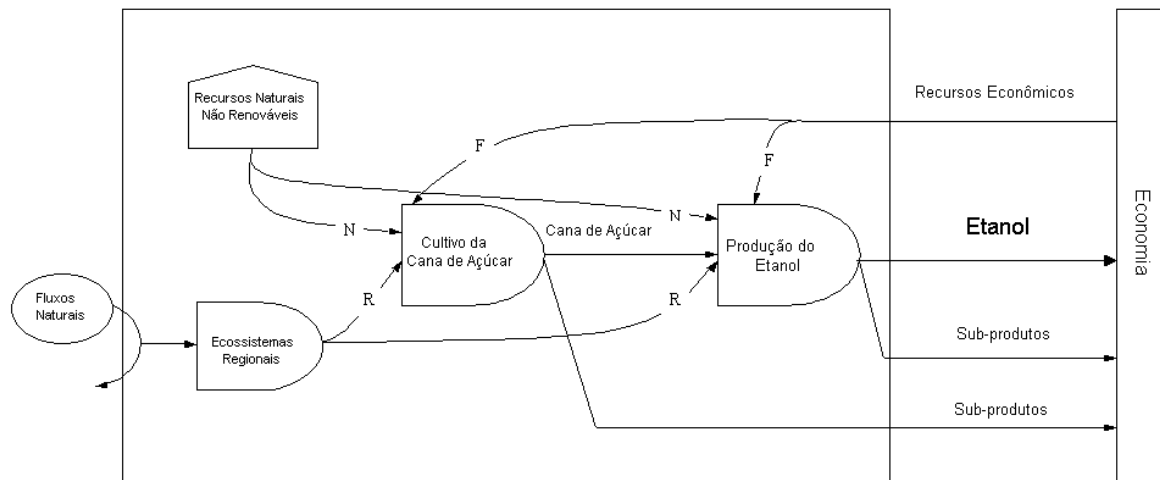


Figura 5.2: Sistema ecológico - industrial da produção do etanol

Primeiramente, todos os recursos, investidos pelo meio ambiente ou pela economia, devem ser inventariados, classificados e convertidos em unidades de energia. Os recursos necessários à produção de etanol estão relacionados na Tabela 5.2. A determinação e a classificação destes recursos foi baseada nos trabalhos de Bastianoni & Marchettini [12] e Ortega & Miller [11].

TABELA 5.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO ETANOL

| FASE AGRÍCOLA              |               | FASE AGROINDUSTRIAL                  |               |
|----------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
| ITENS                      | CLASSIFICAÇÃO | ITENS                                | CLASSIFICAÇÃO |
| Radiação solar             | R             | Energia (bagaço da cana)             | R             |
| Chuva                      | R             | Água tratada                         | F             |
| Vento                      | R             | Químicos e lubrificantes             | F             |
| Energia do ciclo geológico | R             | Eletricidade comprada                | F             |
| Perda de solo              | N             | Construções                          | F             |
| Mudas                      | F             | Equipamentos                         | F             |
| Fertilizantes fosfatados   | F             | Custo do capital e custos comerciais | F             |
| Fertilizantes potássicos   | F             | Mão de obra                          | F             |
| Inseticidas                | F             | Manutenção                           | F             |
| Herbicidas                 | F             |                                      |               |
| Outros químicos            | F             |                                      |               |
| Combustível                | F             |                                      |               |
| Lubrificantes              | F             |                                      |               |
| Mão de obra                | F             |                                      |               |
| Serviços                   | F             |                                      |               |

R = Recursos Naturais Renováveis ; N = Recursos Naturais Não Renováveis ; F = Recursos Econômicos

### 5.2.3.1 Memorial de Cálculo

Após a definição dos recursos necessários ao processo e a coleta de dados pertinentes ao cultivo da cana de açúcar e ao processo de transformação desta em álcool etílico, a etapa seguinte consiste no cálculo e conversão, em unidades de energia, dos fluxos que alimentam o sistema produtivo.

#### Fase Agrícola

A radiação solar é o principal recurso de energia que sustenta os processos ocorridos na superfície terrestre. A densidade média da radiação solar que atinge a Terra é de  $185,8 \text{ W/m}^2$  [13], sendo que 30% do fluxo é refletido para fora da atmosfera terrestre. Considerando que um ano tem  $3,1536 \times 10^7$  segundos, o fluxo anual de radiação solar é de  $R_s = 4,10 \times 10^9 \text{ J/m}^2 \cdot \text{ano}$  (ou  $4,10 \times 10^{13} \text{ J/ha} \cdot \text{ano}$ ). A transformidade ( $\tau$ ) da luz solar é igual a  $1 \text{ sej/J}$  [14], resultando em um fluxo de energia de  $4,10 \times 10^{13} \text{ J/ha} \cdot \text{ano}$ .

O potencial químico da chuva é calculado através da seguinte equação:

$$E_{\text{chuva}} = \text{precipitação} \times g \times \rho_{\text{água}} \quad (5.1)$$

Considerando: a precipitação pluviométrica mínima, para a cultura da cana de açúcar, de  $1300 \text{ mm/ano}$  (equivalente a  $1,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ ) [1]; a energia química da chuva (energia livre de Gibbs para a água  $g=4940 \text{ J/kg}$ ) [13]; a densidade da água ( $\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) [13] e a transformidade da chuva ( $\tau=18200 \text{ sej/J}$ ) [14]. Assim, o potencial químico e o fluxo de energia da chuva são, respectivamente,  $E_{\text{chuva}} = 6,42 \times 10^{10} \text{ J/ha} \cdot \text{ano}$  e  $E_{m_{\text{chuva}}} = 1,17 \times 10^{15} \text{ sej/ha} \cdot \text{ano}$ .

A energia do vento foi calculada pela seguinte equação:

$$E_{\text{vento}} = v_m \times e \times \rho_{\text{AR}} \times C_{\text{AR}} \times \Delta T \times (3,1536 \times 10^7 \text{ s/ano}) \quad (5.2)$$

Foram utilizados os seguintes dados: velocidade média do vento  $v_m = 2,7 \text{ m/s}$  [13]; espessura da camada atmosférica  $e = 1000 \text{ m}$  [13]; densidade do ar  $\rho_{\text{AR}} = 1,23 \text{ kg/m}^3$  [13]; calor específico do ar  $C_{\text{AR}} = 1004,64 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  [13]; gradiente de temperatura  $\Delta T = 3 \times 10^{-9} \text{ K/m}$  [13] e transformidade do vento  $\tau = 1496 \text{ sej/J}$  [14]. Resultando nos seguintes fluxos de energia e energia:  $E_{\text{vento}} = 3,16 \times 10^9 \text{ J/ha} \cdot \text{ano}$  e  $E_{m_{\text{vento}}} = 4,72 \times 10^{12} \text{ sej/ha} \cdot \text{ano}$ .

A energia do ciclo geológico é de  $5,45 \times 10^{15}$  J/ano [13]. Considerando a área do território brasileiro ( $8.514.876,599 \text{ km}^2$ ) [2] e a transformidade de 34377 sej/J [14], os valores de energia e de emergência por unidade de área são:  $E_{CG} = 6,40 \times 10^6$  J/ha.ano e  $E_{mCG} = 2,20 \times 10^{11}$  sej/ha.ano.

O fluxo de emergência não renovável, relativo à perda de solo na cultura da cana de açúcar, é de  $E_{mSolo} = 2,67 \times 10^{15}$  sej/ha.ano. Este fluxo foi calculado através dos seguintes dados: quantidade de solo perdido na cultura da cana de  $4 \times 10^4$  kg de solo/ha.ano (valor máximo) [16]; 4% de matéria orgânica no solo (0,04 kg de matéria orgânica/kg de solo) [16]; energia da matéria orgânica de 5400 kcal/kg de matéria orgânica (equivalente a  $2,26 \times 10^7$  J/kg de matéria orgânica) [16] e transformidade do solo igual a 73.750 sej/J [14].

Considerando os valores da energia empregada na produção de mudas ( $E_{Mudas} = 5,76 \times 10^6$  J/t de cana) [10], da produtividade média da cana de açúcar (72,9 t/ha.ano) [2] e da transformidade de mudas e sementes ( $\tau = 50000$  sej/J) [14], o fluxo de emergência das mudas necessárias à produção de cana é de  $E_{mMudas} = 2,10 \times 10^{13}$  sej/ha.ano.

Os fluxos de emergência dos fertilizantes, dos agrotóxicos (inseticidas, herbicidas, etc.) e outros químicos foram calculados através das quantidades utilizadas por unidade de área considerando os tipos de nutrientes, no caso dos fertilizantes, e a finalidade, no caso dos agrotóxicos. Os valores utilizados correspondem à média nacional das principais culturas brasileiras no ano de 2000. Os dados utilizados e os fluxos de emergência calculados foram os seguintes:

Fertilizantes Fosfatados ( $P_2O_5$ ):

$$m = 45,86 \text{ kg / ha.ano [17] ; } \tau = 3,9 \times 10^{12} \text{ sej/kg [14]}$$

$$Em_{fert. fosfatados} = 1,79 \times 10^{14} \text{ sej / ha.ano}$$

Fertilizantes Potássicos ( $K_2O$ )

$$m = 50,25 \text{ kg / ha.ano [17] ; } \tau = 1,1 \times 10^{12} \text{ sej/kg [14]}$$

$$Em_{fert. potassicos} = 5,53 \times 10^{13} \text{ sej / ha.ano}$$

## Inseticidas

$$m = 0,38 \text{ kg / ha.ano [17] ; } \tau = 1,48 \times 10^{13} \text{ sej/kg [12]}$$

$$Em_{inseticidas} = 5,62 \times 10^{12} \text{ sej / ha.ano}$$

## Herbicidas

$$m = 1,61 \text{ kg / ha.ano [17] ; } \tau = 1,48 \times 10^{13} \text{ sej/kg [12]}$$

$$Em_{herbicidas} = 2,38 \times 10^{13} \text{ sej / ha.ano}$$

## Outros Químicos

$$m = 0,77 \text{ kg / ha.ano [17] ; } \tau = 3,8 \times 10^{11} \text{ sej/kg [12]}$$

$$Em_{químicos} = 2,93 \times 10^{11} \text{ sej / ha.ano}$$

A quantidade, em energia, de combustível e de lubrificantes empregados na produção de cana de açúcar são os seguintes:  $E_{\text{Combustível}} = 2,55 \times 10^9 \text{ J/ha.ano}$  (considerando a  $E_{\text{Combustível}}$  de  $3,49 \times 10^7 \text{ J/t}$  de cana [10] e a produtividade média da cana de 72,9 t/ha.ano [2]) e  $E_{\text{Lubrificantes}} = 3,00 \times 10^8 \text{ J/ha.ano [12]}$ . A transformidade utilizada para ambos os casos é de 66000 sej/J [12], resultando em valores de energia de  $Em_{\text{Combustível}} = 1,68 \times 10^{14} \text{ sej/ha.ano}$  e  $Em_{\text{Lubrificantes}} = 1,98 \times 10^{13} \text{ sej/ha.ano}$ .

A avaliação da mão de obra foi realizada através da transformação dos valores pagos pelo trabalho humano em fluxos de energia. Para tanto, foram considerados os seguintes dados: 511 mil empregos diretos na produção de cana de açúcar (80% no corte manual da cana e 20% operadores de máquinas) [3]; rendimento médio de 2 salários mínimos para os trabalhadores empregados no corte manual da cana [2] e 3 salários mínimos para os operadores de máquina [16]; salário mínimo de R\$ 240,00; fator de conversão de moeda 2,9387 R\$/US\$ (valor médio de 2002) e área destinada ao cultivo da cana de  $5,28 \times 10^6 \text{ ha [2]}$ . Os valores obtidos foram de  $8,68 \times 10^8$  e de  $3,26 \times 10^8 \text{ US$/ano}$  para mão de obra manual e para os operadores de máquinas respectivamente. Portanto, o valor total pago pelo trabalho humano na cultura da cana é de  $1,19 \times 10^9 \text{ US$/ano}$  ou

$2,26 \times 10^2$  US\$/ha.ano. Utilizando a razão *energia/dinheiro* de  $3,70 \times 10^{12}$  sej/US\$ [15], a energia correspondente ao trabalho humano nas lavouras de cana de açúcar é de  $E_{m_{\text{Mão de obra}}} = 8,36 \times 10^{14}$  sej/ha.ano.

Os custos dos serviços utilizados no processo produtivo da cana são estimados em  $1,57 \times 10^3$  US\$/ha.ano [12], que multiplicados pela razão *energia/dinheiro* resultam em um fluxo de energia de  $E_{m_{\text{Serviços}}} = 5,81 \times 10^{15}$  sej/ha.ano.

### Fase Agroindustrial

A energia que pode ser obtida do bagaço da cana de açúcar é de aproximadamente 2,1 GJ por tonelada de cana. Entretanto, este potencial para geração de energia é subaproveitado pelas usinas produtoras de álcool, em torno de 20 kWh/t de cana (equivalente a 72 MJ/t de cana) [9]. Assim, a energia obtida a partir do bagaço da cana e utilizada pelas usinas na produção de etanol, considerando a transformidade do bagaço da cana ( $\tau = 48500$  sej/J) [14], é de  $2,55 \times 10^{14}$  sej/ha.ano.

O volume total de água consumida pelas indústrias do açúcar e do álcool é de  $3,6 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/ano [5]. O custo da água utilizada no processo de produção do etanol foi estimado através da tarifa aplicada pela Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, para a categoria industrial – faixa de consumo acima de 10m<sup>3</sup>/mês, que é de

$$R\$ 23,95 + \left( \frac{R\$ 2,70}{m^3} \text{ excedente a } 10m^3/\text{mês} \right). \text{ Foram considerados ainda os seguintes dados:}$$

taxa de conversão entre moedas de 2,9387 R\$/US\$ (valor médio do ano de 2002); rendimento do etanol (80 l/t de cana) [1]; parcela da cana destinada à produção de álcool (65%) [9] e a razão *energia/dinheiro* de  $3,70 \times 10^{12}$  sej/US\$ [15]. Os valores obtidos foram de 0,11 US\$/l de etanol e  $E_{m_{\text{Água}}} = 2,32 \times 10^{15}$  sej/ha.ano.

