FERNANDA CRISTINA VIANNA

**ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA: AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO ECONÔMICO-AMBIENTAL DO BIODIESEL E
PETRODIESEL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título Mestre em Engenharia.**

São Paulo

2006

FERNANDA CRISTINA VIANNA

**ANÁLISE DE ECOEFICIÊNCIA: AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO ECONÔMICO-AMBIENTAL DO BIODIESEL E
PETRODIESEL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Título
Mestre em Engenharia.**

**Área de concentração:
Engenharia Química**

**Orientador:
Profº Drº Gil Anderi da Silva**

**São Paulo
2006**

RESUMO

O biodiesel é a mais provável alternativa ao petrodiesel. É constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação entre qualquer triglicerídeo e um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol. Possui praticamente as mesmas propriedades do petrodiesel, mas comparado a este, pode eliminar as emissões de óxido de enxofre e reduzir as emissões de CO₂.

O Brasil vem sendo apontado como futuro líder na produção de biodiesel, devido às suas excelentes condições de clima, solo, e imensa extensão territorial, que são propícias para a plantação de diversas oleaginosas. Com tantas especulações, o governo federal brasileiro criou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), visando a implementação da produção e uso do biodiesel de forma sustentável. Para tanto, uma lei federal foi promulgada em 2005, estabelecendo a adição de 5% de biodiesel ao petrodiesel vendido ao consumidor final. Esta lei deve ser implementada em um período de 5 anos, nos quais as empresas produtoras devem começar usando um mínimo de 2% em um período de 3 anos.

Este trabalho apresenta uma avaliação econômica-ambiental comparativa entre biodiesel (de óleo de palma e etanol) e petrodiesel para as condições brasileiras, usando a Análise de Ecoeficiência desenvolvida pela BASF.

Esta análise pertence a uma classe de técnicas da gestão ambiental que visa avaliar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços, de forma integrada a uma avaliação econômica. Esta classe de técnicas é usada, principalmente, para a comparação de produtos similares e de processos que executem uma mesma função, visando à geração de subsídios para a tomada de decisão em diversos níveis.

Esta metodologia considera um indicador ambiental baseado em um inventário de ciclo de vida associado a uma avaliação simplificada de riscos de acidentes à saúde humana, os quais são classificados de acordo com a severidade das consequências e probabilidade de ocorrência e; um indicador econômico, calculado a partir dos custos do ciclo de vida do produto.

No que diz respeito à avaliação do biodiesel, para os dados relativos ao óleo de dendê (ou palma), utilizaram-se dados de campo, obtidos junto ao Grupo Agropalma, maior produtor nacional do óleo e, no que diz respeito ao etanol foram utilizadas fontes secundárias, ou seja, dados disponíveis em literatura. Outros dados e informações relacionados mais especificamente com a produção do biodiesel foram adquiridos de literatura e levantados junto a especialistas e responsáveis pela tecnologia de produção do mesmo.

Com relação ao petrodiesel, os dados foram obtidos de base de dados internacionais e, posteriormente, adaptados à realidade brasileira, por meio de informações obtidas junto à Petrobras e à literatura especializada.

As informações relacionadas ao petrodiesel foram levantadas para 26 litros de combustível e, as referentes ao biodiesel para 30 litros. Estas quantidades foram determinadas considerando-se o quanto de produto faz-se necessário para a geração de 1.000 MJ de energia em motores de combustão interna.

Os dados foram coletados para as etapas de extração dos recursos e transformação dos mesmos, não sendo consideradas as etapas de distribuição, uso e disposição final.

Como resultado, tem-se o biodiesel como opção mais ecoeficiente. O grande diferencial entre as duas alternativas é o desempenho ambiental do biodiesel, fato esse, justificado principalmente, pelo reduzido consumo de recursos materiais e a baixa toxicidade do produto, pois as matérias-primas necessárias para sua formação (o etanol e o óleo de dendê) têm caráter renovável e, durante a produção do petrodiesel existe o contato com muitos hidrocarbonetos voláteis, algo que não ocorre com o biodiesel.

Este estudo fornece informações que podem auxiliar na tomada de decisões sobre a consolidação do uso do biodiesel no Brasil, além disso, contribui com inventários do ciclo de vida, que podem auxiliar no desenvolvimento de um banco de dados de ACV (Avaliação do ciclo de vida) representativos da realidade brasileira.

ABSTRACT

Biodiesel is the most likely alternative to petrodiesel. It is composed of methyl or ethyl esters from fatty acids, obtained by a transesterification reaction between any triglycerides and an alcohol with short chain, methanol or ethanol. It has almost the same properties of petrodiesel, but comparing with this, it can eliminate the sulfur oxides emissions and significantly reduce the CO₂ emissions.

Brazil is being considered as a future leader in biodiesel production due to its excellent climate and soil condition and vast territorial extension conducive to a crop of varied oil plants. Around so many speculations, Brazilian federal government has created the National Biodiesel Production and Use Program (PNPB) aiming to the implementation of a sustainable biodiesel production and use. Focusing this issue, a federal law was promulgated in 2005 in order to establish the addition of 5% biodiesel to the petrodiesel sold to the ultimate consumer. This fact should be implemented within a 5 – year period in which companies should start using the minimum of 2% biodiesel within a 3 – year period.

This paper presents an environmental and economic comparison between biodiesel (from palm oil and ethanol) and petrodiesel regarding Brazilian conditions, according to the Eco-Efficiency Analysis developed by BASF.

This analysis belongs to a class of techniques of the environmental management, which aims to evaluate the environmental performance of products, processes and services integrated in an economic evaluation. This class of techniques is mainly used for the comparison of similar products and processes, which present the same function, and its aim is to subsidize the decision-making process in several levels.

This methodology considers firstly the environmental indicator based in the life cycle inventory associated to a simplified risks of accidents to human health analysis which are classified according to the severity of consequences and the probability of occurrence and secondly an economical indicator calculated from the life cycle costs of the product.

As to the information about the biodiesel evaluation, two sources have been considered. Regarding the palm oil, primary data have been used. Such data have

been obtained from Grupo Agropalma the largest national oil producer; regarding ethanol, secondary sources have been used, that is, available data from literature. The literature and the experts responsible for biodiesel technology of production have provided other data and information regarding more particularly the biodiesel production.

As to the petrodiesel, the data have been obtained from the international database and afterwards adapted to the Brazilian scenario, by means of information, provided by Petrobras.

The petrodiesel information was determined to 26 liters of fuel and the one concerning the biodiesel to 30 liters. Such quantities have been calculated considering the amount of the necessary product in order to generate 1,000 MJ of energy in internal combustion engines.

Data have been collected to the stages of source extraction and transformation; distribution, use and final disposition have not been considered.

The final result of the analysis shows biodiesel as the most ecoefficient option. The large difference between the two alternatives is the best environmental performance of the biodiesel which is justified chiefly due to the reduced consumption of material resources and the low toxicity of the product since the necessary raw material for its formation (the anhydrous ethanol and the palm oil) has renewable nature and during the production of the petrodiesel there is contact with many volatile hydrocarbons unlikely the biodiesel.

This paper provides information, which may help the decision-making process of the Brazilian biodiesel use, besides that, it contributes with life cycle inventories, which may help in the development of a Brazilian LCA (Life cycle assessment) database.

*Aos meus pais, meus
maiores exemplos*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que me deram condições para realizar este trabalho e a torná-lo menos imperfeito. De modo especial, agradeço....

Ao meu orientador, Profº Drº Gil Anderi da Silva, pelo apoio e atenção manifestados no transcorrer da preparação deste trabalho.

A Mirian Tiemi Zanchetta, diretora vice-presidente da Fundação Espaço Eco e gerente de ecoeficiência da BASF, pela oportunidade e por todo suporte, principalmente, nos momentos mais difíceis.

Ao Grupo de Prevenção a Poluição, em especial aos amigos Paulo, Rita e Marcelo por todo estímulo, amizade e, principalmente, por não terem me deixado desistir.

A toda equipe da Fundação Espaço Eco, em especial a querida Sueli Oliveira, pela receptividade e por todos ensinamentos.

Ao Grupo Agropalma, em especial ao diretor comercial Marcello Brito, por todo o incentivo e valiosas contribuições na coleta de dados e levantamento de informações.

Aos engenheiros da REDUC, Carlos Silva e Leonardo Oliveira por todos esclarecimentos prestados.

Ao amigo Marcelo Almeida, pela ajuda incansável durante toda preparação deste estudo.

Ao Profº Drº Carlos Clemente Cerri, por todos os ensinamentos.

Ao Profº Drº Tah Wun Song e Profº Drº José Carlos Mierzwa, pelas excelentes contribuições no exame de qualificação.

A Prof^a Dr^a Patrícia Helena Lara dos Santos Matai e ao Prof^o Dr^o Gilberto de Andrade Martins, por toda atenção dispensada e pelas sugestões oportunas.

A Prof^a Dr^a Nadia Wacila Hanania Vianna, pela enorme paciência, revisão de texto e, principalmente, pelo incentivo.

A minha prima Ana Luiza Giamelaro Hanania pela atenção ao dividir comigo seus conhecimentos da língua alemã.

Aos amigos do Bloco 18, Isabella, Luis, Rocio, Patrícia, Teresa, Antônio e D. Rosinha pelo companheirismo e estímulo.

Ao Prof^o Paulo Alt (in memoriam) por ter sido meu primeiro grande incentivador.

A Tatiana Cristina Vianna, minha irmã, por estar sempre ao meu lado.

Ao Gisberto Prado, meu amor, pelo apoio incondicional mesmo nas horas mais difíceis.

Aos muitos amigos e familiares que, de uma forma ou outra, apoiaram-me durante todo o desenrolar deste trabalho.

*“O motor diesel pode ser
alimentado com óleos vegetais e
poderá ajudar consideravelmente o
desenvolvimento da agricultura nos
países onde ele funcionar. Isto
parece um sonho do futuro, mas eu
posso predizer com inteira
convicção que esse modo de
emprego do motor Diesel pode, num
dado momento, adquirir uma
grande importância.”*

Rudolph Diesel, 1911

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. PLANO DE TRABALHO	5
3.1 Revisão Bibliográfica.....	5
3.2 Análise de Ecoeficiência.....	6
3.2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	6
3.2.2 Avaliação de riscos de acidentes.....	7
3.2.3 Levantamento de Custos	8
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1 Análise de Ecoeficiência (AEE).....	9
4.1.1 Introdução	9
4.1.2. Pilar Ambiental	10
4.1.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	10
4.1.2.1.1 Introdução	10
4.1.2.1.2 Metodologia	12
4.1.2.2 Avaliação de riscos	21
4.1.2.3 Normalização	21
4.1.2.4. Agregação das categorias para determinação dos índices ambientais	22
4.1.3 Pilar Econômico	24
4.1.3.1. Determinação dos Índices Econômicos	25
4.1.4 Inter-relacionamento entre os pilares	25
4.1.5 Análise de Resultados	26
4.2 Petrodiesel	27
4.2.1 Introdução	27
4.2.2 Mercado.....	28
4.2.3 Produção.....	29
4.2.4 Subprodutos	31

4.3 Biodiesel.....	32
4.3.1 Introdução	32
4.3.2 Situação Atual no Brasil	34
4.3.3 Aspectos Tecnológicos.....	37
4.3.3.1 Craqueamento térmico (Pirólise)	37
4.3.3.2 Esterificação	38
4.3.3.3 Transesterificação	38
4.3.4 Matéria-primas	41
4.3.4.1 Gorduras de animais.....	42
4.3.4.2 Óleos e gorduras residuais	42
4.3.4.3 Óleos Vegetais	42
4.3.4.4 Metanol e Etanol	44
4.3.5 Catalisadores	45
4.3.6 Subprodutos	46
4.3.7 Especificações	47
4.4 Óleo de dendê.....	48
4.4.1 Introdução	48
4.4.2 Mercado.....	50
4.4.3 Variedades do dendezeiro	54
4.4.4 Exigências ecológicas do dendezeiro.....	54
4.4.4.1 Fatores climáticos	55
4.4.4.2 Fatores Edáficos	56
4.4.4.3 Trabalhos preparatórios.....	56
4.4.5 Produção.....	56
4.4.5.1 Fase agrícola.....	57
4.4.5.2 Fase industrial	61
4.4.6 Usos do óleo de palma e de seus subprodutos	63
4.5 Etanol	64
4.5.1 Introdução	64
4.5.2 Mercado.....	65
4.5.3 Exigências ecológicas do canavial	66
4.5.4 Produção.....	67

4.5.4.1 Fase agrícola.....	67
4.5.4.2 Fase industrial	69
4.5.5 Usos do etanol anidro e de seus subprodutos.....	71
5. RESULTADOS	73
5.1 Avaliação de Ciclo de Vida.....	73
5.1.1 Objetivo.....	73
5.1.2 Escopo	73
5.1.2.1. Sistema de produto do petrodiesel	74
5.1.2.2. Sistema de produto do biodiesel de dendê	75
5.1.3 Análise de Inventário	79
5.1.3.1 Inventário do petrodiesel.....	79
5.1.3.2 Inventário do biodiesel.....	86
5.1.3.2.1 Inventário do óleo de dendê	86
5.1.3.2.2 Inventário do etanol anidro	95
5.1.3.2.3 Inventário da soda cáustica	100
5.1.3.2.4 Inventário do transporte das matérias-primas e do catalisador ..	104
5.1.3.2.5 Inventário da produção do biodiesel	110
5.1.3.2.6 Consolidação	113
5.1.4 Determinação de aspectos, impactos e parâmetros	117
5.1.4.1 Petrodiesel.....	117
5.1.4.2 Biodiesel.....	125
5.2 Avaliação de riscos de acidentes.....	133
5.2.1 Petrodiesel.....	134
5.2.2 Biodiesel.....	137
5.3 Normalização	143
5.4 Agregação das categorias para determinação dos índices ambientais	144
5.5 Levantamento de Custos	149
5.5.1 Petrodiesel.....	149
5.5.2 Biodiesel.....	149
5.6 Determinação dos Índices Econômicos	151
5.7 Inter-relacionamento entre os pilares	151
5.8 Discussões	152

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	166
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168
ANEXO A – Questionário de percepção	182

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da Avaliação do ciclo de vida (ABNT, 2001, p. 5).....	12
Figura 2: Dimensões da ACV (CHEHEBE, 1998, p. 23)	13
Figura 3: Agregação das categorias (SALING et al., 2002, p. 12_adaptada)	22
Figura 4: Impressão Ecológica – Perfis Ambientais (ZANCHETTA-URSO; SILVA, 2005)	24
Figura 5: Cálculo dos desvios dos índices ambientais para inter-relacionamento entre os pilares.....	25
Figura 6: Matriz de ecoeficiência – Representação dos resultados da Análise de Ecoeficiência (ZANCHETTA-URSO; SILVA, 2005)	26
Figura 7: Distribuição da produção de petrodiesel nas refinarias da Petrobras (ANP, 2005d)	29
Figura 8: Produção simplificada de petrodiesel	31
Figura 9: Representação da reação de transesterificação. (VIANNA; SILVA; ZANCHETTA, 2006)	39
Figura 10: Fluxograma simplificado do processo de produção de biodiesel por transesterificação (PARENTE, 2003, p 21)	41
Figura 11: Potencialidades brasileiras para óleos vegetais (ARANDA, 2005).	43
Figura 12: O fruto do dendê e os óleos de palma e palmiste	49
Figura 13: Produção mundial de óleos vegetais (OIL WORLD ANNUAL, 2003, apud CRESTANA, 2005).....	52
Figura 14: Esquema simplificado do processo de produção do óleo de dendê.....	57
Figura 15: Sistema de produto do petrodiesel.....	75
Figura 16: Sistema de produto do biodiesel de dendê.....	76
Figura 17: Subsistema da produção do óleo de dendê	77
Figura 18: Subsistema produção do etanol anidro	77
Figura 19: Subsistema da produção de soda cáustica	78
Figura 20: Impressão Ecológica do petrodiesel e biodiesel	152
Figura 21: Uso da terra para petrodiesel e biodiesel.....	153
Figura 22: Uso da terra para o biodiesel	154
Figura 23: Potencial de toxicidade para petrodiesel e biodiesel	155

Figura 24: Potencial de toxicidade do biodiesel	155
Figura 25: Potencial de risco de acidentes do biodiesel.....	156
Figura 26: Fatores de ponderação para determinação da categoria emissões atmosféricas.....	157
Figura 27: Chuva ácida para petrodiesel e biodiesel.....	158
Figura 28: Efeito estufa para petrodiesel e biodiesel	158
Figura 29: Resíduos sólidos	159
Figura 30: Fatores de ponderação para determinação da categoria rejeitos.....	159
Figura 31: Matriz de ecoeficiência.....	161
Figura 32: Fatores de ponderação para determinação dos índices ambientais.	162
Figura 33: Matriz de ecoeficiência para o cenário I.....	164
Figura 34: Matriz de ecoeficiência para o cenário II	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de reserva calculados para algumas matérias-primas.....	17
Tabela 2: Valores limites para efluentes líquidos	18
Tabela 3: Fatores para determinação dos impactos ambientais ocasionados pelas emissões atmosféricas	18
Tabela 4: Frases R e respectivas pontuações	20
Tabela 5: Exemplo da categoria potencial de risco.....	21
Tabela 6: Exemplo de normalização da categoria Consumo de recursos energéticos entre as alternativas	22
Tabela 7: Cálculo do fator de relevância para EE.....	23
Tabela 8: Agregação de EE, DCO, CA e FFO em emissões atmosféricas.	24
Tabela 9: Cadeias carbônicas típicas do óleo diesel	27
Tabela 10: Produção dos derivados de petróleo.....	32
Tabela 11: Características de alguns vegetais com potencial para produção de biodiesel	44
Tabela 12: Comparação de rotas metflica e etflica.....	44
Tabela 13: Comparação entre ésteres metflicos e etflicos.....	45
Tabela 14 - Propriedades do Biodiesel.....	48
Tabela 15: Produtividade do dendezeiro em crescimento para o óleo de dendê	50
Tabela 16: Ácidos graxos componentes do Óleo de Palma	50
Tabela 17: Produção mundial de óleos e gorduras.....	51
Tabela 18: Produtividade das oleaginosas em kg/ha ano.....	51
Tabela 19: Brasil – Área potencial e área plantada com dendê	52
Tabela 20: Dosagem de mistura de fertilizantes para período em pré-viveiro	59
Tabela 21: Adubação do dendezeiro	60
Tabela 22: Quantidade de adubo a ser substituída por tonelada de cacho vazio	61
Tabela 23: Características do óleo de palma bruto e refinado	62
Tabela 24: Composição química média da vinhaça.....	70
Tabela 25: Inventário de 59,2 kg de petróleo nacional e importado.....	79
Tabela 26: Inventário do transporte de 14,21 kg de petróleo importado	80
Tabela 27: Inventário do refino de 59,2 kg de petróleo	82

Tabela 28: Inventário da geração de 6,67 MJ de energia no Brasil	83
Tabela 29: Determinação dos fatores de alocação para os derivados do petróleo	84
Tabela 30: Inventário consolidado de 26,11 L de petrodiesel	85
Tabela 31: Inventário da etapa agrícola de 150 kg de cachos de fruto.	88
Tabela 32: Inventário do transporte de 150 kg de cachos de fruto.	89
Tabela 33: Inventário da etapa industrial para a produção de 30 kg de óleo de dendê	90
Tabela 34: Inventário do subsistema energia térmica a partir da queima do petrodiesel para produção de 30 kg de óleo de dendê.....	91
Tabela 35: Inventário do subsistema energia térmica a partir da queima das cascas e fibras para produção de 30 kg de óleo de dendê	92
Tabela 36: Inventário consolidado de 30 kg de óleo de dendê.	93
Tabela 37: Inventário de 15 kg de etanol anidro.....	97
Tabela 38: Inventário de 49,8 g de óleo combustível	101
Tabela 39: Inventário de 0,3 kg de soda cáustica.....	102
Tabela 40: Inventário do transporte de 30 kg de óleo de dendê.....	104
Tabela 41: Inventário do transporte de 15 kg de etanol anidro.....	105
Tabela 42: Inventário do transporte de 0,3 kg de soda cáustica.....	105
Tabela 43: Inventário consolidado do transporte de 30 kg de óleo de dendê	106
Tabela 44: Inventário consolidado do transporte de 15 kg de etanol anidro	107
Tabela 45: Inventário consolidado do transporte de 0,3 kg de soda cáustica	109
Tabela 46: Inventário do processo de produção de 30,03 L de biodiesel de dendê.	111
Tabela 47: Inventário do subsistema produção do biodiesel para 30,03 litros do combustível	111
Tabela 48: Balanço de CO ₂	113
Tabela 49: Inventário de 30,03 litros de biodiesel de dendê via rota etílica.....	114
Tabela 50: Determinação da categoria recursos materiais para o petrodiesel	118
Tabela 51: Resíduos sólidos identificados e quantificados no inventário do petrodiesel	119
Tabela 52: Fatores para expressar aspectos ambientais em termos de N-total, HC, Cl ⁻ e HM	119
Tabela 53: Efluentes líquidos para aplicação da análise de ecoeficiência da BASF	121

Tabela 54: Determinação da categoria efluentes líquidos para o petrodiesel	121
Tabela 55: Fatores para expressar aspectos ambientais em termos de CO ₂ , SO _x , NOX, COVNM, CFCs, HCl	122
Tabela 56: Emissões atmosféricas do petrodiesel para aplicação da análise de eficiência da BASF.....	123
Tabela 57: Uso da terra para 22,25 kg de petrodiesel	124
Tabela 58: Categorias de eficiência para o petrodiesel	125
Tabela 59: Determinação da categoria recursos materiais para o biodiesel.....	126
Tabela 60: Resíduos sólidos identificados e quantificados no inventário do biodiesel	127
Tabela 61: Efluentes líquidos para aplicação da análise de eficiência da BASF	128
Tabela 62: Determinação da categoria efluentes líquidos para o biodiesel	128
Tabela 63: Emissões atmosféricas do biodiesel para aplicação da análise de eficiência da BASF.....	129
Tabela 64: Uso da terra por subsistema para produção de 26,4 kg de biodiesel.....	131
Tabela 65: Uso da terra para 26,4 kg de biodiesel	131
Tabela 66: Categorias de eficiência para o biodiesel	133
Tabela 67: Acidentes nas plataformas de petróleo da Bacia de Campos.....	134
Tabela 68: Acidentes relacionados ao total de petróleo refinado no Brasil.....	134
Tabela 69: Determinação da ocorrência dos riscos relacionados ao petróleo refinado para a produção de 26,11 litros de petrodiesel.....	135
Tabela 70: Acidentes nas refinarias brasileiras.....	136
Tabela 71: Determinação da ocorrência dos riscos do refino do petróleo para produção de 26,11 litros de petrodiesel.....	136
Tabela 72: Análise de riscos simplificada do petrodiesel	137
Tabela 73: Acidentes durante produção do óleo de dendê.....	138
Tabela 74: Análise simplificada de risco de 30 kg de óleo de dendê	139
Tabela 75: Acidentes durante a etapa agrícola da produção de etanol	139
Tabela 76: Análise simplificada de risco para produção de 234 kg de cana-de-açúcar	140
Tabela 77: Acidentes da produção de biodiesel.....	141

Tabela 78: Análise simplificada de riscos do subsistema produção do biodiesel para 30,03 litros de combustível	142
Tabela 79: Análise simplificada de riscos de 30,03 litros de biodiesel	142
Tabela 80: Valores absolutos das categorias.....	143
Tabela 81: Valores relativos das categorias	144
Tabela 82: Fatores sociais para EE, DCO, FFO e CA	145
Tabela 83: Fatores sociais para emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos	145
Tabela 84: Fatores sociais para consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos, rejeitos, potencial de toxicidade, risco potencial e uso da terra...	145
Tabela 85: Valor total anual de cada categoria para o Brasil.....	145
Tabela 86: Determinação da categoria emissões atmosféricas	147
Tabela 87: Determinação da categoria rejeitos	148
Tabela 88: Determinação dos índices ambientais	148
Tabela 89: Custos de 30,03 litros de biodiesel de dendê via rota etílica.	151
Tabela 90: Determinação dos Índices Econômicos	151
Tabela 91: Índices ambientais e econômicos inter-relacionados	152
Tabela 92: Comparativo Biodiesel x Petrodiesel.....	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a:	Ano
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV:	Avaliação do Ciclo de Vida
AEE:	Análise de Ecoeficiência
Alt:	Alternativa
ANP:	Associação Nacional do Petróleo
AOX:	Halógeno Orgânico Adsorvível
CA:	Chuva Ácida
CFC:	Clorofluorocarboneto
CFF:	Cachos de frutos frescos
CONFINS:	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COVNM:	Compostos Orgânicos Voláteis não Metano
DBO:	Demanda Biológica de Oxigênio
DCO:	Destruição da Camada de Ozônio
DQO:	Demanda Química de Oxigênio
EE:	Efeito Estufa
EPUSP:	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FFO:	Formação Fotoquímica do Ozônio
GLP:	Gás liquefeito de petróleo
GP2:	Grupo de Prevenção a Poluição
HC:	Hidrocarbonetos
ISO:	International Organization for Standardization
IVIG:	Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais
M.O:	Matéria orgânica
MDIC:	Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior
MTBE:	Metil-t-butil-éter
N-total:	Nitrogênio total
NUTEC:	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará
PAR-TEC:	Parque tecnológico da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial
pH:	Potencial de hidrogênio iônico

PIB:	Produto Interno Bruto
PIS:	Programa de Integração Social
PNPB:	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
P-total:	Fósforo total
PVC:	Policloreto de Vinila
REDUC:	Refinaria Duque de Caxias
TECBIO:	Tecnologias Bioenergéticas Ltda
RECAP:	Refinaria de Capuava
REDUC:	Refinaria Duque de Caxias
REFAP:	Refinaria Alberto Pasqualini
REGAP:	Refinaria Gabriel Passos
REMAN:	Refinaria de Manaus Isaac Sabbá
REPAR:	Refinaria Getúlio Vargas
REPLAN:	Refinaria de Paulínia
REVAP:	Refinaria Henrique Lage
RLAM:	Refinaria Landulpho Alves
UFRJ:	Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

Historicamente o homem tem considerado o planeta Terra como simples fonte de recursos naturais, destruindo os alicerces de sua própria sustentação ao desenvolver suas atividades socioeconômicas. O atual modelo de desenvolvimento baseia-se no aumento acelerado da produção e do consumo, o que ocasiona maior pressão sobre os recursos naturais, contribuindo diretamente para a degradação ambiental, em todas as suas formas.

Recentemente tem havido indícios de que o ser humano passou a compreender que o meio ambiente é o responsável pelo oferecimento das condições essenciais para a sua sobrevivência e evolução, e que se faz necessário preservá-lo, pois, do contrário, estar-se-ia caminhando para um esgotamento dos recursos vitais.

A civilização passou, portanto, a dar uma maior atenção à natureza, realizando conferências de caráter regional e mundial, criando instituições para cuidar do meio ambiente, desenvolvendo processos e novos produtos, além de ferramentas de gestão ambiental.

Segundo Menani (2005), nos anos de 2003 e 2004, percebeu-se um acirramento do efeito estufa, em virtude dos altos níveis de gás carbônico emitidos na queima de combustíveis fósseis, fato esse que vem provocando mudanças climáticas que afetam toda a população mundial.

A preocupação em torno das referidas alterações climáticas é crescente e tem convergido para políticas globais de redução de poluição, onde se vê necessária a transição para uma nova matriz energética, que substitua o petróleo como matéria-prima.

Dentro deste contexto, surge o biodiesel, a alternativa mais provável ao petrodiesel. Este é um combustível derivado de fontes renováveis, como dendê, girassol, soja, mamona dentre outras, e que possui praticamente as mesmas propriedades do diesel fóssil, mas que comparado a este, segundo Holanda (2004), pode reduzir em 78% as emissões líquidas de gás carbônico, em 90% as emissões de fumaça e, praticamente, eliminar as emissões de óxido de enxofre.