A energia dos produtos químicos e lubrificantes utilizados nas usinas produtoras de etanol é de  $E_{\text{Químicos/Lubrificantes}} = 7,34 \times 10^6$  J/t de cana [10]. Considerando a produtividade média da cana de açúcar [2] e a transformidade destes produtos ( $\tau = 66000$  sej/J) [12], o valor do fluxo de energia obtido é de  $E_{m_{\text{Químicos/Lubrificantes}}} = 3,53 \times 10^{13}$  sej/ha.ano.

Os fluxos de energia das construções ( $E_{m_{\text{Construções}}} = 3,76 \times 10^{13}$  sej/ha.ano) e dos equipamentos ( $E_{m_{\text{Equipamentos}}} = 1,16 \times 10^{14}$  sej/ha.ano) utilizados no sistema produtivo do etanol foram obtidos através dos dados apresentados na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 – DADOS DO MAQUINÁRIO E DA INFRA-ESTRUTURA

| ITENS        | QUANTIDADE<br>(kg/ha.ano) | TRANSFORMIDADE<br>(sej/kg) |
|--------------|---------------------------|----------------------------|
| Construções  | 50,3                      | $7,48 \times 10^{11}$      |
| Equipamentos | 44,0                      | $2,64 \times 10^{12}$      |

FONTE: BASTIANONI, S. & MARCHETTINI, N. Ethanol production from biomass: analysis of process efficiency and sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v.11, p.411-418, 1996.[12]

A Tabela 5.4 apresenta os dados utilizados e as emergias obtidas dos seguintes itens: custos de capital, custos comerciais, mão de obra e manutenção de equipamentos. Para o cálculo dos fluxos de energia também foram utilizados: a produtividade do etanol [9] e a razão *energia/dinheiro* de  $3,70 \times 10^{12}$  *sej/US\$* [15].

TABELA 5.4 – DADOS E FLUXOS DE ENERGIA

| ITENS                                | DADOS<br>(US\$/l de etanol) | ENERGIA CALCULADA<br>(sej/ha.ano) |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Custo do capital e custos comerciais | $2,20 \times 10^{-2}$       | $4,75 \times 10^{14}$             |
| Mão de obra                          | $6,00 \times 10^{-3}$       | $1,30 \times 10^{14}$             |
| Equipamentos                         | $4,00 \times 10^{-3}$       | $1,16 \times 10^{14}$             |

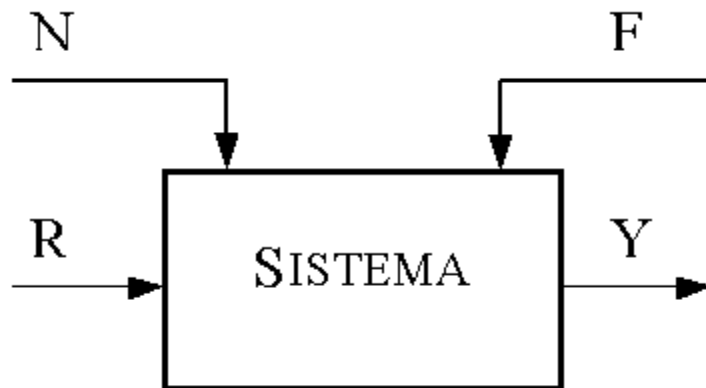
FONTE: MOREIRA, J. R. & GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, v.27, p.229-245, 1999. [9]

### 5.2.3.2 Resultados

Os valores de energia calculados na seção 5.2.3.1, devem ser contabilizados de acordo com o tipo de fluxo, ou seja, recursos obtidos dos sistemas naturais locais, renováveis e não renováveis, ou recursos provenientes de sistemas econômicos externos. Para o caso do álcool etílico devem ser consideradas as duas fases, agrícola e agroindustrial, enquanto que para a cana de açúcar somente os recursos da fase agrícola devem ser computados.

É importante ressaltar que, na metodologia de análise emergética, a fim de evitar dupla contagem, somente o maior valor dentre os recursos naturais renováveis provenientes da mesma fonte é contabilizado. Como os fluxos referentes à radiação solar, vento e chuva são originários da mesma fonte (energia solar) e, neste caso, o fluxo da chuva é o maior, os fluxos de energia do vento e da radiação solar foram desprezados [18]. A Tabela 5.5 mostra os valores contabilizados em termos de energia para a cana de açúcar e para o etanol.

TABELA 5.5 – FLUXOS DE ENTRADA E SAÍDA DO SISTEMA



| FLUXOS DO SISTEMA                      | EMERGIA<br>(sej/ha.ano)                  |                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                        | Sistema de Produção da<br>Cana de Açúcar | Sistema de Produção do<br>Álcool Etílico |
| Recursos Naturais Renováveis – $R$     | $1,17 \times 10^{15}$                    | $1,42 \times 10^{15}$                    |
| Recursos Naturais Não Renováveis – $N$ | $2,67 \times 10^{15}$                    | $2,67 \times 10^{15}$                    |
| Recursos da Economia – $F$             | $7,12 \times 10^{15}$                    | $1,03 \times 10^{16}$                    |
| Produto $Y = R + N + F$                | $1,10 \times 10^{16}$                    | $1,44 \times 10^{16}$                    |

Os indicadores utilizados na avaliação dos sistemas são: a Transformidade; a Razão de Rendimento em Emergia (*Emergy Yield Ratio - EYR*); a Razão de Investimento em Emergia (*Emergy Investment Ratio - EIR*) e a Razão de Carregamento Ambiental (*Emergy Loading Ratio - ELR*). O formulário e os valores encontrados para os indicadores estão expostos na Tabela 5.6.

Para o cálculo das transformidade é necessário conhecer a energia do produto. O potencial energético de uma tonelada de cana de açúcar é equivalente ao de 1,2 barris de petróleo, ou seja,  $1,54 \times 10^{10} \text{ J/t de cana}$  [3]. Considerando que a produtividade média da cana de açúcar, em 2003, foi de  $72,9 \text{ t/ha}$  [2], a energia total da cana de açúcar é de  $E_{\text{cana}} = 1,12 \times 10^{12} \text{ J/ha.ano}$ . A energia do etanol é de  $E_{\text{etanol}} = 2,00 \times 10^9 \text{ J/t}_{\text{cana}}$ , ou,  $E_{\text{etanol}} = 1,46 \times 10^{11} \text{ J/ha.ano}$  [10].

TABELA 5.6 – INDICADORES CALCULADOS

| INDICADOR                        | FÓRMULA                                 | SISTEMA                    |                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                                  |                                         | Produção da Cana de Açúcar | Produção do Alcool Etílico |
| Transformidade                   | $\tau = \frac{Em}{E} \text{ [sej / J]}$ | $9,75 \times 10^3$         | $9,89 \times 10^4$         |
| Razão de Rendimento em Energia   | $EYR = \frac{Y}{F}$                     | 1,54                       | 1,40                       |
| Razão de Investimento em Energia | $EIR = \frac{F}{R + N}$                 | 1,86                       | 2,52                       |
| Razão de Carregamento Ambiental  | $ELR = \frac{F + N}{R}$                 | 8,37                       | 9,12                       |

A transformidade indica quanta energia solar o sistema precisa para fabricar uma unidade de energia de um determinado produto. Assim, o sistema de produção da cana de açúcar precisa de 9750 *Joules* de energia solar para produzir 1 *Joule* de cana de açúcar. O sistema de produção de etanol precisa de mais energia solar ( $9,89 \times 10^4$  sej) para produzir cada *Joule* de álcool, pois considera a energia solar empregada nos processos de produção e de beneficiamento da cana de açúcar. Os valores de transformidade encontrados na literatura para o álcool obtido a partir da cana de açúcar situam-se entre  $8,6 \times 10^4$  sej/J [14] e  $1,4 \times 10^5$  sej/J [12].

A razão de rendimento energético, EYR, indica a relação entre a energia produzida pelo sistema (Y) e a energia, proveniente de sistemas econômicos externos, utilizada pelo sistema (F). Quanto maior o valor de EYR, maior é o retorno do investimento econômico feito no sistema produtivo e, portanto, mais vantajoso é este sistema. A taxa de investimento energético, EIR, indica a relação entre a energia proveniente de sistemas econômicos externos (F) e a energia obtida nos ecossistemas locais (R+N). Quanto maior o valor de EIR, maior a dependência de recursos da economia.

No trabalho de Bastianoni & Marchettini [12] os valores de EYR e EIR para um sistema de produção de álcool etílico no Brasil são, respectivamente, 1,62 e 1,61 (calculados a partir de dados do início da década de 90). Em comparação a este, o sistema de produção de etanol estudado nesta dissertação apresenta maior dependência de recursos econômicos (maior EIR) e menor retorno do investimento econômico (menor EYR).



A razão de carregamento ambiental, ELR, mede o impacto do sistema no meio ambiente. Um valor elevado para ELR indica um grande consumo de recursos não renováveis locais (N) ou externos (F). O sistema estudado apresenta elevado impacto ambiental se comparado aos sistemas de produção de etanol de cana de açúcar estudados por Bastianoni & Marchettini [12]. A Figura 5.3 apresenta os valores de razão de carregamento ambiental de diversos sistemas de produção de etanol.

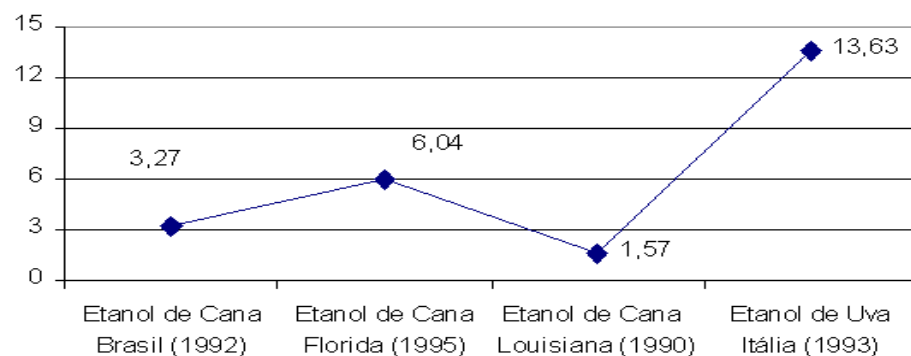


Figura 5.3: Razão de carregamento ambiental para sistemas de produção de etanol [12]

### 5.3 PRODUÇÃO DO ÓLEO DE SOJA DEGOMADO

A produção de óleo de soja degomado também compreende duas fases, a agrícola e a agroindustrial. O ciclo produtivo completo do óleo de soja degomado está esquematizado na Figura 5.4.

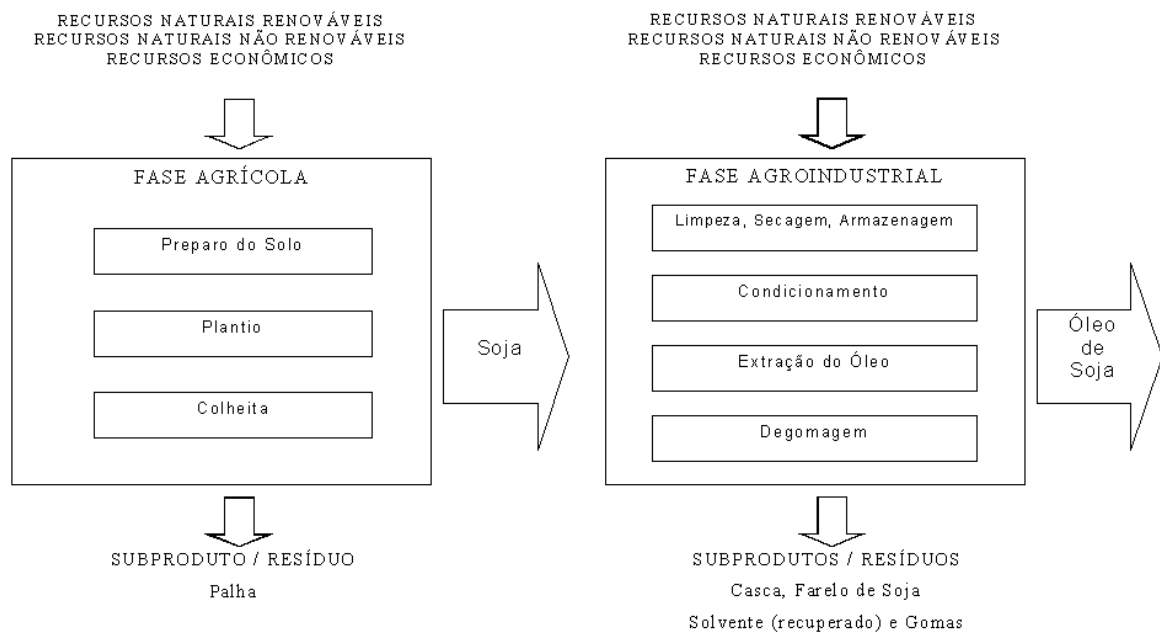


Figura 5.4: Etapas do processo de produção do óleo de soja [20][21][22]

### 5.3.1 FASE AGRÍCOLA

A soja é uma semente oleaginosa a partir da qual se obtém uma série de produtos, entre os quais o óleo, o farelo (ração animal), a farinha (panifício) e a proteína. A área total plantada com soja, em 2003, foi de 18.437.465 ha, com uma safra em torno de 51 milhões de toneladas de grãos, a soja apresenta uma produtividade média de 2,8t/ha. [2][19][20].

O sucesso no cultivo desta semente oleaginosa depende tanto das condições ambientais como das técnicas agrícolas aplicadas. Dentre os fatores naturais que mais influenciam o cultivo da soja destacam-se a radiação solar e o controle da umidade do solo. A radiação solar, fonte energética da fotossíntese, influi no crescimento da soja durante todo o ciclo e torna-se crítica entre a floração plena e o início do enchimento dos grãos. A disponibilidade de umidade do solo afeta todos os processos fisiológicos das plantas. Na maioria das situações, esse fator ecológico é o principal responsável pelas grandes variações no rendimento da soja [20].