Outra grande vantagem do biodiesel diz respeito às perspectivas de esgotamento das reservas mundiais de petróleo, pois mesmo existindo controvérsias quanto à época em que isso ocorrerá, sabe-se que é um fato inevitável. (SEQUEIRA, 2005)

As situações anteriormente expostas, aliadas aos conflitos cada vez mais habituais envolvendo os países produtores de petróleo, têm contribuído para que países da Europa, como Alemanha, França e Itália, incentivem as pesquisas e o uso do biodiesel.

No Brasil, as pesquisas também têm sido intensificadas, pois o país vem sendo apontado como futuro líder na produção do biodiesel, devido às suas excelentes condições de clima, solo e imensa extensão territorial. Segundo Holanda (2004), o *National Biodiesel Board*, responsável pela implantação do combustível nos Estados Unidos da América, divulgou estudos que reforçam esta teoria, mencionando ainda que o Brasil seria o responsável pela substituição de 60% do combustível fóssil consumido no planeta.

Além disso, a entrada do biodiesel no Brasil surge como prenúncio de grande ganho econômico, pois atualmente o Brasil tem o petrodiesel como o derivado de petróleo de maior consumo, principalmente, pela sua importância no transporte rodoviário, porém não é auto-suficiente em sua produção, pois não tem plataformas de exploração de petróleo suficientes e o petróleo proveniente da Bacia de Campos (RJ) é do tipo pesado (denso, devido à grande quantidade de hidrocarbonetos de cadeias longas) e a maioria das refinarias nacionais processa petróleo do tipo leve (menor densidade e predomínio de hidrocarbonetos de cadeias curtas), o que torna necessária a importação de petróleos mais leves.

Produzir biodiesel no Brasil torna-se ainda mais vantajoso ambientalmente, pois, ao contrário dos países europeus que fazem uso do metanol para reagir com o óleo vegetal, o país utilizaria o etanol, que é um álcool menos tóxico e de fonte renovável. Isto é possível, pois o país já é produtor de etanol, tem a tecnologia necessária já desenvolvida e um mercado consolidado.

Com tantas especulações, o interesse sobre o papel do combustível de origem vegetal no Brasil vem crescendo muito e o GP2, Grupo de Prevenção à Poluição da Escola Politécnica da USP (EPUSP), tomou a iniciativa de realizar um estudo amplo,

onde se busca avaliar a sustentabilidade dos principais tipos existentes de biodiesel, ou seja, avaliar o desempenho do produto para a realidade brasileira nos pilares ambiental, econômico e social. Dessa forma, este projeto de dissertação foi direcionado para contribuir com o referido estudo.

Este trabalho avaliou e comparou o biodiesel de dendê e o petrodiesel quanto aos seus desempenhos econômico e ambiental. Para tanto, utilizou-se a Análise de Ecoeficiência, desenvolvida pela BASF, que visa avaliar o desempenho ambiental de produtos, integrado a uma avaliação econômica. Esta abrange a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que é uma técnica para avaliar as entradas e saídas e os impactos ambientais potenciais associados a todas as etapas de extração de recursos e suas transformações, além do uso e disposição final do produto.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal fornecer subsídios e informações que auxiliem na tomada de decisão sobre a consolidação do biodiesel no Brasil, através da avaliação e comparação do desempenho econômico-ambiental do petrodiesel e do biodiesel (produzido por óleo de dendê via rota etílica) por meio da Análise de Ecoeficiência da BASF.

Como objetivos específicos deste estudo, têm-se o conhecimento e aplicação da Análise de Ecoeficiência, que por sua vez, necessita da elaboração de um Inventário de Ciclo de Vida para cada uma das alternativas estudadas. Estes Inventários gerados podem contribuir para o desenvolvimento de um banco de dados de ACV representativos da realidade brasileira.

3. PLANO DE TRABALHO

Este estudo compreende as seguintes etapas de execução: revisão bibliográfica, análise de ecoeficiência que se subdivide em avaliação do ciclo de vida, avaliação de riscos, levantamento de custos e, por fim, discussão dos resultados e conclusões.

3.1 Revisão Bibliográfica

Nesta etapa, procurou-se, inicialmente, conhecer a Análise de Ecoeficiência da BASF e a metodologia na qual está embasada, que é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para ambas, foram abordados o conceito e o procedimento de execução, além de suas aplicações e limitações.

Em seguida, buscou-se conhecer o estado da arte do biodiesel e do petrodiesel, a partir das respectivas características, aplicações, situações no mercado brasileiro, etapas de produção e também das tecnologias e matérias-primas utilizadas pelas empresas que participam da cadeia produtiva. Tais informações foram importantes para se estabelecer a melhor forma de coleta de dados durante a realização da ACV.

Para melhor entendimento dos processos e tecnologias empregadas na produção do diesel e biodiesel, foram realizadas visitas à refinaria REDUC, pertencente à Petrobras, à planta piloto de biodiesel, pertencente ao IVIG (Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais), situada no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), além das indústrias de extração de óleo de dendê e da usina de biodiesel, todas do Grupo Agropalma.

Um estudo preliminar, referente ao biodiesel, revelou a necessidade de extensão da pesquisa bibliográfica ao óleo de dendê; de modo semelhante, um estudo preliminar relativo ao diesel apontou o petróleo como tema adicional de pesquisa, pois são matérias-primas utilizadas nos respectivos processos de produção.

3.2 Análise de Ecoeficiência

Para atender às necessidades internas de seu Grupo Empresarial foi desenvolvida, pela BASF_AG, uma ferramenta de Análise de Ecoeficiência para tomada de decisão.

O resultado da análise auxilia na tomada de decisões, a partir da comparação intrínseca de produtos e processos, baseada no estudo dos pilares econômico e ambiental, onde ambos são tratados com igual importância.

Na execução da análise, o desempenho ambiental, conforme exposto anteriormente, é avaliado através de uma ACV, complementada com uma avaliação de riscos de acidentes, e, o desempenho econômico, a partir de um levantamento de custos.

O resultado final é expresso através de um gráfico denominado matriz de ecoeficiência, o que torna fácil a compreensão e interpretação dos resultados.

É necessário salientar que a análise deste trabalho foi conduzida para as duas alternativas propostas: biodiesel e petrodiesel.

3.2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Para este trabalho, duas ACVs foram realizadas, uma para cada alternativa de óleo considerado.

Para a elaboração das ACVs, primeiramente foram levadas em conta as informações obtidas da revisão bibliográfica, para que fosse possível determinar o sistema de produto, que pode ser entendido como o conjunto de todas as etapas de extração de recursos e de transformações dos mesmos, necessárias na fabricação do produto, além de seu uso e disposição final.

No entanto, seguindo as recomendações de Ribeiro (2004) fez-se necessário elaborar um modelo representativo de cada produto para que o estudo se tornasse viável. Por modelo representativo, entende-se uma simplificação de cada sistema de produto que, apesar das limitações, consiga atender aos objetivos da pesquisa científica.

Com o modelo pronto, iniciou-se a fase mais demorada da ACV, que é a coleta de dados para quantificação dos aspectos ambientais, isto é, das entradas e saídas de matéria e energia. O primeiro passo foi estabelecer contato com as empresas presentes no sistema para verificar sua disposição no que tange ao fornecimento das informações.

No que diz respeito ao inventário do biodiesel, para os dados relativos ao óleo de dendê, utilizaram-se dados de campo, obtidos junto ao Grupo Agropalma, maior produtor nacional do óleo, completando-se as informações necessárias com estimativas baseadas em dados de literatura especializada e, para a obtenção dos dados referentes ao etanol e à soda cáustica, foram utilizadas fontes secundárias, ou seja, dados disponíveis em literatura e em base de dados internacionais. Outros dados e informações relacionados mais especificamente com a produção do biodiesel foram adquiridos da literatura e levantados junto a especialistas e responsáveis pela tecnologia de produção do mesmo.

Para o petrodiesel, os dados foram obtidos de base de dados internacionais e, posteriormente, adaptados à realidade brasileira, por meio de informações obtidas junto à Petrobras e à literatura especializada.

Após a determinação do inventário de cada produto, os dados obtidos foram associados a aspectos, impactos e parâmetros ambientais. É necessário destacar que impactos ambientais devem ser entendidos, segundo a ABNT (1996), como quaisquer modificações adversas ao meio ambiente e, inventário, segundo Chehebe (1998) como um conjunto de dados relativos a todas as variáveis (matéria-prima, energia, emissões atmosféricas, etc) relacionadas com o ciclo de vida de um produto ou processo.

3.2.2 Avaliação de riscos de acidentes

Nesta etapa, foram realizadas duas avaliações, uma para cada alternativa de combustível considerado, onde foram determinados os possíveis acidentes relacionados ao modelo representativo de cada produto, os quais foram classificados quanto à severidade das consequências e à probabilidade de ocorrência.

As duas avaliações foram feitas baseadas em informações obtidas da literatura, mas, aquelas referentes especificamente às produções do óleo de dendê e do

biodiesel, foram adquiridas junto à área de segurança do trabalho do Grupo Agropalma.

3.2.3 Levantamento de Custos

Nesta etapa, é necessário estimar todos os custos que incorrem no ciclo de vida do produto. Porém, devem ser considerados os custos relacionados ao modelo representativo de cada produto, determinado durante a execução da ACV.

Para este trabalho, foi realizado um levantamento de custos para cada uma das alternativas de combustível estudadas. Foram então obtidos dois valores de custo total (matéria-prima, mão-de-obra, energia), um para cada alternativa de óleo, a partir de dados secundários.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Análise de Ecoeficiência (AEE)

4.1.1 Introdução

Até o final da década de 80, conforme observado por Priesemuth (2001), o movimento ecológico colocava-se contra o desenvolvimento econômico. Porém, em 1992, o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Negócios definiu que a eficiência ecológica para o Desenvolvimento Sustentável será alcançada “mediante o fornecimento de bens e serviços a preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, ao mesmo tempo em que reduz progressivamente o impacto ambiental e o consumo de recursos ao longo do ciclo de vida, a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada da Terra”.

Atualmente, pode-se dizer que economia e ecologia não são mais excludentes, pois as empresas podem tomar medidas de proteção ao meio ambiente sob o ponto de vista de mercado. De acordo com o segmento em que atuam, as indústrias têm procurado a melhor forma de implantar a ecoeficiência.

Neste contexto, foi desenvolvida, em 1996, na Alemanha pela BASF AG, em conjunto com a consultoria Roland Berger, uma metodologia para Análise de Ecoeficiência.

Com tanto sucesso no mercado europeu e, por tratar-se de uma ferramenta padrão para definição de estratégia e tomada de decisão, a BASF decidiu expandir o uso da análise que passou a ser adotada na filial norte-americana e, mais recentemente, na empresa do Brasil. Até janeiro de 2006, segundo BASF (2006), já haviam sido realizadas duzentas e cinquenta análises. Esta recebeu certificação reconhecida pela TÜV Rheinland Berlin Brandenburg em 2002.

De acordo com a BASF (2005), esta análise pertence a uma classe de técnicas da gestão ambiental que visa avaliar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços, de forma integrada a uma avaliação econômica. Esta classe de técnicas é usada, principalmente, para a comparação de produtos similares e de processos que

executem uma mesma função, visando à geração de subsídios para a tomada de decisão em diversos níveis.

Outras ferramentas de análise de ecoeficiência foram desenvolvidas como a da Storebrand, da WBSCD e da Shell, mas estas são restritas ao público interno de suas organizações.

Este trabalho, conforme mencionado anteriormente, fez uso da Análise de Ecoeficiência da BASF que, portanto, será descrita em maiores detalhes.

4.1.2. Pilar Ambiental

O desempenho ambiental da Análise de Ecoeficiência da BASF é tratado por meio da aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e, posteriormente, de uma avaliação simplificada dos riscos de acidentes para cada opção a ser comparada. A primeira fornece como resultado aspectos, impactos e parâmetros ambientais, expostos nas seguintes categorias: consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos, resíduos sólidos, efluentes líquidos, formação fotoquímica de ozônio (FFO), efeito estufa (EE), chuva ácida (CA), destruição da camada de ozônio (DCO), uso da terra e potencial de toxicidade. A segunda apresenta como resultado uma nova categoria denominada potencial de risco. Todas as categorias são agregadas por ponderações para se atingir um índice ambiental único para cada alternativa.

O próximo tópico aborda a metodologia de ACV em maiores detalhes.

4.1.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

4.1.2.1.1 Introdução

Os principais conceitos da metodologia de ACV foram determinados no início da década de 60, de acordo com FAVA et. al (1991). Uma das primeiras publicações foi a de Harold Smith, na “*World Energy Conference*”, em 1963, que reportou cálculos de consumo de energia para a produção de produtos químicos intermediários e produtos acabados.

De acordo com Borges (2004), outros trabalhos, destacando-se aqueles publicados no livro, *The Limits to Growth*, escrito por Donella Meadows, em 1972, foram então publicados como tentativas de previsões sobre as mudanças no crescimento da população mundial e como essas mudanças afetariam o consumo de matérias-primas e energia. Tais trabalhos geraram interesse em cálculos energéticos mais detalhados dos processos industriais.

Em 1965, a Coca-Cola encomendou um estudo ao *Midwest Research Institute* (MRI), posteriormente aprimorado pelo próprio Instituto, que quantificava o uso de matérias-primas e energia, e as emissões ambientais do processo de manufatura para diversas embalagens de bebidas, para determinar qual delas teria o menor nível de emissões de poluentes e qual afetaria menos a provisão de recursos naturais. De acordo com Chehebe (1998), foi o primeiro modelo do que conhecemos hoje como Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

No início da década de 90, um extenso estudo sobre materiais para embalagens foi contratado pelo Ministério do Meio Ambiente da Suíça, que acabou gerando um banco de dados referencial para outros, inclusive a versão do primeiro software para ACV, o *Ökibase I* (CHEHEBE, 1998).

Segundo Ribeiro (2004), a primeira norma da série ISO 14040, sobre ACV, foi editada em 1997, tendo sido a tradução da mesma, lançada pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), em novembro de 2001.

De acordo com esta norma, o ciclo de vida de um produto corresponde a todos os estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou geração de recursos naturais à disposição final e ACV é uma técnica para avaliar os aspectos ambientais, elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que podem interagir com o meio ambiente, e os impactos potenciais associados a um produto por todo seu ciclo de vida mediante a compilação das entradas e saídas do sistema de produto em estudo, a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a esses fluxos, e por fim a interpretação dos resultados dessa análise e da avaliação de impactos de acordo com os objetivos do estudo.

De forma mais simplificada, a ACV foi definida por Chehebe (1998) como uma técnica que permite avaliar os aspectos ambientais (entradas e saídas do sistema

de produto) e os impactos potenciais associados a todo o processo de fabricação de um produto, desde a origem à sua disposição final.

4.1.2.1.2 Metodologia

A estrutura da metodologia, recomendada pela norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), deve incluir as seguintes etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. A Figura 1 apresenta as fases da ACV, onde as setas duplas indicam interatividade entre elas.

Figura 1: Estrutura da Avaliação do ciclo de vida (ABNT, 2001, p. 5)

- Definição de meta e escopo

O objetivo de um estudo de ACV deve incluir os propósitos pretendidos com o estudo, o público-alvo, a necessidade do estudo, sua aplicação potencial e os requisitos para o relatório de resultados.

Já na definição de escopo, conforme Chehebe (1998), de uma forma geral, devem ser estabelecidas as três dimensões do estudo:

- Extensão: onde iniciar e parar o ciclo de vida.
- Largura: quantos e quais subsistemas considerar.
- Profundidade: nível de detalhamento do estudo.

Tais dimensões, representadas na Figura 2, devem ser definidas de forma compatível e suficiente para atender ao objetivo do estudo estabelecido.

Figura 2: Dimensões da ACV (CHEHEBE, 1998, p. 23)

Os sub-itens a seguir devem ser considerados e claramente descritos no escopo do estudo (ABNT, 2001):

- *Sistema de produto*: é definido por ABNT (2001) como “um conjunto de unidades de processo, conectadas material e energeticamente, que realiza uma ou mais funções previamente definidas”. Entende-se por unidade de processo, ainda segundo ABNT (2001), como a “menor porção de um sistema de produto para a qual são coletados dados quando é realizada uma avaliação do ciclo de vida”.

- *Função do produto*: é a definição das características de performance do produto a ser estudado (CHEHEBE, 1998). Em caso de um estudo comparativo, os produtos avaliados devem exercer, obrigatoriamente, a mesma função.

- *Unidade funcional*: é a quantificação da função do produto para que se tenha um parâmetro em relação ao qual os aspectos ambientais serão normalizados.

- *Fluxo de referência*: é a quantidade de produto necessária para exercer a função na medida estabelecida pela unidade funcional.

- *Fronteiras do sistema de produto*: são responsáveis pela delimitação do estudo, determinando quais unidades de processo devem ser ou não incluídas. Vários fatores determinam as fronteiras do sistema, inclusive a aplicação pretendida do estudo, as suposições feitas, os critérios de corte dos insumos, restrições de dados e custo, e o público-alvo pretendido (ABNT, 2001).

– *Requisitos de qualidade de dados*: devem ser estabelecidos para que os objetivos do estudo sejam alcançados. Esses requisitos iniciais devem abordar os seguintes parâmetros, quando um estudo é usado para apoiar uma afirmação comparativa, que é disponibilizada ao público (ABNT, 2001): período de tempo coberto, área geográfica coberta, tecnologias cobertas, precisão, representatividade dos dados, consistência e reprodutibilidade.

- **Análise do Inventário**

É a etapa do estudo de ACV que envolve a compilação e a quantificação de entradas e saídas (aspectos ambientais) para o sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2001).

De forma simplificada, Chehebe (1998) definiu como a etapa de coleta e quantificação de todas as variáveis (matéria-prima, energia, emissões atmosféricas, efluentes líquidos, resíduos sólidos etc), relacionadas com o ciclo de vida de um produto ou processo.

A condução do inventário tem caráter iterativo, pois, na medida em que se conhece mais sobre o sistema de produto e os dados são coletados, podem ser identificadas novas condições ou limitações para os dados, o que demanda alterações na forma de coleta dos mesmos, necessitando, portanto, uma reavaliação dos objetivos e escopo (ABNT, 2001).

A seguir, são relacionadas, as fases necessárias para a elaboração de um inventário.

– *Coleta de dados*: é a tarefa que mais consome tempo, pois exige a reunião de muitas informações qualitativas e quantitativas sobre as unidades do processo que compõem o modelo do sistema de produto. Além disso, muitos dos dados às vezes não estão disponíveis ou não são de boa qualidade, ou não representam a realidade do sistema.

Para a execução dessa tarefa, Wenzel, Hauschild e Alting (2000) recomendam que primeiro seja feita uma pesquisa bibliográfica detalhada, para obtenção de informações relevantes ao estudo e, em seguida, a elaboração de um questionário destinado às empresas envolvidas no sistema de produto, para que essas forneçam os dados necessários.

Os dados utilizados podem ser primários – quando coletados diretamente no local onde acontece a fabricação do produto em estudo, ou secundários – obtidos na literatura ou banco de dados. Com a ausência de dados primários confiáveis para a realização do estudo, principalmente por questão de sigilo industrial, por muitas vezes acabam sendo utilizados dados secundários.

– *Procedimento de cálculos*: são os cálculos necessários para que os dados coletados sejam adequados ao fluxo de referência e à unidade funcional (ABNT, 2004). Neste item também se inclui o refinamento das fronteiras do sistema, excluindo ou incluindo subsistemas, fluxos de materiais e unidades de processo, de acordo com o seu grau de significância.

– *Alocação*: necessária quando se lidam com sistemas que envolvem mais de um produto. Os fluxos de materiais e de energia, assim como as liberações associadas ao ambiente, devem ser alocados aos diferentes produtos. (ABNT, 2004). De forma simplificada, foi assim definida por Wenzel, Hauschild e Alting (2000): método de distribuição das contribuições dos impactos entre os diferentes resultados do sistema.

A norma NBR ISO 14041 (ABNT, 2004) recomenda que a alocação seja evitada sempre que possível, mas caso necessária, deve-se repartir as entradas e saídas entre os diferentes produtos, de maneira que reflita as relações físicas elementares entre eles e, caso tais relações não possam ser estabelecidas, deve então ser feita em função da relação econômica entre os produtos.

- Avaliação de Impacto

Nesta etapa, ocorre a associação de dados do inventário a impactos ambientais. É necessário destacar que impactos ambientais devem ser entendidos, segundo a ABNT (1996), como quaisquer modificações adversas ao meio ambiente.

O nível de detalhe, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo. As fases da avaliação de impacto obrigatórias são: classificação – os resultados do inventário são distribuídos em categorias de impacto e, caracterização – os dados já classificados são convertidos à

mesma unidade através de fatores de equivalência e, posteriormente, agregados para cada categoria de impacto (ISO, 2000).

Ainda existem três fases opcionais, segundo a ISO (2000): normalização – os dados ambientais são normalizados em relação a uma referência, essa fase foi assim exemplificada por Chehebe (1998): “se um processo emite 1 tonelada de poluição, e a emissão global de todas as fontes para o mesmo item de poluição é um milhão de toneladas em um ano, o impacto ambiental do processo sobre esse problema é equivalente a um milionésimo de um ano”; agrupamento – é feita uma reorganização das categorias de impacto, podendo ser ordenadas de acordo com o seu tipo (efeitos sobre meio físico, consumo de recursos não-renováveis etc) ou segundo uma ordem de importância; e valoração (ou ponderação) – os resultados obtidos para cada categoria de impacto são convertidos a um simples indicador, através da distribuição de pesos a cada problema ambiental, considerando seu grau de gravidade relativa (CHEHEBE, 1998).

No caso da Análise de Ecoeficiência, conforme dito anteriormente, esta etapa tem como objetivo, apresentar os dados do inventário em dez categorias: consumo de recursos energéticos, consumo de recursos materiais, resíduos sólidos, efluentes líquidos, formação fotoquímica de ozônio, efeito estufa, chuva ácida, destruição da camada de ozônio, uso da terra e potencial de toxicidade.

No entanto, os cálculos necessários para determinar tais categorias são realizados de forma que, em parte, difere das normas ABNT e, portanto, serão descritos a seguir.

– *Consumo de recursos energéticos*: Consta da soma total de energia utilizada em cada um dos sistemas de produto.

– *Consumo de recursos materiais*: Quanto mais baixa a reserva da matéria-prima e mais alta a taxa de seu consumo, mais escassa esta é considerada e, sendo assim, mais peso ela terá na análise. Baseado na reserva mundialmente disponível da matéria-prima, em milhões de toneladas e, em seu tempo estimado de duração, em anos, calcula-se um fator de equivalência. A fórmula para seu cálculo é:

$$\frac{1000}{\text{reserva_mundial}} * \sqrt{\frac{\text{reserva_mundial}}{\text{duração_reserva_mundial}}}$$

A Tabela 1 apresenta alguns fatores para as

principais matérias-primas, de acordo com a metodologia de Ecoeficiência.

Tabela 1: Fatores de reserva calculados para algumas matérias-primas

Matéria-prima	Duração reserva mundial (anos)	Reserva mundial	
		(milhões de toneladas)	Fator
Alumínio	250	2,50E+04	0,40
Bauxita	197	2,50E+04	0,45
Cobre	26	6,50E+02	7,69
Cromo	263	7,60E+03	0,71
Manganês	86	6,60E+02	4,20
NaCl	1000	1,80E+07	0,01
Petróleo	47	1,72E+05	0,35
Basalto	1000	1,80E+07	0,01
Dolomita	500	1,80E+07	0,01
Gás natural	65	1,24E+05	0,35
Urânio	37	2,3E+00	108,4
Carvão	162	4,87E+05	0,11
Enxofre	40	1,40E+03	4,23
Zinco	24	1,90E+02	14,81
Areia	1000	1,80E+07	0,01

Fonte: Adaptada de Saling et al. (2002, p.7)

O somatório dos produtos da quantidade de cada um dos recursos materiais utilizados no ciclo de vida do produto pelo fator correspondente determinará o valor desta categoria.

– *Resíduos sólidos*: cada um dos resíduos é classificado como resíduo de construção civil, resíduo de mineração, resíduo municipal e resíduo industrial, sendo atribuídos os seguintes pesos 0,04; 0,2; 1; 5, respectivamente, de acordo com o custo médio de descarte dos mesmos na Europa (mineração 2 EUR/t, construção civil 10 EUR/t, doméstico 50 EUR/t; especial 250 EUR/t).

O valor desta categoria será, portanto, o somatório dos produtos da quantidade de cada um dos tipos de resíduo utilizados no ciclo de vida do produto, pelo peso correspondente.

– *Efluentes líquidos*: Para esta categoria, estima-se a quantidade de água necessária para diluir cada um dos poluentes contidos no efluente de forma que este não seja nocivo ao meio ambiente. Para tanto, de acordo com Saling et al (2002), utiliza-se o limite crítico aceitável de cada substância determinado pelo *Regulation on requirements for the discharge of wastewater into surface waters* (Abwasserverordnung – AbwV) de 27 de março de 1997.

A Tabela 2, a seguir, apresenta os limites críticos para Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), N-total, NH_4^+ , P-total, Halogênio Orgânico Adsorvível (AOX), metais pesados, hidrocarbonetos (HC), SO_4^{2-} e Cl^- .

Tabela 2: Valores limites para efluentes líquidos

Poluentes	Limite
DQO	75 mg/l
DBO	15 mg/l
N-total	18 mg/l
NH_4^+	10 mg/l
P-total	1 mg/l
AOX	1 mg/l
Metais pesados	1 mg/l
HC	2 mg/l
SO_4^{2-}	1000 mg/l
Cl^-	1000 mg/l

Fonte: Adaptada de Saling et al (2002, p.7)

O valor desta categoria corresponde, portanto, ao somatório das quantidades de água necessárias para diluir cada um dos poluentes.

– *Formação fotoquímica de ozônio, Efeito estufa, Chuva ácida, Destruição da camada de ozônio*: Essas quatro categorias são determinadas usando-se os fatores da Tabela 3, levantados pelo *Kommission Reinhaltung der Luft*.

Tabela 3: Fatores para determinação dos impactos ambientais ocasionados pelas emissões atmosféricas

Emissões atmosféricas	Efeito estufa (EE)	Destruição da camada de ozônio (DCO)	Formação fotoquímica de ozônio (FFO)	Chuva ácida (CA)
CO_2	1	-	-	-
SO_2	-	-	-	1
NO_x	-	-	-	0,7
CH_4	21	-	0,007	-
Hidrocarbonetos	-	-	0,416	-
Hidrocarbonetos halogenados	4.000	1	-	-
NH_3	-	-	-	1,88
N_2O	310	-	-	-
HCl	-	-	-	0,88
HF	-	-	-	1,2

Fonte: Adaptada de Saling et al. (2002, p.4)

Para a categoria efeito estufa, por exemplo, os aspectos ambientais envolvidos são CO₂, CH₄, hidrocarbonetos halogenados e N₂O, portanto, supondo que as quantidades dessas substâncias sejam x, y, z e w, respectivamente, o cálculo para determinar seu valor total será: $(x * 1) + (y * 21) + (z * 4000) + (w * 310)$. O mesmo raciocínio é utilizado para a determinação das demais categorias.

– *Uso da terra:*

Esta categoria é determinada com base no estudo suíço de Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt et al (1996), o qual, expressa a quantidade de área usada na unidade área * ano e, a classifica em cinco categorias.

A primeira delas (área I), refere-se à área que quase não sofreu modificação, é a área mais próxima possível da natureza original, a segunda (área II), corresponde a seminatural ou de bioagricultura, a terceira (área III), à extensão territorial de agricultura convencional ou já modificada pelo homem, a quarta (área IV), denominada selada, é a área de indústrias, aterros e edificação e, por fim, tem-se a área tomada por estradas e rodovias (área V).

A quantidade de área transformada é sempre igual à quantidade de área ocupada. Por convenção do estudo suíço, a primeira apresenta sinal negativo e a segunda, sinal positivo.