O processo produtivo da soja engloba as operações de preparo do solo, plantio e colheita. O preparo do solo envolve diversas operações (destoca, limpeza, drenagem e nivelamento) e tem por objetivo tornar o solo menos resistente à penetração das raízes, permitir livre absorção e moderada retenção de água, assegurar máxima resistência à erosão, permitir condições estáveis de tração de implementos agrícolas e auxiliar no controle de pragas. A predominância de solos ácidos no Brasil torna necessária a aplicação de corretivos e fertilizantes no solo [20].

A escolha da época do plantio é de grande importância no manejo da cultura da soja. A determinação do período de semeadura, em uma determinada região, depende das condições ambientais disponíveis durante todo o ciclo de produção da soja. No estado do Paraná, assim como ocorre no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, a época de semeadura recomendada se estende de 15 de outubro a 15 de dezembro, sendo de 25 de outubro a 25 de novembro o período preferencial. Além de ser semeada na época certa, para ser bem sucedida a soja deve ser semeada a uma profundidade e com um espaçamento entre plantas adequados, ou seja, os princípios básicos da competição entre as espécies que compõem uma comunidade vegetal, bem como entre as plantas de mesma espécie, devem ser considerados na implantação da cultura [20].

Os defensivos agrícolas são produtos químicos ou biológicos, que tem por função proteger ou livrar plantas cultivadas dos ataques de pragas, de doenças ou de infestações de plantas invasoras. No Brasil, a área cultivada com soja é normalmente infestada por inúmeras

espécies de plantas invasoras, que são fortes concorrentes da soja, tanto em relação ao aproveitamento de luz e água quanto ao de nutrientes. Estima-se que as perdas provocadas por plantas invasoras situam-se entre 20 e 30%. Por outro lado, na época da entressafra, estas plantas invasoras contribuem positivamente, protegendo o solo da erosão e auxiliando na reciclagem de nutrientes. Assim, o controle de plantas invasoras deve ser feito de forma racional, buscando garantir a produtividade da cultura da soja sem prejudicar a conservação do solo (potencial produtivo) e sem elevar demasiadamente os custos de produção [20].

Os métodos normalmente utilizados no controle de plantas invasoras são: o Cultural – utiliza as características ecológicas da soja e da planta invasora de tal forma que a primeira leve vantagem na competição; o Mecânico – realizado através de capinas mecânicas ou capinas manuais; o Químico – realizado através de intensa aplicação de herbicidas e o Integrado – combinação entre dois ou mais métodos, conforme a necessidade. Dentre os métodos de controle de plantas invasoras da cultura da soja, atualmente, o método químico é o mais empregado, fazendo da cultura da soja uma das que utilizam mais herbicidas no Brasil. Quando usados corretamente, os herbicidas respondem com eficiência e segurança aos objetivos pretendidos, entretanto, a utilização inadequada destes produtos químicos pode causar sérios prejuízos tanto às lavouras de soja quanto ao meio ambiente [20].

O controle das pragas (insetos) que atacam a soja é realizado durante o preparo do solo, através da destruição das plantas hospedeiras e da conseqüente eliminação de ovos e das larvas de insetos. Entretanto, em alguns casos, o controle químico, realizado através da aplicação de inseticidas, é necessário [20].

A colheita da soja deve ser tratada como a operação mais importante no ciclo das máquinas, pois qualquer erro acarreta perda direta na produção. A adaptação da estrutura das plantações à colheita mecânica deve ser realizada visando reduzir as perdas de grãos [20].

### 5.3.2 FASE AGROINDUSTRIAL

Atualmente, a soja é a primeira fonte para produção de óleo vegetal no mundo. O Brasil é o segundo produtor mundial de óleo de soja, com capacidade instalada para produção de 6.932 mil toneladas de óleo de soja [19]. A industrialização das sementes oleaginosas compreende: a extração e o refino do óleo vegetal [21]. O refino de óleos vegetais tem como objetivo a utilização do óleo para fins alimentícios e, portanto, não será abordado neste estudo.

No processo de extração de óleo de soja, as seguintes etapas devem ser consideradas: pré-limpeza e armazenagem, condicionamento, extração do óleo bruto e degomagem. Na pré-

limpeza são retiradas impurezas (terra, talos, grãos quebrados, pequenas folhas e objetos metálicos) através de peneiras planas vibratórias ou peneiras rotativas. Em seguida, a soja é submetida a um processo de secagem, a fim de evitar a degradação dos grãos ou para deixá-los em condições de processamento [21][22].

As condições de armazenagem da soja refletem diretamente no rendimento e na qualidade do óleo vegetal e, portanto, algumas medidas devem ser adotadas para preservar os grãos durante esta etapa. As sementes oleaginosas são melhor armazenadas em locais com baixa umidade, inibindo a atividade enzimática e o crescimento de mofo. O nível de umidade considerado seguro para estocagem é de no máximo 13% (denominado umidade crítica). A umidade crítica é aquele valor de umidade acima do qual a atividade respiratória e o aquecimento dos grãos armazenados crescem nitidamente. Além da umidade, outros elementos (temperatura, altura de empilhamento dos grãos, aeração, entrada de insetos e roedores) devem ser controlados para garantir o armazenamento adequado das sementes. Quando as sementes de soja são armazenadas em más condições, pode ocorrer carbonização das sementes (devido ao aquecimento elevado), prejuízo ao refino do óleo de soja e modificações estruturais dos grãos [21][22].

O condicionamento engloba todo um conjunto de operações que possibilitam ao processo de extração da soja ter um melhor rendimento e maior velocidade de extração. O óleo contido na semente de soja encontra-se em bolsões e em capilares fibrosos, a função do condicionamento é romper esses bolsões. As operações envolvidas nesta etapa são: a quebra do grão e a retirada da fibra para formação de uma massa; o cozimento, que provoca o rompimento das paredes das células das sementes da oleaginosa, liberando o óleo na massa (facilitando a laminação); a laminação, que transforma as partes quebradas dos grãos em flocos (aumentando a superfície de saída do óleo) e a secagem final que reduz a umidade aos níveis recomendados para a extração do óleo (em torno de 10,5%) [21][22].

A soja, por possuir um teor de óleo inferior a 25%, não necessita de pré-prensagem. Desta forma, após o condicionamento, a soja encontra-se em condições adequadas para a extração do óleo. O óleo aparece no material submetido à extração em duas formas: na forma de uma camada ao redor das partículas das sementes (trituradas e laminadas) e contido em células intactas. No primeiro caso, o óleo é obtido por processo de simples dissolução, enquanto que nas células intactas, o óleo precisa ser extraído do interior das células por difusão. Como resultado, a extração consiste em dois processos: um deles rápido e fácil, o de dissolução, e outro mais demorado que depende da difusão da mistura de óleo e solvente (miscela) através da parede celular semipermeável. A miscela é, então, destilada para separar

o óleo bruto do solvente. Além do óleo bruto, são obtidos nesta etapa do processo o farelo de soja e o solvente recuperado. O farelo pode ser utilizado na fabricação de ração animal e o solvente (recuperado) pode ser reaproveitado no processo de extração do óleo vegetal [21][22].

O óleo bruto de soja consiste em uma mistura de triglicerídeos, ácidos graxos livres, fosfatídeos (entre eles a lecitina), compostos oxigenados, pigmentos (caroteno, clorofilas, etc.) e voláteis diversos [22].

A degomagem é, geralmente, executada pelas próprias empresas extratoras de óleo. A degomagem tem como finalidade reduzir o teor de fosfatídeos (ou gomas), proteínas e substâncias coloidais e produzir óleos crus capazes de serem processados, por via química ou física, com a mínima contaminação ambiental. Outra vantagem do óleo degomado sobre o óleo bruto é ter melhores condições de armazenagem, ou seja, suas características não são facilmente alteradas ou degradadas. O subproduto extraído dessa etapa é a borra de lecitina (gomas), que pode ser misturada ao farelo de soja ou refinada para obtenção da lecitina de soja [21][22].

Os custos médios de uma empresa esmagadora de óleo de soja, estão relacionados na Tabela 5.7 e são relativos ao ano de 1981. Os dados apresentados foram corrigidos pelo índice IPCI da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE) e convertidos em dólares americanos.

TABELA 5.7 – CUSTOS DA EXTRAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS

| DESCRIÇÃO          | CUSTO (US\$/ha.ano) |
|--------------------|---------------------|
| Energia            | 2,37                |
| Solvente           | 4,84                |
| Outros insumos     | 0,79                |
| Manutenção         | 0,40                |
| Equipamentos       | 1,78                |
| Mão de obra        | 3,16                |
| Transporte         | 4,25                |
| Custos Financeiros | 8,40                |
| Outros custos      | 1,07                |
| Total              | 27,06               |

FONTE: Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social – IPARDES.  
**Estratégias técnico-econômicas à indústria de processamento de oleaginosas no Estado do Paraná.** Curitiba, 1986. [22]

### 5.3.3 ANÁLISE EMERGÉTICA

Assim como no caso do etanol, na produção do óleo de soja degomado são utilizados recursos naturais, renováveis e não renováveis, e recursos de sistemas econômicos externos. O sistema de produção do óleo de soja, que também envolve duas fases (agrícola e agroindustrial), está esquematizado na Figura 5.5.

Para a fase agrícola são utilizados os resultados da análise realizada por Ortega & Miller [15]. A fase agroindustrial da produção de óleo de soja será submetida a uma avaliação semelhante aquela aplicada ao álcool etílico, ou seja, todos os produtos e serviços, investidos pela natureza ou pela economia, são mensurados e convertidos em fluxos de energia. A Tabela 5.8 relaciona os itens considerados na avaliação da fase industrial de produção do óleo de soja.

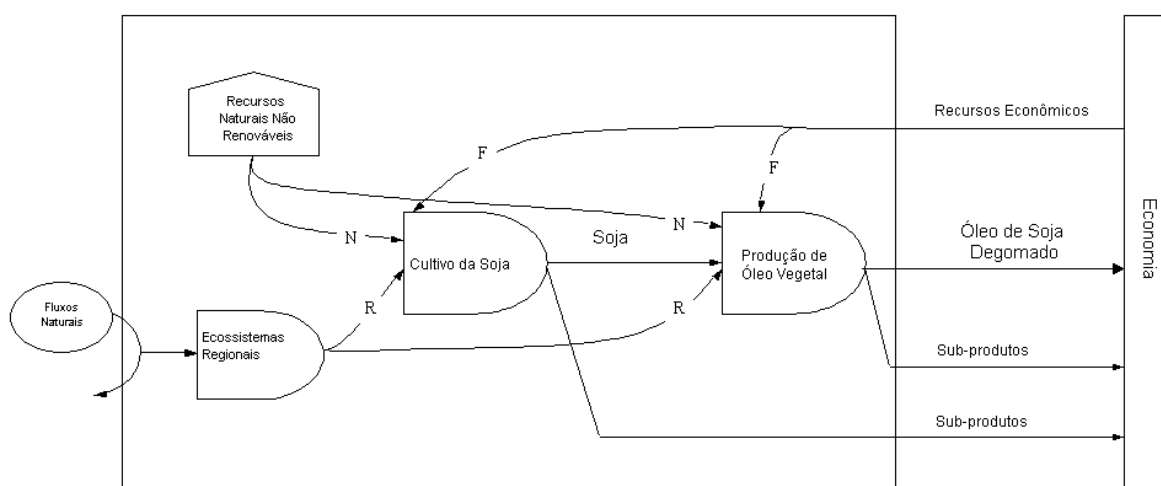


Figura 5.5: Sistema ecológico – industrial da produção de óleo de soja

TABELA 5.8 – CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO ÓLEO DE SOJA NA FASE AGROINDUSTRIAL

| ITENS              | CLASSIFICAÇÃO |
|--------------------|---------------|
| Energia            | F             |
| Solvente           | F             |
| Outros insumos     | F             |
| Manutenção         | F             |
| Equipamentos       | F             |
| Mão de obra        | F             |
| Transporte         | F             |
| Custos Financeiros | F             |
| Outros custos      | F             |

F = Recursos Econômicos

### 5.3.3.1 Memorial de Cálculo

A avaliação emergética da produção de soja realizada por Ortega & Miller [15] considera as três principais formas de produção de soja no Brasil. Os resultados utilizados neste trabalho, apresentados na Tabela 5.10, são referentes ao cultivo da soja com intenso uso de herbicidas, por ser a prática agrícola mais empregada atualmente nas lavouras de soja brasileiras. Além da utilização intensiva de herbicidas, são características deste processo de produção: perda reduzida de solo devido ao plantio direto, uso intensivo de fertilizantes químicos e agrotóxicos, uso moderado de maquinaria, uso mínimo de mão de obra, contaminação do solo e da água, entre outras.

Na fase industrial, os dados considerados são todos provenientes de sistemas econômicos externos e, portanto, são medidos em valores monetários. Assim, na determinação dos fluxos de energia foram utilizados os dados referentes aos custos médios de uma empresa esmagadora de óleo de soja (Tabela 5.7) e a razão *energia/dinheiro* de  $3,70 \times 10^{12}$  *sej/US\$* [15]. Os fluxos anuais calculados, em energia por unidade de área, são apresentados na Tabela 5.9.

TABELA 5.9 – AVALIAÇÃO DE ENERGIA NA FASE AGROINDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DE ÓLEO DE SOJA

| ITENS              | CUSTOS MÉDIOS<br>US\$/ha.ano | ENERGIA<br>sej/ha.ano |
|--------------------|------------------------------|-----------------------|
| Energia            | 2,37                         | $8,78 \times 10^{12}$ |
| Solvente           | 4,84                         | $1,79 \times 10^{13}$ |
| Outros insumos     | 0,79                         | $2,93 \times 10^{12}$ |
| Manutenção         | 0,40                         | $1,46 \times 10^{12}$ |
| Equipamentos       | 1,78                         | $6,58 \times 10^{12}$ |
| Mão de obra        | 3,16                         | $1,17 \times 10^{13}$ |
| Transporte         | 4,25                         | $1,57 \times 10^{13}$ |
| Custos Financeiros | 8,40                         | $3,11 \times 10^{13}$ |
| Outros custos      | 10,7                         | $3,95 \times 10^{13}$ |
| Total              | 36,67                        | $1,36 \times 10^{14}$ |

### 5.3.3.2 Resultados

Os fluxos de energia calculados para a fase agroindustrial da produção de óleo de soja (seção 5.3.3.1) foram contabilizados e somados aos valores obtidos, para a fase agrícola, no estudo de Ortega & Miller [15]. As Tabelas 5.10 e 5.11 apresentam os resultados da análise emergética para a soja e para o óleo de soja. Além dos fluxos de energia, são utilizados na avaliação destes sistemas os indicadores: Transformidade; Razão de Rendimento em Energia (*Emergy Yield Ratio – EYR*); Razão de Investimento em Energia (*Emergy Investment Ratio – EIR*) e Razão de Carregamento Ambiental (*Emergy Loading Ratio – ELR*).