Para cada tipo de área, a metodologia de ecoeficiência atribui um peso diferente: área I – 1,0; área II – 1,5; área III – 2,3; área IV – 5,1 e área V – 7,6. O valor desta categoria será, portanto, o somatório dos produtos da quantidade de cada um dos tipos de área pelo peso correspondente.

– *Potencial de toxicidade:*

O potencial de toxicidade é determinado a partir das chamadas Frases R que são 68 frases indicadoras dos riscos relacionados às substâncias químicas, estabelecidas pela União Européia no anexo III da Diretiva 67/548/CEE, consolidada e republicada na Directiva 2001/59/CE (EUR-Lex-32001L0059-EN, 2006).

Cada frase é identificada por um código composto pela letra R seguida de um número. A análise de ecoeficiência da BASF divide essas frases e suas associações, em sete grupos, aos quais são atribuídos pontos de 0 a 1.000, sendo mais alta a

pontuação para o grupo de frases indicativas das substâncias mais tóxicas. A Tabela 4 apresenta os grupos com as respectivas frases constituintes e a pontuação recebida.

Tabela 4: Frases R e respectivas pontuações

Grupos	Frases	Pontuação
0	R 1, R 2, R 3, R 4, R 5, R 6, R 7, R 8, R 9, R 10, R 11, R 12, R 19, R 30, R 44, R 50, R 51, R 52, R 53, R 54, R 55, R 56, R 57, R 58, R 59, R 14/15, R 15/29, R 50/53, R 51/53, R 52/53,	0
1	R 22, R 36, R 38, R 66, R 67	100
2	R 21, R 22, 34, R 35, R 37, R 41, R 42, R 43, R 65, R 36/37/38	300
3	R 20, R 24, R 25, R 20/21, R 20/22, R 21/22	400
4	R 23, R 27, R 28, R 29, R 31, R 33, R 39, R 48, R 60, R 62, R 63, R 64, R 68, R 20/21/22, R 23/24, R 23/25, R 23/24/25, R 24/25, R 27/28, R 39/23, R 39/24, R 39/25, R 39/23/24, R 39/23/25, R 39/24/25, R 39/27, R 39/28, R 39/27/28, R 68/20, R 68/21, R 68/22, R 68/20/21, R 68/20/22, R 68/21/22, R 68/20/21/22, R 42/43, R 48/20, R 48/21, R 48/22, R 48/20/21, R 48/20/22, R 48/21/22, R 48/20/21/22, R 48/24, R 48/25, R 48/24/25	550
5	R 26, R 32, R 40, R 45, R 46, R 49, R 61, R 26/27, R 26/28, R 26/27/28, R 39/23/24/25, R 39/26, R 39/26/27, R 39/26/28, R 48/23, R 48/23/24, R 48/23/25, R 48/23/24/25, R 50/53, R 51/53, R 52/53	750
6	R 39/26/27/28	1000

As matérias-primas participantes do ciclo de vida do produto estudado são classificadas de acordo com as frases R. O somatório da multiplicação das quantidades dessas substâncias, em quilo, pelo peso do grupo a qual pertencem, corresponde, portanto, a categoria potencial de toxicidade.

- Interpretação

O objetivo da etapa de interpretação é analisar os resultados, apresentar as conclusões, limitações e recomendações baseadas nas fases anteriores do estudo.

Segundo Chehebe (1998), nesta etapa são identificadas as questões ambientais mais significativas; a consistência e integridade do estudo são verificadas e,

conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais mais importantes são apresentados.

Esta etapa pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, assim como da natureza e da qualidade dos dados coletados de forma consistente com o objetivo definido (ABNT, 2001).

4.1.2.2 Avaliação de riscos

Nesta etapa são identificados os possíveis riscos de acidentes relacionados ao modelo representativo de cada produto, determinado durante a realização da ACV. A partir dessa identificação, determina-se sua ocorrência e atribuem-se pesos para classificar cada um quanto à severidade. Faz-se, então, o produto entre severidade e ocorrência para cada um dos acidentes identificados. A categoria potencial de risco corresponde ao somatório de tais produtos, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Exemplo da categoria potencial de risco

Riscos	Produto A			Produto B		
	Ocorrência	Severidade	Produto	Ocorrência	Severidade	Produto
Explosão	0,5	5	2,5	0,3	5	1,5
Acidentes de trânsito interno	2	7	14	3	7	21
Potencial de risco			16,5			22,5

4.1.2.3 Normalização

Segundo Saling et al (2002), os valores obtidos em todas as categorias devem ser normalizados por categoria, entre as alternativas, para que seja possível, a partir daí, trabalhar com números relativos. Essa normalização é feita atribuindo-se o valor 1 à alternativa com maior valor e, calculando-se as demais por linearidade.

Para exemplificação, suponha-se um estudo onde se queiram comparar três produtos que tenham como resultado para a categoria consumo de recursos

energéticos os valores 880.000 MJ para a alternativa A, 834.000 MJ para a alternativa B e 806.000 MJ para a alternativa C, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6: Exemplo de normalização da categoria Consumo de recursos energéticos entre as alternativas

Produtos	Consumo de Recursos	Valores
	Energéticos	normalizados
Alt A	880.958 MJ	1,0
Alt B	834.248 MJ	0,95
Alt C	806.222 MJ	0,91

O valor da alternativa A, por ser o maior, receberá o valor 1 e, portanto, por proporcionalidade, se 880958 MJ equivale a 1, equivalerão a 0,95 e, 0,91 os valores das alternativas B e C, respectivamente.

4.1.2.4. Agregação das categorias para determinação dos índices ambientais

Após a transformação de todas as categorias em números relativos, os mesmos estão prontos para serem agregados em um único índice ambiental, porém, as categorias são unidas por partes, conforme a Figura 3.

Figura 3: Agregação das categorias (SALING et al., 2002, p. 12_adaptada)

As categorias EE, DCO, FFO e CA tornam-se uma única categoria, a qual recebe a denominação de “emissões atmosféricas”. Esta, com os efluentes líquidos e os resíduos sólidos, forma o grupo “rejeitos”. Resultam, portanto, seis novas categorias para compor o perfil ambiental: potencial de risco, potencial de toxicidade,

rejeitos, consumo dos recursos materiais, consumo dos recursos energéticos e uso da terra.

Todas as agregações são feitas por ponderações que consideram, primeiramente, dois tipos de fatores expressos em percentuais: social e de relevância.

O primeiro corresponde ao quanto a sociedade considera cada impacto ambiental importante; para obtê-lo, busca-se a opinião pública e de especialistas, por meio de questionários (Anexo A).

Já, o segundo indica em quanto os valores obtidos, em cada uma das categorias, contribuem para o total da região considerada no estudo, em um ano. Por exemplo, para a categoria consumo dos recursos energéticos, o fator de relevância indica o quanto o consumo de energia no ciclo de vida do produto contribui para o consumo total de energia na região, em um ano. Para determiná-lo, divide-se o maior valor (absoluto) em módulo dentre as alternativas, pelo valor total em um ano, estimado para a região onde é executado o estudo (SALING ET AL, 2002). Para este último, a Tabela 7 apresenta um exemplo ilustrativo de cálculo para a categoria EE.

Tabela 7: Cálculo do fator de relevância para EE

Produtos	EE (kg-equivalentes de CO ₂)	Fator de Relevância
Alt 1	51.259	$\left(\frac{51.259}{1.010 \times 10^6} \right)$
Alt 2	50.320	
Alt 3	49.879	
Total do país	1.010×10^6	

Os fatores de relevância devem ser normalizados em 100 para que sejam obtidos valores em percentuais, conforme mencionado anteriormente.

De acordo com Saling (2005) e Zanchetta (2005), a média geométrica dos fatores social e de relevância normalizado indica um novo fator, denominado fator de ponderação. Este também deve ser normalizado em 100 para que se obtenham as porcentagens.

Para cada alternativa, faz-se uma média ponderada dos valores relativos das categorias a serem agregadas (usando-se os fatores de ponderação). A Tabela 8 exemplifica a agregação do EE, DCO, FFO e CA em emissões atmosféricas.

Tabela 8: Agregação de EE, DCO, CA e FFO em emissões atmosféricas.

Categorias	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5	Fatores de ponderação normalizados
EE	1	0,97	0,91	0,99	0,7	47%
DCO	1	1	1	1	1	6%
CA	1	0,96	0,85	0,91	0,83	20%
FFO	1	0,98	0,77	0,80	0,65	27%
Emissões atmosféricas	1	0,97	0,87	0,92	0,73	

O procedimento deve ser repetido para juntar os efluentes líquidos, as emissões atmosféricas e os resíduos sólidos em rejeitos e também, para unir as seis categorias restantes em um único índice para cada alternativa estudada.

A Figura 4 exibe um gráfico, denominado impressão ecológica que apresenta quatro alternativas e respectivos perfis ambientais que permitem, posteriormente, obter um único índice ambiental para cada alternativa.

Figura 4: Impressão Ecológica – Perfis Ambientais (ZANCHETTA-URSO; SILVA, 2005)

4.1.3 Pilar Econômico

A questão econômica na Análise de Ecoeficiência da BASF é abordada através do levantamento de custos que ocorrem durante todo o ciclo de vida do produto, considerando, portanto, o processo de fabricação, os investimentos em equipamentos e tecnologia e, os custos relacionados à sua utilização no futuro. Não existe, porém, um método único para esse cálculo, pois este depende do objetivo da análise. Na maioria dos casos, é estimado através do preço de compra, preço de revenda e depreciação para o consumidor final e, quando a comparação ocorre entre

processos, utilizam-se métodos de valor presente, depreciação e taxa de retorno para o custo final do produto (SALING ET AL, 2002).

4.1.3.1. Determinação dos Índices Econômicos

Após a determinação dos custos totais de cada alternativa, obtêm-se os índices econômicos, os quais são calculados por linearidade, a partir da consideração de que o maior valor dos custos totais é representado pelo valor 1, de acordo com SALING (2005) e ZANCHETTA (2005).

4.1.4 Inter-relacionamento entre os pilares

Após a determinação dos índices econômicos e ambientais, é calculada uma relação ambiental-econômica. Esta consta da raiz quadrada da divisão entre a média aritmética de todos os fatores de relevância (calculados durante as agregações das categorias) pelo fator de relevância econômico. Este último é calculado dividindo-se o maior custo entre as alternativas pelo produto interno bruto (PIB) da região onde está sendo aplicado o estudo.

Além disso, são calculadas as médias dos índices ambientais e as médias dos índices econômicos, para em seguida, determinar o desvio de cada um dos índices em relação às respectivas médias. A Figura 5 apresenta um exemplo para cálculo dos desvios dos índices ambientais.

Figura 5: Cálculo dos desvios dos índices ambientais para inter-relacionamento entre os pilares

Utilizando-se o valor obtido para a relação ambiental-econômica, e os desvios, os índices ambientais e econômicos são inter-relacionados, gerando novos índices econômicos e ambientais que serão utilizados para determinação do resultado final da

análise, pois dessa forma, ter-se-á como garantia que ambos os pilares posuam o mesmo peso no resultado final.

A fórmula utilizada para o cálculo desses novos índices não será divulgada neste trabalho, pois é considerada pela BASF como confidencial.

4.1.5 Análise de Resultados

Os resultados da Análise de Ecoeficiência são expressos em um gráfico, denominado matriz de ecoeficiência, exibido a seguir na Figura 6. Através dele, tornam-se fáceis a compreensão e interpretação dos resultados da análise.

Figura 6: Matriz de ecoeficiência – Representação dos resultados da Análise de Ecoeficiência (ZANCHETTA-URSO; SILVA, 2005)

No caso apresentado na Figura 5, é possível observar que os melhores desempenhos ambientais são aqueles das alternativas 1 e 4, praticamente idênticos, porém a primeira supera a segunda no que diz respeito ao pilar econômico, o que a torna a mais ecoeficiente. A terceira opção, em relação às outras três, apresenta o pior desempenho econômico e ambiental o que a classifica como a menos ecoeficiente.

Ainda podem ser executadas análises de sensibilidade dos resultados para verificar o efeito causado pela variação na entrada de dados. Cenários podem ser simulados para direcionamento estratégico de ações em pesquisa e desenvolvimento.

4.2 Petrodiesel

4.2.1 Introdução

Petrodiesel é o nome dado ao combustível derivado do petróleo, formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e, em baixas concentrações, por átomos de enxofre, nitrogênio e oxigênio. É inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. (PORTAL BR, 2005). A Tabela 09 apresenta as cadeias carbônicas típicas do óleo diesel.

Tabela 9: Cadeias carbônicas típicas do óleo diesel

Número de Átomos de Carbono na Cadeia	% Massa	Número de Átomos de Carbono na Cadeia	% Massa	Número de Átomos de Carbono na Cadeia	% Massa
C ₆	0,001	C ₁₅	8,79	C ₂₄	2,33
C ₇	0,02	C ₁₆	8,14	C ₂₅	1,55
C ₈	0,38	C ₁₇	6,65	C ₂₆	0,83
C ₉	1,07	C ₁₈	7,22	C ₂₇	0,80
C ₁₀	6,8	C ₁₉	6,01	C ₂₈	0,14
C ₁₁	7,52	C ₂₀	5,18	C ₂₉	0,05
C ₁₂	8,00	C ₂₁	5,14	C ₃₀	0,03
C ₁₃	8,00	C ₂₂	4,00	C ₃₁	0,00
C ₁₄	8,21	C ₂₃	3,21	C ₃₂	0,00

Fonte: Santos (2000, p. 10)

O uso do petrodiesel em larga escala nos dias atuais foi incentivado pela descoberta das grandes jazidas de petróleo (nas primeiras décadas do século passado) e pelo rápido desenvolvimento da indústria petroquímica, que favoreceram a geração de combustíveis baratos e em grande quantidade.

A partir de meados do século XIX, com a descoberta do primeiro poço de petróleo, na Pensilvânia, pelo Coronel Edwin Drake, o petróleo e o gás natural foram adquirindo espaço na matriz energética mundial e, no século XX, o paradigma energético passou a ser, portanto, o petróleo. Atualmente, pode-se dizer que a produção e o uso do petróleo e de seus derivados tornaram-se um símbolo do progresso do homem e da sua total dependência.

No Brasil, o petrodiesel é o derivado de petróleo de maior consumo, principalmente pelo peso do transporte rodoviário na economia do país.

Atualmente, encontram-se definidos e especificados, conforme Santos (2000), cinco tipos de óleo diesel: tipos A, B, C, D e óleo diesel marítimo. Estes variam, principalmente, de acordo com o teor de enxofre (responsável pela lubricidade do combustível) e volatilidade. No entanto, no Brasil, ainda segundo Santos (2000), os óleos disponíveis no mercado são dos tipos B, D e diesel marítimo.

O primeiro apresenta teor de enxofre de, no máximo, 0,5%, e encontra-se em todas as regiões do Brasil, exceto as principais regiões metropolitanas, onde é disponibilizado o óleo tipo D, também chamado de diesel metropolitano, que possui, no máximo, 0,2% de enxofre. Já o óleo diesel marítimo é um óleo especialmente produzido para utilização em motores de embarcações marítimas, com um teor de enxofre especificado de, no máximo, 1,00%.

Este trabalho levará em conta a produção do diesel tipo D, de baixo índice de enxofre, pois segundo a Petrobras (2005) é usado nas maiores frotas em circulação.

4.2.2 Mercado

Segundo a ANP (2005b), o petróleo consumido no Brasil, é constituído de 24% de petróleo importado, principalmente, conforme a ANP (2005a), da África (57%) e Oriente Médio (28%). Os 76% de petróleo, originalmente brasileiro, são extraídos em sua maioria em alto mar, 85,5%, contra 14,5% do extraído em terra. (ANP, 2005e).

Em 2004, ainda segundo a ANP (2005f), 99.224.511 m³ de petróleo passaram pelo parque de refino nacional, obtendo-se uma produção total de petrodiesel de 38.252.266 m³, conforme ANP (2005d). Ainda segundo a ANP (2005d), a Petrobras é a maior produtora de petrodiesel com dez refinarias, das quais destaca-se a REPLAN, refinaria da cidade de Paulínia. A Figura 7 apresenta um gráfico com a distribuição da produção de petrodiesel por refinaria da Petrobras.

Figura 7: Distribuição da produção de petrodiesel nas refinarias da Petrobras (ANP, 2005d)

De acordo com a ANP (2005b), para completar os suprimentos nacionais de petrodiesel em 2004, ainda foram importados 2.694.702 m³, sendo a Índia (25, 69%) e a Arábia Saudita (17,63%), os principais países exportadores, conforme ANP (2005a).

4.2.3 Produção

A produção do petrodiesel pode ser dividida em duas etapas: extração e refino do petróleo.

A extração pode ser feita em mar ou em terra, e inicia-se com a perfuração de um poço de profundidade variável, normalmente de 800 a 6.000 m. Segundo a Petrobras (2005), a perfuração em terra é feita com a sonda de perfuração constituída de uma estrutura metálica, denominada torre. Esta sustenta um tubo vertical, a coluna de perfuração, em cuja extremidade é colocada uma broca, a qual é responsável pela perfuração das rochas. O material triturado é então analisado por um geólogo que determinará a ocorrência ou não do petróleo. Na perfuração marítima, o procedimento é o mesmo, porém a sonda é instalada em plataformas ou navios de perfuração.

Os dois tipos de extração utilizam bombas elétricas para retirar o petróleo da jazida, podendo ainda bombear água para aumentar a pressão no reservatório, e vapor de água ou substâncias químicas para reduzir a viscosidade do óleo. Nesta etapa também está incluído um tratamento térmico para separação da água e fornecimento

de energia para bombeamento do petróleo e do sal residual para transporte (NEIVA, 1993).

Para que o petróleo chegue às refinarias, a Petrobras opera uma extensa rede dutoviária e a maior frota de petroleiros do Hemisfério Sul. Segundo a ANP (2005c), existem 24 dutos em operação, com extensão de 1.903 km, para a transferência de petróleo no Brasil.

A primeira etapa do refino consiste em um processo de dessalgação ou dessalinização. Como o petróleo está normalmente associado à água, visto que a água salgada se acumula sob o petróleo, nas formações geológicas de onde ele é obtido, os sais nela dissolvidos devem ser eliminados. A permanência dos mesmos causa corrosão e entupimento de equipamentos, dificultando a transmissão de calor, acarretando excessivos tempos de paradas e substituições freqüentes de equipamentos. A dessalgação também separa alguns metais e sólidos em suspensão, que podem causar danos às unidades de destilação ou reduzirem a sua eficiência.

Segundo Oliveira (2005), a dessalgação é realizada por processo elétrico, que ocorre em dois estágios distintos. No primeiro, as gotas de água se unem formando gotas maiores devido à influência de um campo eletrostático e, no segundo, elas assentam sob a ação da gravidade.

De acordo com a ANP (2005c), após a dessalgação, o petróleo passa por um pré-aquecimento e, em seguida, é encaminhado para uma torre de destilação atmosférica, onde é fracionado de acordo com os pontos de ebulição dos hidrocarbonetos que o compõem. O petrodiesel é um dos produtos obtidos e será encaminhado para um processo de hidrotratamento para se transformar em produto final.

Ainda segundo a ANP (2005c), existe uma rota complementar para produção do petrodiesel, cuja utilização varia de acordo com a refinaria onde será produzido. A REPLAN, por exemplo, faz uso das duas rotas, diferentemente da REDUC que utiliza apenas a principal.

Na rota complementar, o produto de fundo da destilação atmosférica, RAT (Resíduo da Destilação Atmosférica), é bombeado para um forno a vácuo e em seguida, para uma torre de destilação a vácuo, onde ocorre um segundo fracionamento. O resíduo de vácuo, produto de fundo da destilação a vácuo, passa por

uma unidade de coque onde um dos produtos obtidos é o petrodiesel, que, assim como aquele obtido diretamente na destilação atmosférica, deve passar por um hidrotratamento para se transformar em produto final.

O hidrotratamento é um processo que utiliza gás hidrogênio e um catalisador, normalmente, à base de molibdênio para eliminação de enxofre e de nitrogênio.

A figura 8 apresenta um esquema simplificado das etapas de refino do petróleo para produção de petrodiesel considerando as duas rotas de produção possíveis.

Figura 8: Produção simplificada de petrodiesel

4.2.4 Subprodutos

No processo de refino do petróleo, são gerados, além do petrodiesel, diversos co-produtos como a gasolina automotiva, a gasolina de aviação, o GLP (Gás liquefeito de petróleo), a nafta, o óleo combustível, a parafina, o querosene de aviação, o querosene iluminante, o asfalto e o coque. A Tabela 10 apresenta a produção dos derivados de petróleo, em 2004, para o Brasil.

Tabela 10: Produção dos derivados de petróleo

Derivados de petróleo	Produção (m³)
Gasolina automotiva	17.577.808
Gasolina de aviação	79.829
GLP	8.135.294
Óleo combustível	16.497.346
Óleo diesel	38.252.266
Querosene de aviação	4.142.460
Querosene iluminante	112.858
Asfalto	1.415.212
Coque	1.738.899
Nafta	8.743.655
Parafina	143.729
Solvente	831.726
Lubrificante	710.767
Outros não-energéticos	1.370.839
Outros energéticos	147.259

Fonte: ANP (2005d)

O GLP é utilizado como gás de cozinha; o querosene de aviação é largamente empregado como combustível de turbinas de avião a jato, tendo ainda aproveitamento como solvente; a parafina é um produto comercial versátil, de aplicação industrial bastante ampla, como por exemplo, explosivos, impermeabilizante de papéis, revestimentos de pneus e mangueiras, dentre outras; o asfalto em grande parte é destinado à pavimentação, sendo o restante oxidado para ser utilizado como revestimento impermeabilizante; a nafta é empregada principalmente como matéria-prima da indústria petroquímica; o coque também apresenta extensa aplicação, destacando-se seu uso em siderurgias, termoelétricas a carvão e fundição metalúrgica de não-ferrosos.

4.3 Biodiesel

4.3.1 Introdução

Biodiesel é o nome dado ao combustível constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídio com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol,

respectivamente. Os triglicerídios são derivados de fontes renováveis, como os óleos vegetais e as gorduras animais.

É visto como excelente alternativa ao diesel fóssil, pois possui praticamente as mesmas propriedades daquele, o que, em tese, não exigiria adaptação de motores para sua utilização.

Há décadas estuda-se o uso de óleos vegetais crus, também denominados "in natura", como combustíveis. Em 1900, Rudolph Diesel apresentou o motor com ignição por compressão, na Exposição Mundial de Paris. Para a demonstração do funcionamento desse motor, Diesel usou o óleo de amendoim, declarando que o motor poderia ser alimentado por óleos vegetais o que contribuiria para o desenvolvimento da agricultura nos países que o utilizassem.

Note-se que a primeira patente de biodiesel feito com óleo de amendoim e metanol foi depositada no Japão, na década de 1940, conforme Batista (2005). Na referida época, esse combustível ainda não era denominado biodiesel, sendo tratado apenas como um éster metílico, substituinte do óleo diesel de petróleo.

No Brasil, os primeiros indícios do uso de óleos vegetais datam da década de 1920, sendo que há registros da década de 1950, de estudos sobre a utilização dos óleos de mamona (*Ricinus communis*), ouricuri (*Syagrus coronata*) e algodão, em motores diesel de 6 cilindros. (MACEDO; NOGUEIRA, 2004)

Porém, com a descoberta das grandes jazidas de petróleo e o rápido desenvolvimento da indústria petroquímica, os combustíveis fósseis passaram a apresentar preço muito mais baixo do que o dos óleos vegetais e, portanto, a indústria automotiva adotou os combustíveis fósseis em detrimento daqueles de origem vegetal.

No entanto, em 1973, houve um marco na história energética do planeta, uma verdadeira crise energética mundial que elevou drasticamente os custos do petróleo e seus combustíveis derivados. Dessa forma, segundo Iturra (2003, apud MACEDO; NOGUEIRA, 2004), a necessidade de reduzir a dependência do petróleo importado ocasionou um novo alento às pesquisas sobre óleos vegetais e combustíveis de biomassa em geral.

No Brasil, em 1975, foi criado o programa Pró-Álcool objetivando o desenvolvimento de tecnologia para fabricação de etanol a partir da cana-de-açúcar, aproveitando-se o fato de que havia crise no mercado internacional de petróleo e de

que, segundo Parente (2003), já se sabia, por experiências anteriores, da qualidade do etanol como combustível.

Em 1980, houve a criação do PROÓLEO - Programa Nacional de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos; a partir daí, estudos sobre a utilização dos óleos vegetais se intensificaram, principalmente, porque o principal objetivo do programa era a substituição do óleo diesel por óleos vegetais em mistura de até 30% em volume, buscando-se, se possível, a total substituição.

Dos estudos realizados, verifica-se que o uso direto dos óleos vegetais nos motores ocasiona uma série de problemas, dos quais se destacam: a formação de gomas durante a combustão (que acabam se depositando nas paredes dos motores) e as emissões de acroleína, substância tóxica, obtida pela oxidação do glicerol presente no óleo. Como tentativa de contornar tais empecilhos, diferentes tecnologias foram desenvolvidas para converter óleos vegetais em combustíveis adequados.

Em outubro de 1980, foi anunciada no Centro de Convenções de Fortaleza, pelo Núcleo de Fontes Não Convencionais de Energia, da Universidade Federal do Ceará, a descoberta do *prodiesel*, definido como uma mistura de ésteres lineares de ácidos graxos, obtidos a partir de óleos vegetais. (MACEDO; NOGUEIRA, 2004)

Segundo Parente (2003), para acelerar a fabricação do novo combustível, foi criada, no Ceará, a PROERG – Produtora de Sistemas Energéticos Ltda., com uma unidade piloto industrial, com capacidade de produzir 200 litros por hora.

Porém, houve diminuição no preço do petróleo, fato esse que aliado à já desenvolvida indústria petroquímica, foi suficiente para paralisar os testes com o *prodiesel*.

No próprio ano de 1980, havia sido requerida patente para a invenção do novo combustível, porém, pelo tempo e desuso, a mesma entrou em domínio público. [PI – 8007957 (1980) apud Parente (2003)]

4.3.2 Situação Atual no Brasil

Em dezembro de 2004, foi criado no Brasil, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), “um programa interministerial do Governo Federal que objetiva a implementação de forma sustentável, tanto técnica, como economicamente,

a produção e uso do Biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda”. (PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL, 2005).

Para tanto, em janeiro de 2005, foi promulgada uma lei sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, “sendo fixado em 5%, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional. O prazo para aplicação do disposto é de oito anos após a publicação desta Lei, sendo de 3 três anos o período, após essa publicação, para se utilizar um percentual mínimo obrigatório intermediário de 2%, em volume”. (LEI N° 11.097, 2005).

Nessas condições, o biodiesel desempenhará o papel do enxofre na garantia da lubricidade do óleo diesel, com a vantagem de ser menos nocivo ao meio ambiente, fato esse que o fez receber a denominação de aditivo verde.

Segundo o relatório da Petrobio (2004), para identificar a mistura do biodiesel com petrodiesel, adotou-se mundialmente a nomenclatura B seguida da porcentagem em volume do biodiesel na mistura. Dessa forma, B2 e B5 são combustíveis com concentração de 2% e 5% de biodiesel, respectivamente.

Também fazendo parte do PNPB, foi promulgada, em 18 de maio de 2005, uma lei que estabelece as regras tributárias do biodiesel referentes ao PIS e à CONFINS, as quais, diferenciam-se em função da matéria-prima utilizada na produção, da região de produção dessa matéria-prima e do tipo de seu fornecedor (agricultura familiar ou agronegócio) (LEI 11.116, 2006).

A alíquota máxima cobrada é de R\$ 0,22 por litro. Se a matéria-prima utilizada for mamona ou dendê, nas regiões Nordeste ou Norte, cobra-se R\$ 0,15 por litro, porém se as oleaginosas forem plantadas nessas regiões por agricultores familiares, nada é cobrado. No caso de outras matérias-primas, independente da região, mas compradas de agricultores familiares, a taxa cobrada por litro é de R\$ 0,07. (LEI 11.116, 2006).