Para o cálculo da transformidade do óleo de soja é necessário conhecer sua energia. Considerando o rendimento da soja (2,8 t/ha) [2], a energia (9421,0 kcal/kg) e a produtividade do óleo de soja (0,2 t por tonelada de soja) [23], a energia do óleo de soja é de  $2,10 \times 10^{10}$  J/ha.ano.

A transformidade indica a quantidade de energia solar necessária para produzir um determinado recurso. A razão de rendimento indica a relação entre a energia produzida pelo sistema (Y) e a energia empregada pela economia (F). A taxa de investimento emergético (EIR) indica a dependência dos sistemas de produção de soja e óleo de soja dos recursos econômicos externos. A razão de carregamento ambiental, mede o impacto do sistema no meio ambiente.

TABELA 5.10 – FLUXOS DE ENTRADA E SAÍDA DO SISTEMA

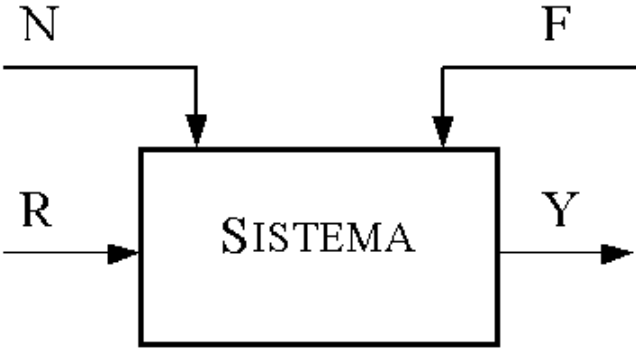
|  |                             |                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| FLUXOS DO SISTEMA                                                                    | ENERGIA<br>(sej/ha.ano)     |                                     |
|                                                                                      | Sistema de Produção da Soja | Sistema de Produção do Óleo de Soja |
| Recursos Naturais Renováveis – $R$                                                   | $1,10 \times 10^{15}$       | $1,10 \times 10^{15}$               |
| Recursos Naturais Não Renováveis – $N$                                               | $1,73 \times 10^{15}$       | $1,73 \times 10^{15}$               |
| Recursos da Economia – $F$                                                           | $9,57 \times 10^{15}$       | $9,70 \times 10^{15}$               |
| Produto $Y = R + N + F$                                                              | $1,24 \times 10^{16}$       | $1,25 \times 10^{16}$               |



TABELA 5.11 – INDICADORES CALCULADOS

| ÍNDICE                           | FÓRMULA                               | SISTEMA            |                          |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|
|                                  |                                       | Produção da Soja   | Produção do Óleo de Soja |
| Transformidade                   | $\tau = \frac{Em}{E} \text{ [sej/J]}$ | $2,10 \times 10^5$ | $5,98 \times 10^5$       |
| Razão de Rendimento em Energia   | $EYR = \frac{Y}{F}$                   | 1,30               | 1,29                     |
| Razão de Investimento em Energia | $EIR = \frac{F}{R + N}$               | 3,38               | 3,43                     |
| Razão de Carregamento Ambiental  | $ELR = \frac{F + N}{R}$               | 10,30              | 10,42                    |

Os valores obtidos para os indicadores  $\tau$ , EYR, EIR e ELR nos sistemas de produção da soja e do óleo vegetal demonstram a grande influência da fase agrícola nos resultados. Como descrito anteriormente, para fase agrícola foram utilizados os resultados da análise realizada por Ortega & Miller [15] que considera as três principais formas de produção de soja no Brasil, classificadas da seguinte forma: *Química*, *Herbívora* e *Orgânica*. A Figura 5.6 faz a comparação entre os valores dos indicadores destas três formas de produção de soja.

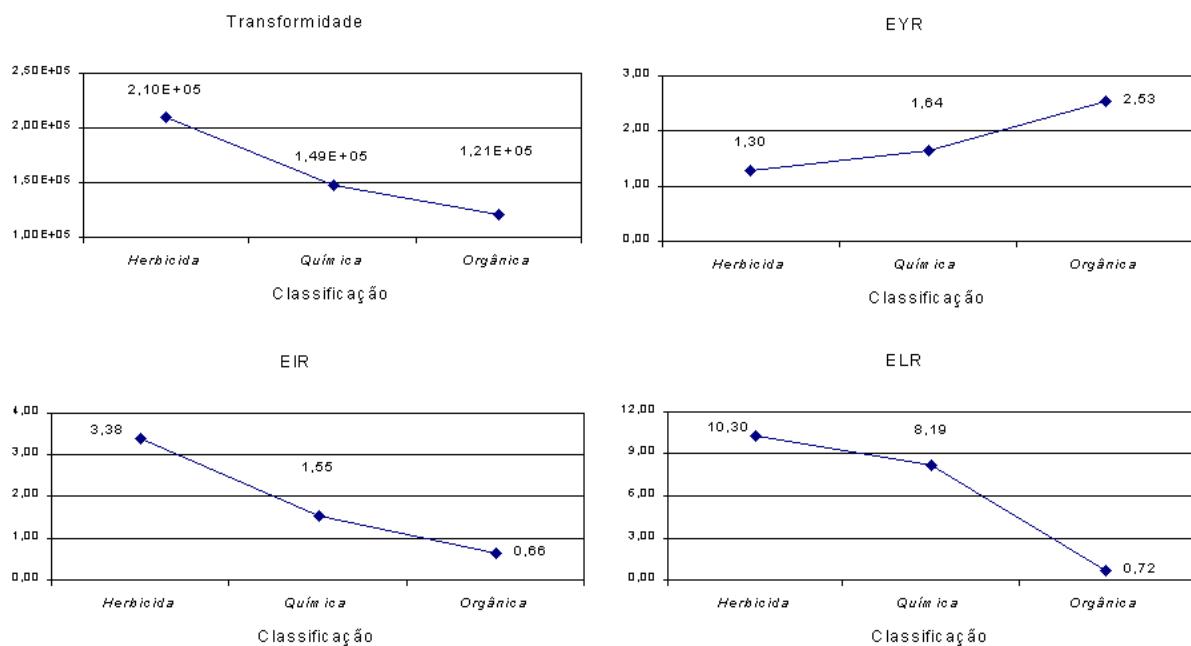


Figura 5.6: Indicadores da soja [15]

Nesta dissertação foram utilizados os dados referentes ao sistema de produção de soja *Herbicida*, por ser o mais empregado no Brasil atualmente. Entretanto, como pode ser observado na Figura 5.6, a produção da soja classificada com *Herbicida* caracteriza-se por precisar de uma maior quantidade de energia solar para ser produzida (maior  $\tau$ ), fornecer um menor retorno do investimento (menor EYR), apresentar grande dependência de recursos econômicos (elevado EIR) e exercer uma elevada pressão sobre o meio ambiente (elevado ELR). Desta forma, a adoção de práticas agrícolas mais adequadas poderia minimizar o impacto da fase agrícola sobre o sistema de produção de óleo vegetal e, consequentemente, sobre o sistema de produção do biodiesel.

## 5.4 PRODUÇÃO DE ÉSTER ETÍLICO DE SOJA

O processo industrial de produção de um éster etílico de óleo de soja, a partir de óleo de soja degomado e álcool etílico anidro, utilizando como catalisador da reação o hidróxido de sódio (NaOH), está esquematizado na Figura 5.7.

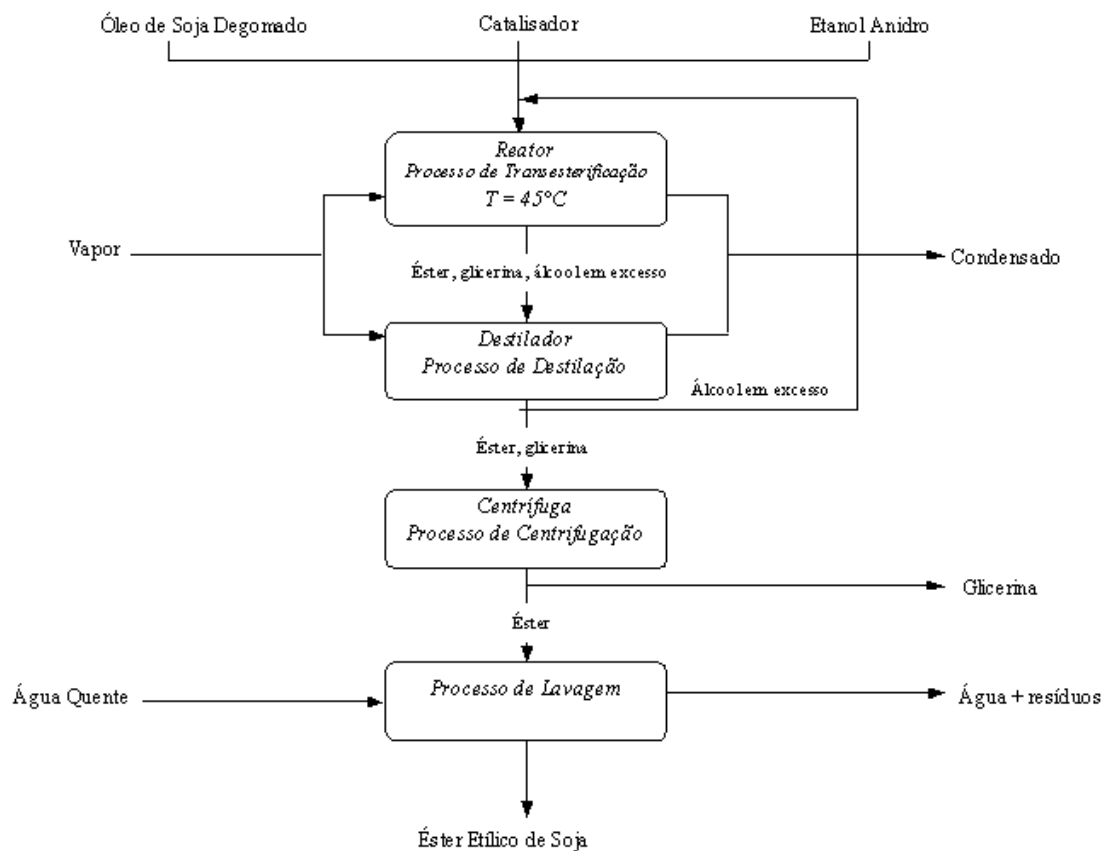


Figura 5.7: Processo industrial de produção do éster etílico de óleo de soja [24]

A quantidade necessária de insumos e os custos para produzir uma tonelada deste biodiesel, considerando uma empresa com capacidade de produção de 400 toneladas por dia [19], estão descritos nas Tabela 5.12 e 5.13 respectivamente.

TABELA 5.12 – QUANTIDADE NECESSÁRIA DE INSUMOS POR TONELADA DE BIODIESEL

| INSUMOS               | QUANTIDADE |
|-----------------------|------------|
| Óleo de soja degomado | 965 kg     |
| Etanol Anidro         | 156 kg     |
| Hidróxido de sódio    | 14,98 kg   |
| Água (*)              | 1250 kg    |
| Vapor                 | 706 kg     |
| Energia elétrica      | 34,5 kWh   |

FONTE: FERRES, J. D. Viabilidade da produção do biodiesel no Brasil empregando óleo de soja. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra. [19]

(\*) BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985. 364p. [24]

TABELA 5.13 – CUSTOS DE PRODUÇÃO DE 1 TONELADA DE BIODIESEL

| ITENS                         | QUANTIDADE | UNIDADE                 |
|-------------------------------|------------|-------------------------|
| Óleo de soja degomado         | 439        | US\$ / t de óleo        |
| Etanol Anidro                 | 321        | US\$ / t de etanol      |
| Hidróxido de sódio            | 740        | US\$ / t de catalisador |
| Vapor                         | 10         | US\$ / t de vapor       |
| Energia elétrica              | 50,43      | US\$ / 1000 kWh         |
| Mão de obra                   | 1,92       | US\$ / t de biodiesel   |
| Custos fixos                  | 7,00       | US\$ / t de biodiesel   |
| Custas adm. / despesas gerais | 5,00       | US\$ / t de biodiesel   |
| Depreciação                   | 10,00      | US\$ / t de biodiesel   |

FONTE : FERRES, J. D. Viabilidade da produção do biodiesel no Brasil empregando óleo de soja. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra. [19]

### 5.4.1 ANÁLISE EMERGÉTICA

O processo produtivo do éster etílico de óleo de soja utiliza como insumos principais o óleo de soja e o etanol. Por serem originários do ciclo agroindustrial, são considerados recursos renováveis. Entretanto, como foi visto nas seções 5.2 e 5.3, a produção destes insumos utiliza recursos, renováveis e não renováveis, provenientes tanto de ecossistemas locais como de sistemas econômicos externos. A análise emergética busca fornecer uma medida de toda a energia utilizada, direta ou indiretamente, por um determinado sistema, na execução de um produto ou de em serviço. Assim, todos os processos envolvidos na produção do biodiesel devem ser considerados na avaliação do sistema. A Figura 5.8 mostra o sistema produtivo completo do éster etílico de soja. Os recursos utilizados pelo sistema produtivo do éster etílico de soja podem ser classificados conforme mostra a Tabela 5.14.

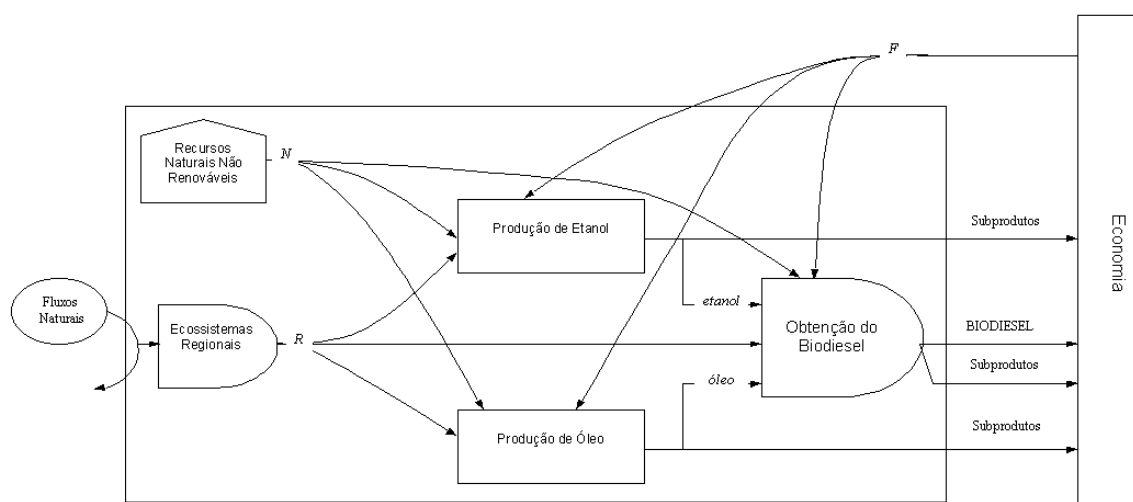


Figura 5.8: Sistema ecológico – industrial da produção do éster etílico de soja

TABELA 5.14 – CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO BIODIESEL

| RECURSOS                             | CLASSIFICAÇÃO |
|--------------------------------------|---------------|
| Óleo de Soja                         | R ; N ; F     |
| Álcool Etílico Anidro                | R ; N ; F     |
| Catalisador (hidróxido de sódio)     | F             |
| Água (lavagem)                       | F             |
| Vapor                                | F             |
| Energia elétrica                     | F             |
| Mão de obra direta                   | F             |
| Equipamentos (depreciação)           | F             |
| Custo fixo de fabricação             | F             |
| Custo administrativo/despesas gerais | F             |

R = Recursos Naturais Renováveis ; N = Recursos Naturais Não Renováveis ; F = Recursos Econômicos

#### 5.4.1.1 Memorial de Cálculo

A avaliação emergética foi realizada considerando as necessidades do sistema produtivo do éster etílico de soja para atender ao Programa B5 que propõe a utilização de misturas de óleo diesel e biodiesel contendo 5% (em volume) deste último, ou seja, considerando uma produção de  $1,30 \times 10^6 \text{ t}_{\text{BIODIESEL}} / \text{ano}$  [19].

Os valores dos fluxos de energia, calculados na seção 5.3, para o óleo de soja degomado são :

$$R = 1,10 \times 10^{15} \text{ sej/ha.ano}$$

$$N = 1,73 \times 10^{15} \text{ sej/ha.ano}$$

$$F = 9,70 \times 10^{15} \text{ sej/ha.ano}$$

Considerando, ainda, a produtividade do óleo de soja (0,53 t/ha) e a quantidade de óleo de soja necessária para produzir uma tonelada de biodiesel, a quantidade total de óleo de soja é de  $1,25 \times 10^6$  toneladas/ano e a área plantada com soja (destinada à produção de biodiesel) é de  $A = 2,36 \times 10^6$  ha. Assim, os fluxos de energia são de:

$$R = 2,59 \times 10^{21} \text{ sej/ano}$$

$$N = 4,09 \times 10^{21} \text{ sej/ano}$$

$$F = 2,29 \times 10^{22} \text{ sej/ano}$$

Da mesma forma, os valores dos fluxos de energia, calculados na seção 5.2, para o álcool etílico são :

$$R = 1,42 \times 10^{15} \text{ sej/ha.ano}$$

$$N = 2,67 \times 10^{15} \text{ sej/ha.ano}$$

$$F = 1,03 \times 10^{16} \text{ sej/ha.ano}$$

A quantidade anual necessária de etanol para atender ao Programa B5 é de  $2,03 \times 10^5$  toneladas; a produtividade média e a densidade do etanol anidro são respectivamente  $5,84 \times 10^3$  l/ha e 0,789 kg/l [19], resultando em:

$$A = 4,40 \times 10^4 \text{ ha (área plantada com cana destinada a produção de biodiesel)}$$

$$R = 6,27 \times 10^{19} \text{ sej/ano}$$

$$N = 1,17 \times 10^{20} \text{ sej/ano}$$

$$F = 4,54 \times 10^{20} \text{ sej/ano}$$

O custo da água para produção do biodiesel foi estimado através da tarifa aplicada pela SANEPAR para categoria industrial (faixa de consumo acima de 10m<sup>3</sup>/mês) de

$$R\$ 23,95 + \left( \frac{R\$ 2,70}{m^3} \text{ excedente a } 10m^3/\text{mês} \right). \text{ Considerando também a quantidade de água}$$

utilizada para produção de cada tonelada de biodiesel e a densidade da água (1000 kg/m<sup>3</sup>), o custo total calculado da água, utilizada no processo de lavagem, foi de  $1,49 \times 10^6$  US\$/ano.

O custo total dos demais itens foi determinado através dos custos por tonelada de biodiesel (Tabela 5.13) e da quantidade, de cada item, necessária para atender o Programa B5 (produção de  $1,30 \times 10^6 t_{BIODIESEL} / \text{ano}$ ).

Os fluxos de emergência foram, então, obtidos através da razão *emergia/dinheiro* de  $3,70 \times 10^{12} \text{ sej/US\$}$  [15]. Os custos e os fluxos de emergência obtidos estão descritos na Tabela 5.15.

TABELA 5.15 – DADOS E FLUXOS DE EMERGIA DOS RECURSOS UTILIZADOS PELO SISTEMA DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL

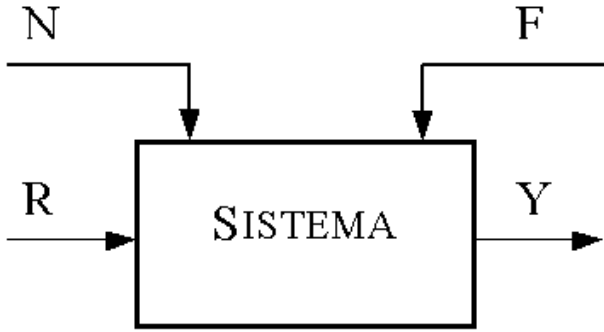
| ITEM                                 | DADOS<br>US\$/ano  | EMERGIA<br>sej/ano    |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Catalisador (hidróxido de sódio)     | $1,44 \times 10^7$ | $5,33 \times 10^{19}$ |
| Água (lavagem)                       | $1,49 \times 10^6$ | $5,52 \times 10^{18}$ |
| Vapor                                | $9,18 \times 10^6$ | $3,40 \times 10^{19}$ |
| Energia elétrica                     | $2,26 \times 10^6$ | $8,37 \times 10^{18}$ |
| Mão de obra direta                   | $2,50 \times 10^6$ | $9,24 \times 10^{18}$ |
| Equipamentos (depreciação)           | $1,30 \times 10^7$ | $4,81 \times 10^{19}$ |
| Custo fixo de fabricação             | $9,10 \times 10^6$ | $3,37 \times 10^{19}$ |
| Custo administrativo/despesas gerais | $6,50 \times 10^6$ | $2,41 \times 10^{19}$ |

### 5.4.1.2 Resultados

Contabilizando todos os fluxos de energia relacionados com a produção do éster etílico de soja e considerando a energia equivalente ao poder calorífico médio do biodiesel (Capítulo 3), os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.16.

A transformidade indica que cada *Joule* de éster etílico de soja necessita de  $5,85 \times 10^5$  *Joules* de energia solar para ser produzido. A taxa de rendimento indica a relação entre a energia produzida pelo sistema e a energia empregada pela economia, que deve ser maior que 1 para assegurar a viabilidade do sistema. A razão de investimento emergético indica a dependência do sistema de produção do éster etílico em relação aos recursos provenientes da economia. A razão de carregamento ambiental mede o impacto causado pelo sistema de produção do biodiesel ao meio ambiente. Os valores elevados de EIR e ELR para o sistema de produção do éster etílico de soja revelam a grande dependência de recursos econômicos e a alta pressão exercida sobre o meio ambiente (influência do processo agrícola).

TABELA 5.16 – RESULTADOS DA ANÁLISE EMERGÉTICA DO SISTEMA PRODUTIVO DO BIODIESEL

|  |                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| FLUXOS DE ENERGIA DO SISTEMA                                                         |                               |
| Recursos Naturais Renováveis – $R$                                                   | $2,65 \times 10^{21}$ sej/ano |
| Recursos Naturais Não Renováveis – $N$                                               | $4,20 \times 10^{21}$ sej/ano |
| Recursos da Economia – $F$                                                           | $2,35 \times 10^{22}$ sej/ano |
| Produto $Y = R + N + F$                                                              | $3,04 \times 10^{22}$ sej/ano |
| INDICADORES                                                                          |                               |
| Transformidade $\tau = \frac{Em}{E}$                                                 | $5,85 \times 10^5$ sej/J      |
| Razão de Rendimento em Energia $EYR = \frac{Y}{F}$                                   | 1,29                          |
| Razão de Investimento em Energia $EIR = \frac{F}{R + N}$                             | 3,44                          |
| Razão de Carregamento Ambiental $ELR = \frac{F + N}{R}$                              | 10,47                         |

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mencionado anteriormente, a emissão de poluentes não é considerada pela metodologia emergética, tornando-a incompleta para a análise de sistemas industriais e agrícolas. Os resíduos gerados por estes sistemas estão diretamente relacionados à poluição ambiental e, portanto, não podem ser desprezados. No Capítulo 6, a metodologia integrada de análise ambiental, que considera as emissões de poluentes, será aplicada ao mesmo sistema de produção do éster etílico de soja analisado neste capítulo.

## 5.6 BIBLIOGRAFIA

- [1] NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S.; TROSSERO, M. A. & FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2000;
- [2] BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>;
- [3] UNICA. União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 27 out. 2003;
- [4] MARAFANTE, L. J. **Tecnologia da fabricação do álcool e do açúcar**. São Paulo: Ícone, 1993;
- [5] OMETTO, A. R.; ROMA, W. N. L. & SOUZA, M. P. de. Environmental Management of fuel alcohol coupled with energy production, based on life cycle impact analysis. In: **International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems**, 16<sup>th</sup>, 2003, Denmark. 1 CD-ROM;
- [6] MEIRELLES, C. et al. **Manual de segurança na cultura da cana-de-açúcar**. São Paulo, FUNDACENTRO, 1983;
- [7] BORRERO, M.A.V.; PEREIRA, J.T.V. & MIRANDA, E.E. An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.25, p. 287-299, 2003;
- [8] SÃO PAULO. Decreto n. 47.700, de 11 de março de 2003. Regulamenta a Lei n.11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana de açúcar e dá providências correlatas. Publicado na Casa Civil, aos 11 de março de 2003;
- [9] MOREIRA, J. R. & GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, v.27, p. 229-245, 1999;
- [10] MACEDO, I. de C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996). **Biomass and Bioenergy**, v.14, p.77-81, 1998;



- [11]ORTEGA E. & MILLER M. **Check list para análise emergética de agroecossistemas**. Disponível em:<<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C12-checklist.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [12]BASTIANONI, S. & MARCHETTINI, N. Ethanol production from biomass: analysis of process efficiency and sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v.11, p.411-418, 1996;
- [13]COELHO, O.; ORTEGA E. & COMAR, V. **Balanço de Energia do Brasil**. Disponível em:<<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C05-Brasil-COC.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [14]ORTEGA, E. **Tabela de Transformidades**. Revisão 2002. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm>> Acesso em: 19 fev. 2003;
- [15]ORTEGA E. & MILLER M. **Avaliação ecossistêmica – emergética de processos agrícolas e agroindustriais**. Estudo de caso: a produção da soja. Disponível em:<[http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C13-Soja\\_PA.pdf](http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C13-Soja_PA.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [16]ORTEGA, E. et al. **Manual de Cálculo Emergético**. Revisão 2002. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/manual.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2003;
- [17]BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Dimensão Ambiental – Terra;
- [18]ODUM, H. T. **Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making**. New York: John Wiley & Sons, 1996;
- [19]FERRES, J. D. Viabilidade da produção do biodiesel no Brasil empregando óleo de soja. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Palestra. 2 CD-ROM;
- [20]**A CULTURA da soja - 1**: Rio Grande do Sul - Santa Catarina - Paraná. Rio de Janeiro: Globo, 1988;
- [21]MORETTO, E. & FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 1998. Cap. IV;
- [22]PARANÁ. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social– IPARDES. **Estratégias técnico-econômicas à indústria de processamento de oleaginosas no Estado do Paraná**. Curitiba, 1986. Cap. 2 e 6;
- [23]BOCCARDO, R. C. **Panorama Atual do Biodiesel**. Curitiba, 2003. 68f. Monografia (Especialização em Motores e Combustíveis) – PUC-PR, CEFET-PR, UFPR e UFSC;
- [24]BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985.

## **6 METODOLOGIA INTEGRADA DE ANÁLISE AMBIENTAL APLICADA AO BIODIESEL**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, a metodologia integrada de análise ambiental é utilizada para avaliar a sustentabilidade do sistema de produção do éster etílico de soja, considerando as interações entre o sistema econômico e os sistemas naturais.

O meio ambiente serve ao mesmo tempo como fonte e como depósito para os sistemas econômicos, pois da mesma forma que fornece recursos, recebe os rejeitos gerados por estes sistemas. A análise emergética considera somente a função de fonte, isto é, o meio ambiente como fornecedor de recursos para os sistemas produtivos. A metodologia integrada de análise ambiental, proposta por Bakshi [1] e por Ulgiati & Brown [2], considera, na avaliação de sustentabilidade de um sistema de produção, ambas as funções (fornecedor e receptor) desempenhadas pelo meio ambiente.