Com o objetivo de dar continuidade à política de incremento da participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional, realizaram-se até o momento, dois leilões públicos de Biodiesel, o primeiro em 23 de novembro de 2005 e o segundo em

30 de março de 2006, onde foram adquiridos 48.000 m³ e 170.000 m³, respectivamente, de produto (ANP, 2006b).

Há atualmente no país, três plantas de produção de biodiesel em funcionamento: a da Soyminas Biodiesel, localizada na cidade de Cássia, Minas Gerais, que produz biodiesel a partir de girassol e nabo forrageiro; a da Agropalma, em Belém, no Pará, que desenvolveu em conjunto com a UFRJ, uma tecnologia para aproveitar a borra do processo de refinamento do óleo de palma (dendê) para produzir o biocombustível e, a Biolix instalada em Rolândia, no Paraná, que faz uso da soja e do girassol como matérias-primas. As três plantas, apesar de utilizarem diferentes oleaginosas, até o momento, fazem uso do álcool metílico.

Segundo Alves (2005), titular da Soyminas Biodiesel, a usina está trabalhando com apenas 40% de sua capacidade, que é de 40 mil litros por dia. Já, na Agropalma, conforme Britto (2005), a capacidade instalada é de 24.000 m³ por ano, com uma produção anual de 6 mil toneladas.

De acordo com Felix (2005), sócio da Biolix, a empresa tem capacidade para 9.000 m³ por ano, os quais são utilizados em mistura B2 pela frota da própria empresa e também são comercializados, nas mesmas condições, para ônibus de linha em Rolândia.

Segundo Quintão (2005), a ANP, responsável pela regulação do mercado de biodiesel, tem pedidos de autorização em tramitação feitos por outras empresas interessadas na produção do biodiesel.

Até o momento, além da Agropalma, da Soy Minas Biodiesel e da Biolix, está autorizada a Brasil Biodiesel, a NUTEC, a Fertibom e, a Renobras (ANP, 2006a). Todas têm autorização para fabricar biodiesel pelas duas rotas, etílica e metílica.

A Brasil Biodiesel possui duas usinas uma em Teresina e outra em Floriano, ambas no estado do Piauí. A proposta é a utilização do óleo de mamona como matéria-prima. A capacidade de produção das duas usinas juntas é de 92 m³ de biodiesel por dia.

Também a partir do óleo de mamona, a NUTEC (Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará), tem capacidade de produção de 720 m³ de biodiesel por ano.

Na Fertibom, localizada no município de Catanduva, no estado de São Paulo, o biodiesel é obtido, principalmente, a partir de gordura animal que é adquirida de empresas que processam sobras de abatedouros, mas também, a partir de óleo vegetal de pinhão manso. A capacidade da usina é de 20 m³ por dia.

A Renobras, empresa do Grupo Biobras, tem sede na cidade de Campinas, com capacidade de produção diária da ordem de 20 m³. A exemplo da Biolix, produz combustível a partir de girassol e nabo forrageiro.

A companhia ALE Combustíveis S.A., primeira distribuidora do país a comercializar biodiesel, conta atualmente com 108 postos de combustível oferecendo mistura B2. Só no estado de São Paulo são 27 postos (Ale Combustíveis, 2005).

A distribuidora BR – Petrobras, no momento tem 100 postos comercializando a mistura B2, mas as perspectivas são de que até o início de julho deste ano, os postos oferecendo o produto sejam mais de 500 (PORTAL BR, 2006).

4.3.3 Aspectos Tecnológicos

Diferentes tecnologias foram desenvolvidas para converter óleos vegetais em combustíveis adequados, destacando-se o craqueamento térmico (pirólise), a esterificação e a transesterificação.

4.3.3.1 Craqueamento térmico (Pirólise)

Conforme Weisz et al (1979, apud HOLANDA, 2004), o craqueamento térmico é a conversão de uma substância em outra por aquecimento, na ausência de ar ou oxigênio, a temperaturas superiores a 450 graus centígrados, sendo por vezes ainda utilizado um catalisador (óxido de silício e óxido de alumínio, em geral) para a quebra das ligações químicas, gerando moléculas menores.

Os produtos da pirólise podem ser destilados e separados de acordo com seu peso molecular, podendo ser conseguidas frações equivalentes ao GLP, à gasolina e ao petrodiesel, de acordo com as condições impostas no processo de obtenção, sendo que esta última, para ser considerada biodiesel, necessita ainda de uma etapa de refino.

O craqueamento é, atualmente, considerado uma alternativa inviável economicamente, pois apresenta alto consumo energético e necessita de equipamento caro para ser realizado.

4.3.3.2 Esterificação

A esterificação nada mais é do que uma reação entre ácidos graxos livres e álcoois de baixo peso molecular, principalmente, metanol e etanol, na presença de um catalisador ácido ou básico.

A catálise ácida apresenta como desvantagem a dificuldade de remoção do resíduo de catalisador do material esterificado. Durante a lavagem da mistura obtida para retirada do catalisador, parte dos ácidos graxos esterificados é perdida por arraste, reduzindo o rendimento do processo. Uma forma de diminuir esse problema é a utilização de catalisadores heterogêneos, como as zeólitas que minimizam os custos de separação e purificação, tornando o processo mais atrativo.

A catálise alcalina (ou básica) tem como preferência a reação com os ácidos graxos livres para formação de sabão. Este, quando formado, desfavorece a reação de esterificação, favorecendo o surgimento de emulsões entre o álcool e o ácido graxo.

4.3.3.3 Transesterificação

A tecnologia de transesterificação tem sido apontada por vários especialistas como o processo de produção de melhor relação entre economia e eficiência, o que a torna, portanto, foco de estudo deste trabalho e será descrita em mais detalhes.

A transesterificação nada mais é do que uma reação entre um óleo ou gordura e um álcool simples de cadeia curta, com a presença de um catalisador ácido ou básico, formando um éster e, como co-produto, o glicerol (ou glicerina). A figura 9 apresenta uma reação de transesterificação.

Figura 9: Representação da reação de transesterificação. (VIANNA; SILVA; ZANCHETTA, 2006)

Por ser uma reação reversível, faz-se necessário um excesso de álcool para forçar o equilíbrio para o lado do produto desejado, visando o aumento do rendimento da conversão e permitindo a posterior separação dos ésteres do glicerol. No caso do etanol, apesar da estequiometria da reação ser de 3:1 (álcool:óleo), na prática, a relação deve ser de 6:1.

Para a ocorrência da reação, misturam-se o álcool e o catalisador em um tanque com um agitador. A mistura é transferida para um reator fechado que, conforme Macedo; Nogueira (2004), é usualmente aquecido a 70°C, onde se acrescenta o óleo vegetal. Este, no entanto, segundo Del Vecchio (2006b), antes de entrar no reator precisa passar por uma etapa de tratamento onde são reduzidos para um máximo de 0,1%, seus percentuais de umidade e de ácidos graxos livres, por meio de secagem e destilação a vapor ou neutralização, melhorando dessa forma, o rendimento do processo e a qualidade do produto obtido.

Ao final da reação, a carga que sai do reator contém todos os produtos da reação e o excesso de reagentes. Faz-se necessário, portanto, retirar os ésteres da massa resultante, assegurando-se, dessa forma, a pureza do produto final, obtendo-se desse modo, o teor máximo de glicerina aceito, que no caso brasileiro, varia de acordo com as especificações contidas nas normas técnicas estabelecidas para o biodiesel como combustível para uso em motor diesel (Portaria ANP n° 255, 2005). Além disso, para que o álcool em excesso possa ser reaproveitado, precisa ser separado.

A massa que deixa o reator é constituída de duas fases, separáveis por decantação e/ou centrifugação. A fase mais densa é composta de glicerina, impregnada com excessos de álcool, água e impurezas inerentes à matéria-prima,

enquanto que a fase leve é constituída de uma mistura de ésteres impregnada de excessos de álcool e impurezas.

A glicerina constituinte da fase de fundo deve ser sempre purificada, pois dessa forma apresentará maior valor de mercado, tornando mais competitivo o custo de venda do biodiesel. Normalmente, esta purificação é realizada por evaporação para a eliminação dos constituintes voláteis, que serão condensados posteriormente em um condensador, e por destilação a vácuo para a retirada de impurezas. O resíduo da destilação “glicerina residual” gira em torno de 10% a 15% do peso da glicerina bruta e, possíveis aplicações, até o momento, com resultados considerados promissores, estão sendo pesquisadas pela TECBIO – Tecnologias Bioenergéticas Ltda, empresa tecnológica incubada no PAR-TEC (Parque Tecnológico do NUTEC - Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial) (PARENTE, 2003).

Quanto à fase leve, para a purificação do éster, é necessária a recuperação do álcool, que segue o mesmo procedimento utilizado na recuperação deste da glicerina: é feita uma evaporação seguida de condensação, em condensador. O álcool recuperado das duas fases ainda contém quantidades significativas de água, sendo então necessário passar por uma destilação, no caso do metanol, e desidratação, no caso do etanol, pois neste último a dificuldade de separação da água é maior, visto que formam uma mistura azeotrópica.

Caso a purificação seja insuficiente ou a transesterificação tenha sido incompleta, o biodiesel produzido pode ficar contaminado com glicerol, triglicerídeos e álcool, sendo necessária, portanto, lavagem, centrifugação e posterior desumidificação, pois do contrário, a presença desses contaminantes pode ser prejudicial para os motores e para o meio ambiente.

A Figura 10 apresenta um fluxograma simplificado do processo de produção do biodiesel, considerando a utilização do processo de transesterificação.

Figura 10: Fluxograma simplificado do processo de produção de biodiesel por transesterificação (PARENTE, 2003, p 21)

4.3.4 Matéria-primas

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho considerará o processo de transesterificação para a produção do biodiesel e, sendo assim, além de um lipídio (matéria-prima principal), é necessário um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) como reagente.

Embora o foco deste trabalho seja a produção de biodiesel por óleos vegetais, vale ressaltar, que constituem a principal matéria-prima do biodiesel os ácidos graxos (lipídios) e estes também podem ter como origem os óleos e gorduras residuais e as gorduras de animais.

4.3.4.1 Gorduras de animais

A estrutura química das gorduras animais é semelhante à dos óleos vegetais, pois ambas apresentam triglicerídios de ácidos graxos. No entanto, aquelas diferem no tipo e distribuição desses elementos, quando há combinação com o glicerol.

As principais gorduras animais, passíveis de serem transformadas em biodiesel são o sebo bovino, os óleos de peixes, o óleo de mocotó e a banha de porco.

4.3.4.2 Óleos e gorduras residuais

Os óleos e gorduras residuais, resultantes de processamentos domésticos, comerciais e industriais, também constituem matéria-prima para a produção de biodiesel.

As principais fontes desse tipo de matéria-prima, segundo Parente (2003), são:

- as cozinhas industriais, comerciais e domésticas, onde são praticadas as frituras de alimentos;
- as indústrias nas quais se processam frituras de produtos alimentícios, como amêndoas, tubérculos, salgadinhos, e várias outras modalidades de petiscos;
- os esgotos municipais onde a nata sobrenadante (a espuma) é rica em matéria graxa, passível de extração de óleos e gorduras;
- as águas residuais de processos de certas indústrias alimentícias (como as de pescados) e outras, como a de couro, etc.

4.3.4.3 Óleos Vegetais

Todos os óleos vegetais - da categoria de óleos fixos ou triglicerídeos - podem ser transformados em biodiesel. Dessa forma, podem constituir matéria-prima para a produção de biodiesel, os óleos das seguintes espécies vegetais: grão de amendoim, polpa do dendê, amêndoa do coco da praia, caroço de algodão, soja, amêndoa do coco de babaçu, semente de girassol, semente de canola, semente de maracujá, polpa de

abacate, semente de linhaça, semente de tomate, dentre muitos outros vegetais em forma de sementes, amêndoas ou polpas.

A escolha do óleo vegetal varia de acordo com os cultivos e aptidões regionais, por esse motivo a EMBRAPA tem realizado diversos estudos, procurando determinar as melhores opções para cada região brasileira.

A Figura 11 apresenta as principais culturas apontadas até o momento. Observa-se que a única cultura de destaque da região norte, é a palma (ou dendê), enquanto no nordeste, têm-se o babaçú e a mamona. A soja e o algodão se sobressaem nas outras três regiões (sul, sudeste e centro-oeste), enquanto o girassol é mais indicado para a região centro-oeste, o nabo forrageiro e o amendoim para a região sudeste e, a canola (ou colza) para a região sul.

Figura 11: Potencialidades brasileiras para óleos vegetais (ARANDA, 2005).

A Tabela 11 indica para as espécies mais apontadas por Macedo; Nogueira (2004) o potencial para produção de óleo, considerando valores de produtividade e

teor de óleo de variedades. Porém, segundo Macedo; Nogueira (2004) as pesquisas agrônômicas têm mostrado que esses valores podem ser considerados conservadores.

Pode-se observar que o óleo da polpa do dendê se destaca entre as demais oleaginosas, pois tem o maior rendimento por hectare, mesmo apresentando um dos mais baixos teores de óleo por fruto, além de período de colheita durante todo o ano.

Tabela 11: Características de alguns vegetais com potencial para produção de biodiesel

Espécie	Origem do óleo	Conteúdo do Óleo (%)	Meses de Colheita	Rendimento em Óleo (t/ha)
Dendê (<i>Elaeis guineensis</i>)	Polpa	26	12	3,0 - 6,0
Babaçu (<i>Attalea speciosa M.</i>)	Amêndoa	66	12	0,4-0,8
Girassol (<i>Helianthus annuus</i>)	Grão	38 - 48	3	0,5 - 1,5
Colza (<i>Brassica campestris</i>)	Grão	40 - 48	3	0,5 - 0,9
Mamona (<i>Ricinus communis</i>)	Grão	43 - 45	3	0,5 - 1,0
Amendoim (<i>Arachis hipogaea</i>)	Grão	40 -50	3	0,6 - 0,8
Soja (<i>Glycine max</i>)	Grão	17	3	0,2 - 0,6

Fonte: Macedo; Nogueira (2004, p.4)

4.3.4.4 Metanol e Etanol

Segundo Macedo; Nogueira (2004), a transesterificação etílica é significativamente mais complexa do que a metílica, pois, com o aumento da cadeia carbônica do álcool utilizado, necessita-se de revisão dos parâmetros do processo. O mesmo confirma Parente (2003), ao considerar que, técnica e economicamente, a reação via metanol é muito mais vantajosa do que a reação via etanol, conforme pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12: Comparação de rotas metílica e etílica

Quantidades e Condições Usuais Médias	Rotas de Processo	
	Metílica	Etílica
Preço médio do álcool, US\$/kg	0,19	0,36
Temperatura recomendada da reação	60° C	85° C
Tempo de reação	45 minutos	90 minutos

Fonte: Parente (2003, p.23)

Porém, vale ressaltar que, sob o ponto de vista objetivo, as reações químicas utilizando metanol ou etanol são equivalentes, uma vez que ambos os ésteres obtidos têm propriedades similares como combustível e, portanto, são considerados biodiesel.