Na avaliação do sistema de produção do éster etílico de soja, são consideradas como substâncias poluentes somente os resíduos gasosos (emissões de gases na atmosfera). Tanto os resíduos líquidos (glicerina, vinhaça, solvente recuperado, etc.) quanto os sólidos (ponta, bagaço, torta de filtro, palha, casca, farelo, gomas, etc.) são reaproveitados pelo próprio sistema produtivo ou por outros setores da economia e, portanto, podem ser considerados subprodutos e não resíduos do sistema.

No último século houve um aumento considerável da concentração atmosférica dos chamados gases do efeito estufa – dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), clorofluorcarbonos (CFCs), hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), entre outros – devido às emissões oriundas das atividades humanas [3]. O aumento na concentração de gases de efeito estufa pode conduzir a uma elevação da temperatura da superfície terrestre, pois altera o balanço da energia transferida entre a Terra e o espaço. O planeta Terra absorve e reflete naturalmente a radiação solar, além de emitir radiação térmica para o espaço. Concentrações excessivas dos gases do efeito estufa provocam a retenção de parte da energia que deveria regressar ao espaço, promovendo o aquecimento da atmosfera terrestre, além de outras alterações climáticas [4]. A Tabela 6.1 apresenta a variação ocorrida na concentração de alguns gases, desde o período pré-industrial até o ano de 1998, bem como a razão média de aumento da concentração destes gases, avaliada para o período de 1990 a 1999. As unidades de concentração utilizadas são: partes por milhão (ppm), partes por bilhão (ppb) e partes por trilhão (ppt).

TABELA 6.1 – CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE GASES CAUSADORES DO EFEITO ESTUFA

| ATMOSFERA TERRESTRE    | $CO_2$  | $CH_4$    | $N_2O$     | $SF_6$   | $CF_4$  |
|------------------------|---------|-----------|------------|----------|---------|
| Período Pré-Industrial | 278 ppm | 0,700 ppm | 0,270 ppm  | 0        | 40 ppt  |
| Ano 1998               | 365 ppm | 1,745 ppm | 0,314 ppm  | 4,2 ppt  | 80 ppt  |
| Taxa de Aumento Anual  | 1,5 ppm | 0,007 ppm | 0,0008 ppb | 0,24 ppt | 1,0 ppt |

FONTE: U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values**. April, 2002.[4]

O dióxido de carbono é uma importante fonte promotora do efeito estufa, tendo sua concentração na atmosfera sofrido, durante o último século, uma elevação de 31%, principalmente devido às emissões provenientes das atividades humanas [4][5]. Assim, em razão da relevância ambiental, foi escolhida para avaliação do impacto das emissões do sistema de produção do biodiesel, a categoria de impacto ambiental *efeito estufa*, sendo as emissões do sistema avaliadas em termos de  $CO_2$  equivalentes.

Os gases de efeito estufa emitidos durante o ciclo de vida de um determinado produto podem ser convertidos em quantidades de  $CO_2$  equivalentes através da Equação 6.1, que considera a quantidade e o potencial de aquecimento global (*GWP*– *Global Warming Potential*) dos gases descarregados na atmosfera [4].

$$CO_2 \text{ equivalentes } [Tg] = \text{Gás do Efeito Estufa } [Gg] \times GWP \times \left( \frac{1 [Tg]}{1000 [Gg]} \right) \quad (6.1)$$

O potencial de aquecimento global pode ser entendido como uma medida da intensidade do impacto ambiental *efeito estufa* de um determinado gás. O dióxido de carbono ( $CO_2$ ), por ser o gás de referência, possui GWP igual a um. A Tabela 6.2 apresenta o GWP de alguns gases de efeito estufa, quanto maior o valor do GWP, maior a interferência do gás no balanço da energia transferida entre a Terra e o espaço e, conseqüentemente, maior sua influência no efeito estufa.

Na avaliação de impacto ambiental *efeito estufa* de um determinado produto, são computadas as emissões das etapas do ciclo de vida, ou seja, as emissões do sistema produtivo e as relacionadas ao uso do produto [6].

TABELA 6.2 – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE ALGUNS GASES

| GÁS                                   | GWP   |
|---------------------------------------|-------|
| Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) | 1     |
| Metano (CH <sub>4</sub> )             | 21    |
| Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)      | 310   |
| CF <sub>4</sub>                       | 6500  |
| SF <sub>6</sub>                       | 23900 |

FONTE: U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values**. April, 2002. [4]

## 6.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AO CASO DO BIODIESEL

Neste capítulo, os fluxos do sistema produtivo do éster etílico de soja são expressos em termos de emergia. A transformidade ( $\tau$ ), apresentada na Equação 6.2, relaciona a emergia com a exergia do éster etílico de soja, ou seja, relaciona a quantidade total de energia utilizada, direta ou indiretamente, pelo sistema na produção do biodiesel (fluxos de entrada do sistema) com a quantidade de energia deste biocombustível que pode ser convertida em trabalho útil (potencial do fluxo de saída do sistema em relação ao meio ambiente) [1].

$$Em [sej/ano] = \tau [sej/J] \times Ex [J/ano] \quad (6.2)$$

A metodologia integrada de análise ambiental, além dos elementos considerados pela análise de emergia, contabiliza também os fluxos de emergia relacionados às emissões de poluentes. Os fluxos de emergia relacionados à produção do éster etílico de soja são os seguintes:

- (a) Recursos naturais renováveis ( $R_1$ ) – são os fluxos naturais provenientes da energia solar direta, da energia gravitacional da lua e da energia do ciclo geológico, além dos produtos e serviços dos ecossistemas locais que alimentam o sistema produtivo [1][2][7];
- (b) Serviços ambientais destinados a dissipação das emissões ( $R_2$ ) – contabiliza o trabalho empregado pelos sistemas naturais locais para dissipar os poluentes emitidos durante o ciclo de vida do biodiesel [1][2];

- (c) Impacto ecológico das emissões ( $R_3$ ) – avalia o dano causado ao meio ambiente, pelas emissões de poluentes do sistema de produção do biodiesel, através da quantidade de exergia armazenada perdida pelos ecossistemas afetados pela poluição [1]. O impacto ecológico das emissões não será considerado neste trabalho, devido à falta de informações acerca dos ecossistemas afetados;
- (d) Recursos naturais não renováveis (N) – compreendem os recursos naturais provenientes dos sistemas naturais locais, consumidos pelo sistema de produção a taxas acima da velocidade de reposição destes pelo meio ambiente [1][2][7];
- (e) Recursos provenientes da economia ( $F_1$ ) – contabiliza todos os fluxos provenientes de sistemas externos utilizados pelo sistema na produção do biodiesel. Compreende materiais, combustíveis, bens de capital, serviços e mão de obra [1][7];
- (f) Investimento econômico utilizado para abater, dispor ou reciclar substâncias poluentes produzidas pelo sistema produtivo ( $F_2$ ). Compreende os recursos econômicos (materiais e/ou serviços) empregados para reduzir o potencial de prejuízo ambiental dos resíduos do sistema [2];
- (g) Impacto econômico das emissões ( $F_3$ ) – busca mensurar o impacto econômico causado por substâncias poluentes emitidas pelo sistema em análise. Estas substâncias possuem potencial lesivo às sociedades humanas, atingindo-as de forma direta (doenças) ou indireta (mudanças climáticas, redução dos recursos naturais, etc). Assim, o impacto econômico das emissões propõe fornecer uma estimativa das perdas econômicas vinculadas à emissão de substâncias tóxicas na atmosfera terrestre [1].

O fluxo de saída do sistema, ou seja, o produto éster etílico de soja, é obtido a partir dos fluxos de entrada, conforme mostra a Equação 6.3 [1][2][7].

$$\text{Produto } Y = R + N + F \quad (6.3)$$

$$\text{onde: } R = R_{\text{máximo}} [R_1 ; R_2] \quad ; \quad F = F_1 + F_2$$

Os indicadores utilizados na avaliação do sistema de produção do biodiesel pela Metodologia Integrada de Análise Ambiental estão relacionados na Tabela 2.3.

## 6.2.1 MEMORIAL DE CÁLCULO

### 6.2.1.1 Avaliação de Impacto Ambiental Efeito Estufa

Os valores das emissões de  $CO_2$ equivalentes do sistema de produção do biodiesel utilizados neste estudo correspondem ao do éster metílico de colza, visto que não foram encontrados dados específicos para o éster derivado da soja. Tanto o biodiesel derivado da colza como o da soja são agrocombustíveis que têm por finalidade substituir o mesmo combustível fóssil (o óleo diesel), além disso, as semelhanças entre seus sistemas de produção são bastante acentuadas (uso da terra, emprego de herbicidas e outros agentes de proteção, transporte e processos industriais em geral).

Os estágios referentes ao ciclo de vida do biodiesel são: produção da oleaginosa, produção do óleo, fabricação do biodiesel e uso, além do transporte entre as diversas fases do ciclo de vida. A avaliação das emissões do éster etílico de soja deve computar, ainda, as emissões originárias das fases agrícola e agro-industrial do sistema de produção do álcool etílico, que não podem ser descartadas devido à quantidade significativa de gases ( $CO_2$ , CO,  $O_3$ ,  $SO_2$ , hidrocarbonetos) emitidos, principalmente, durante a queima da cana de açúcar na pré-colheita.

A Tabela 6.3 apresenta os valores de  $CO_2$ equivalentes, expressos em unidades de massa por energia, emitidos durante o ciclo de vida do óleo diesel e o do biodiesel.

TABELA 6.3 – EMISSÕES DOS CICLOS DE VIDA DO ÓLEO DIESEL E DO BIODIESEL

| CICLO DE VIDA |                                                                                                 | $CO_2 eq.$ | UNIDADE                    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------|
| BIODIESEL     | Produção da oleaginosa, do óleo vegetal e do éster, transporte e distribuição <sup>(1)(2)</sup> | 31,31      | kg/GJ <sub>Biodiesel</sub> |
|               | Produção da cana de açúcar e do álcool etílico <sup>(3)</sup>                                   | 31,98      | kg/GJ <sub>Etanol</sub>    |
|               | Uso <sup>(2)</sup>                                                                              | 5,06       | kg/GJ <sub>Biodiesel</sub> |
| ÓLEO DIESEL   | Extração, transporte, refino e distribuição <sup>(1)</sup>                                      | 6,96       | kg/GJ <sub>Diesel</sub>    |
|               | Uso <sup>(4)</sup>                                                                              | 74,00      | kg/GJ <sub>Diesel</sub>    |

FONTE: (1) LEWIS, C. A. **Fuel and Energy Production Emission Factors**. MEET Project: Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport. Deliverable n°20, 1997. [6]

(2) KALTSCHMITT, M. ; REINHARDT, G. A. & STELZER T. Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects. **Biomass and Bioenergy**, v.12, p.121-134, 1997. [19]

(3) BASTIANONI, S. & MARCHETTINI, N. Ethanol production from biomass: analysis of process efficiency and sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v.11, p.411-418, 1996. [9]

(4) ÁLVARES JR., O. DE M. & LINKE, R. R. A. **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo – CETESB. [10]

A avaliação de impacto ambiental *efeito estufa* do óleo diesel engloba as emissões do sistema produtivo (extração, transporte, refino e distribuição) e as da frota de veículos movidos a diesel. Entretanto, na avaliação do biodiesel somente as emissões provenientes do sistema produtivo (desde as fases agrícolas até a distribuição do biodiesel) são computadas. As emissões de  $CO_2$  concernentes ao uso deste biocombustível (geradas durante a combustão) não são contabilizadas como gases do efeito estufa, visto que uma quantidade equivalente a estas emissões é reabsorvida, por processo de fotossíntese, durante o crescimento das safras das espécies vegetais utilizadas para produzir o etanol e o óleo de soja [5][6][8].

Considerando, ainda, no cálculo das emissões de  $CO_2 eq./ano$ : a quantidade de  $1,30 \times 10^9 \text{ kg}/ano$  (equivalente a 5% do consumo de óleo diesel no Brasil) para ambos os combustíveis; a quantidade anual de etanol necessária ao processo de transesterificação ( $2,03 \times 10^8 \text{ kg}_{Etanol}/ano$ ) e o potencial energético dos combustíveis ( $30,8 \text{ MJ}/\text{kg}_{Etanol}$ ;  $40,0 \text{ MJ}/\text{kg}_{Éster \text{ etílico de soja}}$ ;  $42,5 \text{ MJ}/\text{kg}_{Óleo Diesel}$ ). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.1.

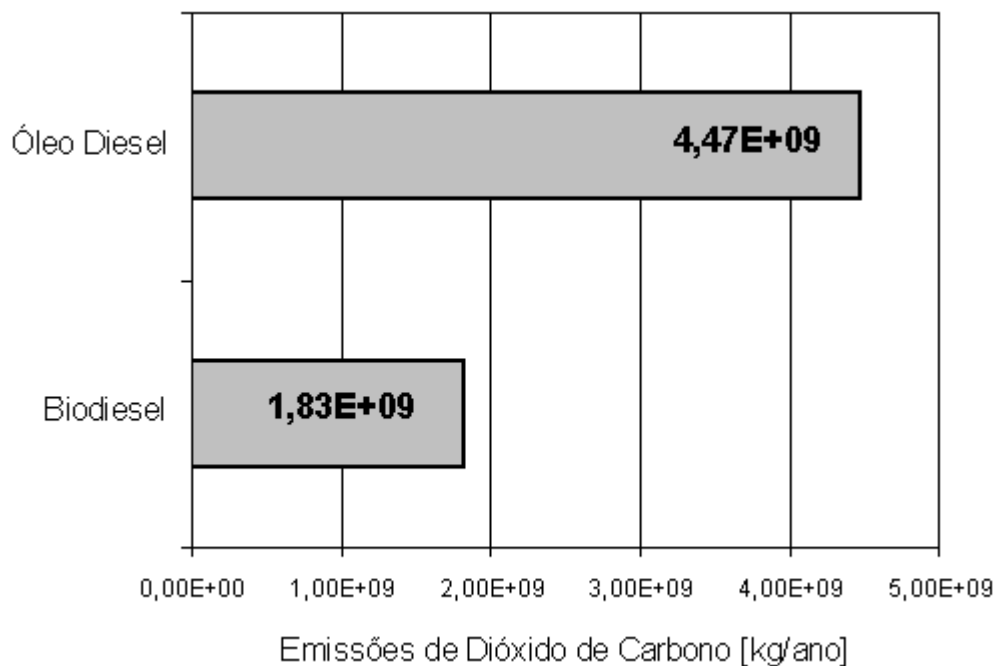


Figura 6.1 : Avaliação das emissões do ciclo de vida do óleo diesel e do biodiesel

A comparação entre as emissões de gases do efeito estufa dos ciclos de vida do biodiesel e do óleo diesel permite verificar que, para uma mesma quantidade de combustível, o óleo diesel emite quase 2,5 vezes mais  $CO_2eq.$  que o seu substituto renovável. Além disso, a progressiva eliminação do uso do fogo na pré-colheita da cana de açúcar tende a reduzir a produção de gases do efeito estufa do ciclo de vida do biodiesel.

#### 6.2.1.2 Cálculo de $R_2$

Os serviços ambientais utilizados para dissipação das emissões de poluentes ( $R_2$ ) podem ser quantificados através da quantidade de energia (renovável) utilizada no processo de diluição dos resíduos. Para o caso das emissões de  $CO_2eq.$  é necessário avaliar a quantidade de ar, em unidade de massa, necessária para dispersar as emissões do gás até um determinado nível de concentração, que pode ser:

- (i) Nível de concentração aceitável pelos limites legais;
- (ii) Nível de concentração médio na atualidade ou
- (iii) Nível de concentração médio do período pré-industrial.



Quanto menor a concentração adotada como referência, maior o trabalho ambiental realizado na dissipação das emissões. A massa de ar pode ser calculada através da Equação 6.4, onde  $z_{CO_2}$  é a fração mássica de dióxido de carbono na atmosfera terrestre [1][2].

$$m_{ar} \left[ \frac{kg_{ar}}{ano} \right] = \frac{1}{z_{CO_2} \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_{ar}} \right]} \times \text{Emissões de } CO_2 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{ano} \right] \quad (6.4)$$

O valor de  $R_2$  é determinado através da energia cinética da massa de ar empregada na dissipação das emissões e da transformidade do vento, conforme a Equação 6.5 [1][2].

$$R_2 \left[ \frac{sej}{ano} \right] = \left( \frac{m_{ar} \times v_{vento}^2}{2} \right) \left[ \frac{J}{ano} \right] \times \tau_{vento} \left[ \frac{sej}{J} \right] \quad (6.5)$$

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar através da Resolução nº3 de 26 de junho de 1990, que inclui padrões primários e secundários. Os padrões primários constituem os níveis máximos toleráveis e os padrões secundários os níveis desejados de concentração de poluentes atmosféricos [11]. A Tabela 6.4 apresenta os padrões nacionais de qualidade do ar.

Os padrões brasileiros de qualidade do ar estão baseados, portanto, em gases com tempo de vida na atmosfera relativamente pequeno. Estes gases, também chamados de gases de vida curta, compreendem o vapor d'água, o monóxido de carbono, o ozônio, os  $NO_x$ , o dióxido de enxofre, entre outros. Embora tenham influência sobre o efeito estufa, por permanecerem na atmosfera durante um espaço de tempo relativamente curto, é muito difícil quantificar seu potencial de impacto ambiental *efeito estufa* e, portanto, geralmente não são atribuídos valores de GWP para estes gases, inviabilizando a utilização desta norma no cálculo de  $R_2$ . Assim, foram adotadas como referência as concentrações médias de dióxido de carbono dos níveis (ii) e (iii) descritos anteriormente.

TABELA 6.4 – PADRÕES NACIONAIS DE QUALIDADE DO AR

| POLUENTES                      | TEMPO DE AMOSTRAGEM    | PADRÃO PRIMÁRIO<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | PADRÃO SECUNDÁRIO<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Partículas totais em suspensão | 24 horas               | 240                                             | 150                                               |
|                                | Média Geométrica Anual | 80                                              | 60                                                |
| Dióxido de enxofre             | 24 horas               | 365                                             | 100                                               |
|                                | Média Aritmética Anual | 80                                              | 40                                                |
| Monóxido de carbono            | 1 hora                 | 40.000 (35 ppm)                                 | 40.000 (35 ppm)                                   |
|                                | 8 horas                | 10.000 (9 ppm)                                  | 10.000 (9 ppm)                                    |
| Ozônio                         | 1 hora                 | 160                                             | 160                                               |
| Fumaça                         | 24 horas               | 150                                             | 100                                               |
|                                | Média Aritmética Anual | 60                                              | 40                                                |
| Partículas inaláveis           | 24 horas               | 150                                             | 150                                               |
|                                | Média Aritmética Anual | 50                                              | 50                                                |
| Dióxido de nitrogênio          | 1 hora                 | 320                                             | 190                                               |
|                                | Média Aritmética Anual | 100                                             | 100                                               |

FONTE: LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2ª. Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.[11]

Considerando os valores utilizados no Capítulo 5 para a velocidade e para a transformidade do vento de 2,7 m/s e 1496 sej/J respectivamente, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.5. O trabalho ambiental necessário para dissipar as emissões de  $\text{CO}_2eq.$  ao nível da concentração na atmosfera do período pré-industrial é cerca de 34% maior que o trabalho realizado pela natureza para reduzir a concentração deste gás até os níveis encontrados na atualidade.

TABELA 6.5 – CÁLCULO DE  $R_2$ 

| ATMOSFERA TERRESTRE                  | $z_{\text{CO}_2} \left[ \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{kg}_{\text{ar}}} \right]$ | $R_2 \left[ \frac{\text{sej}}{\text{ano}} \right]$ |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Período Pré-Industrial – nível (iii) | $4,24 \times 10^{-4}$                                                                  | $2,36 \times 10^{16}$                              |
| Atual – nível (ii)                   | $5,67 \times 10^{-4}$                                                                  | $1,76 \times 10^{16}$                              |

### 6.2.1.3 Cálculo de $F_3$

O impacto econômico das emissões ( $F_3$ ) pode ser quantificado através da estimativa das perdas, em valores monetários, relacionadas ao aquecimento global da atmosfera da Terra. Assim, as perdas relativas ao impacto econômico do aquecimento global de  $2,5^\circ\text{C}$ , são estimadas em cerca de 1,4% [12] do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, que em 2002 foi de R\$  $1,346 \times 10^{12}$  [13], resultando em R\$  $1,88 \times 10^{10}$  (US\$  $6,41 \times 10^9$ ) de perdas. Estas podem ser convertidas em valores de energia através da Equação 6.6, utilizando a razão *energia/dinheiro* de  $3,70 \times 10^{12} \text{ sej/US\$}$  [16]. O resultado obtido para o custo das perdas relacionadas ao efeito estufa, em unidades de energia, é de  $2,37 \times 10^{22} \text{ sej/ano}$ .

$$\text{Custo das perdas (efeito estufa)} \left[ \frac{\text{sej}}{\text{ano}} \right] = 1,4\% \text{PIB}_{\text{Brasil}} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right] \times \frac{\text{energia}}{\text{dinheiro}} \left[ \frac{\text{sej}}{\text{US\$}} \right] \quad (6.6)$$

A transformidade do impacto econômico das emissões ( $\tau_{F_3}$ ) é, então, obtida através da divisão deste custo, em sej/ano, pelo total de  $\text{CO}_2\text{equivalentes}$  emitidos no Brasil durante o período de um ano ( $7,580 \times 10^{11} \text{ CO}_2\text{eq./ano}$ ) [3]. Finalmente, o impacto econômico das emissões ( $F_3$ ), relativo às emissões do sistema de produção do biodiesel, é obtido multiplicando  $\tau_{F_3}$  pela quantidade de  $\text{CO}_2\text{eq.}$  emitida pelo sistema produtivo durante o ano, conforme mostra a Equação 6.7 [1]. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.6.

$$F_3 \left[ \frac{\text{sej}}{\text{ano}} \right] = \text{emissões do sistema} \left[ \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq.}}}{\text{ano}} \right] \times \tau_{F_3} \left[ \frac{\text{sej}}{\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq.}}} \right] \quad (6.7)$$

TABELA 6.6 – CÁLCULO DE  $F_3$

| ITENS                                      | VALOR                 | UNIDADE                                          |
|--------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Emissões do Sistema Produtivo do Biodiesel | $1,83 \times 10^9$    | $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq.}} / \text{ano}$ |
| Transformidade $-\tau_{F_3}$               | $3,13 \times 10^{10}$ | $\text{sej} / \text{kg}_{\text{CO}_2}$           |
| Impacto Econômico das Emissões $-F_3$      | $5,72 \times 10^{19}$ | $\text{sej} / \text{ano}$                        |

Os valores de  $R_1$ ,  $N$  e  $F$  são iguais aos de  $R$ ,  $N$  e  $F$  calculados no Capítulo 5, sendo que

$$F = F_1 + F_2.$$

## 6.2.2 RESULTADOS

Os fluxos de energia obtidos através da Metodologia Integrada de Análise Ambiental para o sistema produtivo de éster etílico de soja são apresentados na Tabela 6.7.

Os gases emitidos pelo sistema de produção do biodiesel não alteram de forma significativa os indicadores de avaliação do sistema, como pode ser verificado na Tabela 6.8. Somente o índice de carregamento ambiental (ELR) sofreu leve aumento em relação ao valor obtido no Capítulo 5. Além disso, a quantidade de gases de efeito estufa emitidos na atmosfera durante o ciclo de vida do biodiesel é expressivamente menor que a quantidade de gases de efeito estufa lançados na atmosfera pelo seu combustível fóssil equivalente (óleo diesel).

TABELA 6.7 – RESULTADOS DA ANÁLISE DO SISTEMA PRODUTIVO DO BIODIESEL

| FLUXOS DE ENERGIA DO SISTEMA       | VALOR                         |
|------------------------------------|-------------------------------|
| $R_1$                              | $2,65 \times 10^{21}$ sej/ano |
| $R_2$                              | $2,35 \times 10^{16}$ sej/ano |
| $R_3$                              | Não foi avaliado              |
| $R = R_{\text{máximo}} [R_1; R_2]$ | $2,65 \times 10^{21}$ sej/ano |
| $N$                                | $4,20 \times 10^{21}$ sej/ano |
| $F = F_1 + F_2$                    | $2,35 \times 10^{22}$ sej/ano |
| $F_3$                              | $5,72 \times 10^{19}$ sej/ano |
| Produto $Y$                        | $3,04 \times 10^{22}$ sej/ano |

TABELA 6.8 – INDICADORES OBTIDOS PARA O SISTEMA PRODUTIVO DO BIODIESEL

| INDICADORES                   | VALOR                            |
|-------------------------------|----------------------------------|
| $\tau = \frac{Em}{Ex}$        | $5,85 \times 10^5 \text{ sej/J}$ |
| $EYR = Y/(F + F_3)$           | 1,29                             |
| $EIR = F/(R + N)$             | 3,44                             |
| $ELR = (F + F_3 + N + R_3)/R$ | 10,50                            |
| Sustentabilidade = $EYR/ELR$  | 12%                              |

A forte dependência dos recursos econômicos pode ser observada em todos os indicadores obtidos na avaliação do sistema de produção do éster etílico de soja. As fases agrícolas, em especial a da cultura da soja, têm expressiva influência nestes resultados. Neste último século, a intensidade de uso de recursos industriais na agricultura aumentou muito, visto que os sistemas agrícolas passaram a depender de diversos insumos (fertilizantes, pesticidas, herbicidas, etc) e de tecnologia de ponta para assegurar a produtividade das lavouras. Uma parte significativa destes recursos econômicos depende, direta ou indiretamente, da disponibilidade global de combustíveis fósseis e, também, da provisão de alguns minerais, ambos recursos não renováveis. De acordo com o trabalho de Ortega & Miller [16], a prática agrícola mais empregada no cultivo da soja brasileira é caracterizada pelo intenso uso de herbicidas, fertilizante e agrotóxicos, além da utilização moderada de maquinário agrícola. A utilização excessiva ou inadequada destes recursos econômicos, embora a curto prazo possa assegurar a produtividade agrícola, eleva em demasia os custos de produção e causa prejuízos intensos ao meio ambiente [15][17], como pode ser observado através dos indicadores aqui apresentados.

No estudo de Ortega & Miller [16] a agricultura orgânica também é analisada. Esta prática é caracterizada por não utilizar agrotóxicos e herbicidas no manejo da cultura e, também, por empregar como fertilizante produtos químicos não solúveis, restos vegetais (biomassa) ou esterco animal, reduzindo muito a intensidade de uso de recursos econômicos (não renováveis) nas lavouras de soja e, também, a pressão sobre meio ambiente. Uma possível solução, para reduzir os custos de produção e minimizar os prejuízos ambientais,

seria utilizar um método misto (uma combinação de práticas agrícolas) no manejo da cultura da soja [16][17].

A transformidade de um determinado produto depende dos processos envolvidos na execução deste, podendo variar muito de acordo com as tecnologias e processos empregados na fabricação destes produtos. Assim, a transformidade pode ser utilizada para confrontar diferentes sistema de produção que fabricam um mesmo produto, auxiliando na escolha da alternativa mais adequada. No caso do éster etílico de soja, produzido pelo sistema definido neste trabalho, a transformidade indica que são necessários  $5,85 \times 10^5$  *Joules* de energia solar para obter uma unidade de trabalho útil (em *Joules*) de biodiesel. Caso tivessem sido utilizados os dados da soja orgânica [16], a transformidade obtida para o biodiesel seria de cerca de  $2,38 \times 10^5$  *sej/J*, ou seja, para conseguir uma mesma quantidade de trabalho útil, seria necessário uma quantidade de energia solar muito menor ( $\approx 2,5$  vezes menor).

O índice EYR representa a razão entre a energia total incorporada e a energia investida pela economia. Pode ser utilizada para avaliar o retorno do investimento econômico no sistema, ou seja, se o biodiesel fornece mais energia que a quantia investida nele pela economia. Portanto, para ser viável, a razão de rendimento em energia deve ser maior que a unidade ( $EYR > 1$ ). O baixo valor de EYR (1,29) caracteriza a elevada dependência do sistema de produção do éster etílico de soja em relação aos insumos econômicos.

Os valores obtidos para EIR e ELR também refletem a grande dependência de recursos econômicos do sistema produtivo do biodiesel. A razão de investimento em energia,  $EIR = \frac{\text{recursos econômicos (possuem valor monetário)}}{\text{recursos naturais (gratuitos)}}$ , indica a proporção entre os investimentos da economia e as contribuições ambientais, ou seja, a quantidade de energia empregada pela economia para explorar uma unidade de recurso local (renovável e não renovável). Um baixo valor de EIR, sugere um uso reduzido de recursos econômicos pelo sistema em relação às contribuições recebidas do meio ambiente. Como as contribuições ambientais são gratuitas, quanto menor for o valor de EIR, mais competitivo é o sistema.

Uma razão de carregamento ambiental elevada, como a obtida para o sistema de produção do éster etílico de soja ( $ELR = 10,50$ ), pressupõe um elevado nível tecnológico no uso da energia e/ou um elevado nível de tensão ambiental (intenso uso de recursos não renováveis). Quanto maior o uso de recursos não renováveis, externos (F) ou locais (N), maior o risco de indisponibilizar recursos energéticos para as futuras gerações [9][18].

A sustentabilidade do sistema de produção do éster etílico de soja, apresentou um valor modesto (12%), constatando o elevado investimento econômico e o intenso uso de recursos não renováveis (locais e externos) na produção deste biocombustível. Além disso, o impacto econômico das emissões (perdas devido às emissões de substâncias tóxicas na atmosfera -  $F_3$ ) não pode ser desconsiderado no cálculo deste indicador, visto que sustentabilidade do sistema é avaliada através de  $\frac{EYR}{ELR} \left( \frac{[R(R+N+F)]}{\{(F^2+2FF_3+F_3^2)+(F+F_3)(N+R_3)\}} \right)$ . Para elevar o nível de sustentabilidade do sistema é necessário reduzir o consumo de recursos não renováveis, locais (N) e principalmente externos (F), além de abreviar os impactos ambiental e econômico vinculados às emissões dos gases de efeito estufa ( $F_3$  e  $R_3$ ).

### 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da aplicação desta metodologia ao sistema de produção do éster etílico de soja, foi possível determinar a procedência, a natureza e a quantidade de energia despendida na produção deste biocombustível, bem como identificar a pressão exercida pelo sistema sobre o meio ambiente. Assim, ao identificar as causas que afetam a sustentabilidade do sistema, é possível adotar ações a fim de minimizar as implicações ambientais relacionadas aos processos produtivos, sem comprometer a viabilidade econômica do sistema ao qual pertencem.

Em relação às condições necessárias para assegurar a viabilidade do biodiesel como substituto do diesel mineral foi verificado que:

- Este biocombustível produz mais energia que a quantia investida em sua produção ( $EYR > 1$ ). O valor obtido para a razão de rendimento emergético do éster etílico de soja foi de 1,29. Como ressaltado anteriormente, este valor pode ser melhorado através da redução da quantidade de recursos econômicos utilizados pelo sistema, principalmente, em sua fase agrícola;
- O biodiesel é um combustível renovável por definição, visto que é proveniente de fontes renováveis (vegetais). A sustentabilidade, ou seja, a disponibilidade deste combustível a longo prazo depende, entre outros fatores, do emprego racional dos recursos provenientes da economia, uma vez que estes recursos são, em sua maioria, não renováveis. De maneira geral, o uso indiscriminado de

recursos não renováveis, provenientes tanto de sistemas econômicos externos quanto dos sistemas naturais locais, pode comprometer o caráter sustentável de um biocombustível;

- As emissões de gases poluentes, durante o ciclo de vida do biocombustível, devem ser menores que as do combustível fóssil equivalente. Como foi calculado, o biodiesel apresenta enorme vantagem neste quesito ( $\approx 2,5$  vezes menos emissões de  $CO_2eq.$ ). Ainda que as emissões relacionadas ao uso do biodiesel fossem contabilizadas, o biodiesel levaria vantagem sobre o óleo diesel ( $\approx 2$  vezes menos emissões de  $CO_2eq.$ );
- As áreas utilizadas para produção de biomassa para fins energéticos não deve competir com as áreas destinadas à produção de alimentos. Conforme descrito no Capítulo 5, a área plantada com cana de açúcar destinada à produção do combustível (álcool etílico) não compete com as áreas destinadas a produção de alimentos. A soja, como matéria prima para produção de combustível, ainda precisa ser avaliada quanto a este requisito;
- Ter um custo capaz de competir com o combustível fóssil equivalente é considerado, hoje, um dos grandes obstáculos para a adoção do biodiesel. Em 2002, o preço médio praticado pelos produtores e importadores de óleo diesel foi de R\$ 0,697 por litro (neste valor estão incluídas as parcelas da Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico – CIDE, dos Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público – PIS/PASEP e de Financiamento da Seguridade Social – Cofins. Não está incluído o ICMS, que depende de legislação de cada Estado). Neste mesmo ano, o preço final para o consumidor por litro de óleo diesel atingiu os valores médios de R\$ 1,51 (São Paulo – SP) e de R\$ 1,49 (Curitiba – PR). Segundo estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE), o custo por litro de éster etílico de soja alcança R\$ 1,35, sem considerar os impostos, o frete para o pólo de distribuição e a margem do produtor.



## 6.4 BIBLIOGRAFIA

- [1] BAKSHI, R. B. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers & Chemical Engineering**, v.26, p.269-282, 2002;
- [2] ULGIATI, S. & BROWN, M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions. The case of electricity production. **Journal of Cleaner Production**, v.10, p.335-348, 2002;
- [3] BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA. **Relatório de Perspectivas do Meio Ambiente Mundial – GEO Brasil 2002**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Acesso em: 03 ago. 2003;
- [4] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values**. April, 2002. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 13 jan. 2004;
- [5] DUTRA, A. C. & ALMEIDA NETO, J. A. de. Uso da ACV na avaliação preliminar das categorias ambientais efeito estufa e chuva ácida para o diesel e o biodiesel de OGR. In: **Congresso Internacional de Biodiesel**, 1., 2003, Ribeirão Preto. Trabalhos. 2 CD-ROM;
- [6] LEWIS, C. A. **Fuel and Energy Production Emission Factors**. MEET Project: Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport. Deliverable nº20, 1997. Disponível em: <<http://www.inrets.fr/infos/cost319/MEETdeliverable20.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2003;
- [7] ODUM, H. T. **Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making**. New York: John Wiley & Sons, 1996;
- [8] SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIESEL. Curitiba, out. 2002. **Anais...** Disponível em: <<http://www.idealiza.com.br/workshops/biodiesel>> Acesso em: 05 abr. 2003;
- [9] BASTIANONI, S. & MARCHETTINI, N. Ethanol production from biomass: analysis of process efficiency and sustainability. **Biomass and Bioenergy**, v.11, p.411-418, 1996;
- [10] ÁLVARES JR., O. DE M. & LINKE, R. R. A. **Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo – CETESB;
- [11] LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2ª. Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002;
- [12] SMITH, J. B.; SCHELLNHUBER, H. J. & MIRZA, M. M. Q. Vulnerability to Climate Change and Reasons for Concern: A Synthesis. In: **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Cap.19, p.940. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 13 jan. 2004;
- [13] BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>;

- [14]COELHO, O.; ORTEGA E. & COMAR, V. **Balanço de Energia do Brasil**. Disponível em:<<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C05-Brasil-COC.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [15]ODUM, H. T. **Engenharia Ecológica: uma metodologia para a agricultura sustentável**. Disponível em: <<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C001-Prefacio.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [16]ORTEGA E. & MILLER M. **Avaliação ecossistêmica – emergética de processos agrícolas e agroindustriais**. Estudo de caso: a produção da soja. Disponível em:<[http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C13-Soja\\_PA.pdf](http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C13-Soja_PA.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2003;
- [17]**A CULTURA da soja - 1**: Rio Grande do Sul - Santa Catarina - Paraná. Rio de Janeiro: Globo, 1988;
- [18]ORTEGA, E.; MILLER M.; ANAMI & BESKOW. **From Emergy Analysis to public policy: soybean in Brazil**. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega>> Acesso em: 19 fev. 2003;
- [19]KALTSCHMITT, M. ; REINHARDT, G. A. & STELZER T. Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects. **Biomass and Bioenergy**, v.12, p.121-134, 1997.

## 7 CONCLUSÃO

Este estudo buscou avaliar a sustentabilidade de um sistema de produção de biodiesel, combustível líquido originário do ciclo produtivo agro-industrial, produzido a partir de recursos biológicos renováveis. O biodiesel considerado foi um éster etílico de soja, obtido através da reação de transesterificação entre o óleo de soja degomado e o álcool etílico anidro.

O meio ambiente serve ao mesmo tempo como fonte e como depósito para os sistemas econômicos, fornecendo recursos e recebendo os rejeitos gerados por estes sistemas. É constituído por diversos sistemas naturais e sua conservação depende da capacidade destes ecossistemas de repor os recursos utilizados e de assimilar os resíduos produzidos pelos sistemas econômicos. Assim, para que a sustentabilidade de um sistema econômico possa ser assegurada, devem ser garantidas as condições de conservação do meio ambiente.

Como forma de avaliar a sustentabilidade do sistema de produção do éster etílico de soja, contabilizando fatores ecológicos e econômicos, foram aplicadas a este sistema: a metodologia de análise exergética, a metodologia de análise emergética e a metodologia integrada de análise ambiental.

A análise de exergia foi aplicada na avaliação do sistema industrial de produção do biodiesel, que é constituído por quatro processos: transesterificação (produção do biodiesel), destilação (remoção do excesso de álcool), centrifugação (separação da glicerina) e lavagem (retirada de resíduos). Esta análise permitiu estimar o potencial de impacto do sistema industrial sobre o meio ambiente, que pode ser determinado através da exergia destruída no processo (I) e das perdas de exergia do sistema na forma de resíduos.

Foi constatado que o processo de conversão de óleo de soja degomado e álcool etílico anidro em éster etílico de soja e glicerina possui elevada eficiência exergética. As perdas de exergia associadas aos resíduos do processo somadas às irreversibilidades do sistema representam cerca de 5% dos insumos exergéticos necessários à produção do biodiesel. Esta elevada eficiência exergética pode ser entendida como baixo potencial de prejuízo ambiental deste sistema industrial de produção do éster etílico de soja. Entretanto, a metodologia de análise de exergia não assegura que os ecossistemas afetados serão capazes de suportar a pressão exercida por este sistema industrial.

A teoria emergética e a metodologia integrada de análise ambiental consideram em suas avaliações as fases agrícola e industrial do sistema de produção do éster etílico de soja. A análise emergética limita-se a avaliar as interações com o meio ambiente considerando somente a função de fornecedor de recursos deste para os sistemas produtivos, enquanto que a metodologia integrada de análise ambiental considera ambas as funções desempenhadas pelo meio ambiente (fornecedor e receptor).

A aplicação da metodologia integrada de análise ambiental ao sistema de produção de éster etílico de soja, que engloba a fase agrícola (cultivo da cana de açúcar e da soja), os processos industriais intermediários (produção de álcool e de óleo vegetal) e o processo de obtenção do biodiesel, demonstrou que este biocombustível fornece maior quantidade de energia que a requerida em sua produção, requisito imprescindível para assegurar a viabilidade de um combustível.

Considerando a categoria de impacto ambiental *efeito estufa*, foram confrontados os resultados obtidos na avaliação do ciclo de vida do biodiesel e do óleo diesel. O biodiesel apresenta larga vantagem nesta categoria, visto que a quantidade equivalente de gases de *efeito estufa* lançados na atmosfera durante o ciclo de vida do biodiesel é cerca de 2,5 vezes menor que a quantidade destes gases emitida pelo óleo diesel durante o seu ciclo de vida. Assim, a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira poderá minimizar os danos causados por estes gases ao meio ambiente (deterioração da qualidade do ar, alterações climáticas) e à sociedade (doenças respiratórias).

A transformidade obtida para o éster etílico de soja, produzido através deste sistema, indica que são necessários 585 mil *Joules* de energia solar (*sej*) para produzir cada *Joule* de biodiesel. Os valores obtidos para os indicadores razão de rendimento em emergia (*Emergy Yield Ratio – EYR = 1,29*), razão de investimento em emergia (*Emergy Investment Ratio – EIR = 3,44*) e razão de carregamento ambiental (*Emergy Loading Ratio – ELR = 10,50*), demonstram que o sistema apresenta elevada dependência em relação aos recursos econômicos. Estes recursos dependem, em grande parte, da disponibilidade global de combustíveis fósseis e de alguns minerais (fontes não renováveis). A utilização excessiva ou inadequada de recursos econômicos eleva em demasia os custos de produção (reduzindo a competitividade do sistema) e causa intensos prejuízos ao meio ambiente (exercendo elevada pressão sobre os sistemas naturais). Em consequência disso, o indicador de sustentabilidade obtido para o sistema produtivo do éster etílico de soja foi bastante modesto (12%).

Para a realização de trabalhos futuros seguem algumas sugestões:

- I. Buscar informações sobre os ecossistemas afetados pelos poluentes oriundos deste sistema de produção de éster etílico de soja, viabilizando o cálculo do impacto ecológico das emissões ( $R_3$ ).
- II. Avaliar a influência da eliminação da queima da lavoura de cana de açúcar nos resultados.
- III. Avaliar os ciclos de vida do biodiesel e do óleo diesel em relação a outras categorias de impacto ambiental.
- IV. Aplicar a metodologia integrada de análise ambiental ao sistema de produção do óleo diesel, de modo a possibilitar a comparação entre sistemas que, embora produzam combustíveis equivalentes, utilizam matéria-prima de natureza diversa (renovável no caso do biodiesel e não renovável no caso do óleo diesel).
- V. Aplicar a metodologia integrada de análise ambiental a outros sistemas de produção de biodiesel, possibilitando, assim, confrontar sistemas que para produzir um mesmo produto (biodiesel), utilizam diferentes processos de produção.