Segundo Macedo; Nogueira (2004), os ésteres metílicos apresentam melhor desempenho em relação aos ésteres etílicos, como se pode depreender da Tabela 13.

Tabela 13: Comparação entre ésteres metílicos e etílicos

Propriedade	Éster metílico	Éster etílico
Conversão (óleo → biodiesel)	97,5 %	94,3%
Glicerina total no biodiesel	0,87%	1,40%
Potência no motor comparada ao diesel	2,5% menor	4% menor
Consumo comparado ao diesel	10% maior	12% maior

Fonte: Macedo; Nogueira (2004, p.14)

O álcool mais utilizado na produção do biodiesel, até o momento, é o metanol, porém este estudo, conforme dito anteriormente, irá considerar a rota etílica de fabricação, visto que este é um álcool menos tóxico e de fonte renovável, além de ser mais vantajoso para o Brasil, pois o país já é produtor de etanol, tem a tecnologia necessária já desenvolvida e um mercado consolidado.

Vale ressaltar, no entanto, que apenas o etanol anidro (ausência de água) tem sido apontado como eficiente na produção do biodiesel, fato esse que o faz ser considerado na execução deste trabalho, pois de acordo com Ramos (2003), ao se utilizar um etanol hidratado, a água comprometeria a velocidade e o rendimento da reação de transesterificação, visto que esta tem caráter reversível.

4.3.5 Catalisadores

Os catalisadores utilizados podem ser enzimáticos, ácidos ou básicos.

A utilização de enzimas como catalisadores oferece algumas vantagens em relação aos catalisadores ácidos e alcalinos; dentre elas, estão a menor sensibilidade à presença de água, a melhor recuperação do catalisador e a facilidade na separação do biodiesel. Esta tecnologia, no entanto, ainda se encontra em estudo no Brasil; sabe-se

que em 1984 foi obtida uma patente relativa ao uso de guanidinas suportadas por polímeros orgânicos, porém é considerada uma alternativa de médio a longo prazo.

O catalisador ácido mais comumente empregado é o ácido sulfúrico, porém, a velocidade da reação ainda é muito lenta quando comparada ao uso de um catalisador alcalino. Além disso, antes da utilização do produto final, para evitar danos aos motores, faz-se necessária a sua completa remoção.

Por outro lado, a catálise alcalina é muito rápida, gerando bons rendimentos, em geral superiores a 90%, em relação à quantidade de óleo utilizado. No entanto, os catalisadores básicos são muito sensíveis à presença de água e ácidos graxos livres, os quais, mesmo em teores reduzidos, afetam o rendimento da reação, pois consomem o catalisador formando géis e sabões.

Atualmente, o hidróxido de sódio ou soda cáustica é o catalisador mais usado nos estudos brasileiros e mundiais, tanto por razões econômicas como pela sua disponibilidade no mercado. Este trabalho, portanto, considerará o biodiesel produzido na presença deste hidróxido como catalisador.

4.3.6 Subprodutos

Como co-produto do processo de produção de biodiesel, tem-se a glicerina, resultante da reação de transesterificação. Muito tem sido discutido sobre sua aplicação e mercado potencial. A produção brasileira de glicerina é basicamente toda destinada ao abastecimento nacional, mais especificamente, para as áreas de cosméticos e farmacêutica.

Com a vigência da utilização de 2% de biodiesel como aditivo ao diesel, estima-se, levando-se em conta o consumo de diesel, em 2004, de 40.946.968 m³, segundo a ANP (2005d), uma necessidade de produção de biodiesel da ordem de 818.939,36 m³ o que corresponde, segundo Silva (1997), a uma quantidade de glicerina de cerca de 82 mil toneladas. Partindo-se do mesmo raciocínio, para 5% de biodiesel no diesel, a produção da glicerina aumentaria para 205 mil toneladas. Em ambos os casos a quantidade é maior do que a consumida no Brasil anualmente, que é de 30 mil toneladas.

Sendo assim, outras aplicações estão sendo pesquisadas para a glicerina. Uma das possibilidades é a sua utilização na produção de aditivos oxigenados para combustíveis, em especial a gasolina, substituindo o MTBE (metil-t-butil-éter), cuja utilização já vem sendo proibida em alguns países, desde 2002. Há também estudos sobre a utilização como plastificante para PVC e outros polímeros como o amido e a celulose.

4.3.7 Especificações

A especificação de um combustível para uso comercial é considerada uma etapa essencial para sua adequada introdução no mercado, pois deve compatibilizar e harmonizar interesses muitas vezes contraditórios entre produtores do combustível, fabricantes de motores e de sistemas associados, além de órgãos ambientais, dentro de limites tecnológicos e econômicos.

Porém, no que se refere ao biodiesel no Brasil, ainda não existem parâmetros claros para se conseguir tal especificação, fato este que tem retardado a homologação da lei referente ao combustível. Os métodos de análise para biodiesel são os mesmos do diesel, com exceção dos teores de glicerina total e glicerina livre que, por orientação das Normas ASTM D-6584, vêm sendo analisados por cromatografia gasosa.

A ANP utilizou as normas européias (DIN 14214) e americanas (ASTM D-6751) para elaborar uma proposta para as normas do biodiesel brasileiro. No entanto, cabe destacar que a produção estrangeira é voltada para o girassol e a canola e, portanto, possui características diferentes do biodiesel do Brasil, que utiliza outras matérias-primas (soja, dendê, mamona e outras).

A Tabela 14, a seguir, apresenta uma descrição preliminar de propriedades do biodiesel, para ser utilizada em teste e como base para a definição de uma futura especificação para comercialização. Nesta portaria, define-se o biodiesel como sendo um combustível “composto de mono-alquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais”.

Tabela 14 - Propriedades do Biodiesel

Características	Unidades	Limites	Métodos	
			ABNT NBR	ASTM D - 6751
Ponto de fulgor, min	°C	100,0	14598	93
Água e sedimentos, max.	% vol.	0,050	-	2709
Viscosidade cinemática 40°C	mm ² /s	Anotar	10441	445
Cinzas sulfatadas, max.	%massa	0,020	9842	874
Enxofre total, max.	%massa	0,001	-	5453
Corrosividade ao Cu, 3h a 50°C, max	-	1	14359	130
Número de cetano, min.	-	45	-	613
Pto. de entupimento de filtro a frio, max.	°C	f(região, mês)	14747	6371
Resíduo de carbono, max.	%massa	0,05	-	4530
Índice de acidez, max.	mg OH/g	0,80	14448	664
Glicerina livre, max.	%massa	0,02	-	6584
Glicerina total, max.	%massa	0,38	-	6584
Aspecto	-	Límp. e s/ impureza	-	-
Destilação: 95% vol. recuperado, max.	°C	360	-	1160
Massa específica a 20°C	kg/m ³	Anotar	7148, 14065	1298
Metanol ou etanol, max.	%massa	0,5	-	-
Índice de iodo, max.	%massa	Anotar	-	-
Monoglicerídeos, max.	%massa	1,00	-	6584
Diglicerídeos, max.	%massa	0,25	-	6584
Triglicerídeos, max.	%massa	0,25	-	6584
Sódio + Potássio, max.	mg/kg	10	-	-
Fósforo, max.	mg/kg	10	-	4951
Estabilidade à oxidação a 110°C, min.	h	6	-	-

Fonte: ANP (2005, apud Holanda, 2004)

4.4 Óleo de dendê

4.4.1 Introdução

O dendezeiro é uma planta da família das Palmáceas (sub-família Ceroxilineas) típica de regiões tropicais. É originário da Costa Ocidental da África (Golfo da Guiné).

Dos diversos tipos de dendezeiros nativos, o gênero ELAEIS foi o único que adquiriu importância econômica e a espécie GUINEENSIS constitui, atualmente, a base para a exploração agrícola intensiva. Esta é uma palmeira que pode atingir até 20 metros de altura, com cerca de 24 folhas de 5 a 6 metros de comprimento.

Seu plantio em larga escala iniciou-se em 1960, na Malásia. Até o final da década de 90, segundo Kaltner (1997), o cultivo do dendê gerava negócios da ordem de US\$ 9 bilhões/ano.

O dendê foi trazido ao Brasil em meados do século XVII, pelos escravos, tendo rapidamente se adaptado ao clima tropical úmido das regiões norte e nordeste.

O primeiro plantio comercial brasileiro verificou-se no município de Benevides, no estado do Pará, em 1968.

Atualmente, as plantações brasileiras situam-se, em sua maioria, nos estados do Amazonas, Amapá, Bahia e, principalmente, Pará, que corresponde, segundo a Aboissa Óleos Vegetais (2005), a mais de 80% de todas as plantações.

Dos frutos do dendê, extraem-se dois tipos de óleo: o óleo de dendê ou óleo de palma, obtido da polpa (mesocarpo) e o óleo de palmiste ou palmístico, obtido da amêndoa, conforme pode ser observado na Figura 12. Ambos podem constituir matéria-prima para o biodiesel, porém o primeiro, por conferir menor custo à produção e maior produtividade (cerca de 20% da massa do fruto contra 1,5% do óleo palmiste), tem sido preferido na literatura pesquisada e, por esse motivo, faz parte do objeto de estudo deste trabalho.

Figura 12: O fruto do dendê e os óleos de palma e palmiste

A cultura do dendê apresenta produção distribuída durante todos os meses, sem entressafras, iniciando seu ciclo econômico produtivo a partir do quarto ou quinto ano após seu plantio, atingindo a plenitude de produção em torno do décimo ano, podendo se estender até o trigésimo ano. A Tabela 15 apresenta a produtividade típica de dendezeiro relativa ao óleo de dendê.

Tabela 15: Produtividade do dendezeiro em crescimento para o óleo de dendê

Tempo após plantio	Óleo produzido (kg/hectare)
4 anos	1000 - 1200
5 - 6 anos	1800 - 2250
7 - 8 anos	3000 - 3750
9 - 10 anos	4050 - 4500
Acima de 10 anos	4500 - 6000

Fonte: Rittner (1996, p.1)

O óleo de palma, como todos os óleos vegetais, é constituído basicamente por triglicerídeos, que são tri-éteres de ácidos graxos com glicerol. Os ácidos graxos combinados podem variar em função das condições climáticas, do estado de maturação dos frutos, das variedades da palmeira e de diversos outros fatores. A Tabela 16 apresenta a composição para o óleo de palma comercial comum.

Tabela 16: Ácidos graxos componentes do Óleo de Palma

Designação	Faixa de presença	Teor médio
Láurico	Nd - 0,1%	0,05%
Mirítico	0,9 - 1,1%	1,0%
Palmítico	43,1 - 45,3%	44,1%
Palmitoleico	0,1 - 0,3%	0,15%
Esteárico	4,0 - 4,8%	4,4%
Oléico	38,4% - 40,8%	39,6%
Linoleico	9,4% - 11,1%	10,1%
Linolênico	0,1 - 0,4%	0,2%
Araquídico	0,1 - 0,4%	0,2%

Fonte: Rittner (1996, p.66)

4.4.2 Mercado

O óleo de palma tem ocupado, nos últimos anos, lugar de destaque na produção mundial de óleos e gorduras. Houve um expressivo crescimento na participação deste óleo no mercado mundial, conforme pode ser observado na Tabela 17, que apresenta um quadro comparativo das alternativas de óleos e gorduras produzidas nos anos de 1977 e 2000.

Tabela 17: Produção mundial de óleos e gorduras

Óleo	Produção – 1977 (milhões de t)	Participação (%)	Produção – 2000 (milhões de t)	Participação (%)	Acréscimo (%) 1977/2000
Óleo de soja	9,5	21,3	25,2	22,42	165,26
Óleo de palma	3,6	8,0	21,1	18,77	486,11
Óleo de canola (colza)	2,7	6,1	14,4	12,81	433,33
Óleo de girassol	3,7	8,2	9,6	8,54	159,46
Outros	25,3	56,4	42,1	37,46	66,4
TOTAL	44,8	100	112,4	100	150,89

Fonte: ISAE-FGV (2005, p.4)

As principais causas desta rápida expansão, segundo o relatório do ISAE-FGV (2005) são: o forte apelo ecológico da cultura agrícola do dendê, pois apresenta baixos níveis de impacto ambiental e consideráveis níveis de sequestro de carbono; sua capacidade de gerar 145 produtos industrializados diferentes; as vantagens que traz à saúde humana ao substituir a gordura animal na culinária; a baixa necessidade de mecanização e uso reduzido de defensivos na etapa agrícola e, por fim, a sua produtividade é maior do que a de produtos concorrentes conforme pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18: Produtividade das oleaginosas em kg/ha ano

Origem do óleo	Produtividade (kg/ha ano)
Dendê (polpa)	3500 a 5000
Coco	2000 a 3000
Oliva	1500 a 2500
Colza	800 a 1100
Girassol	600 a 1000
Amendoim	600 a 1000
Soja	400 a 600
Dendê (Amêndoa)	200 a 350

Fonte: Kaltner (1997)

Atualmente, o óleo de dendê ocupa o segundo lugar em volume comercializado no mercado internacional, só perdendo para o óleo de soja, conforme pode ser observado na Figura 13. É, provavelmente, a cultura de maior potencial de crescimento econômico do mundo.

Figura 13: Produção mundial de óleos vegetais (OIL WORLD ANNUAL, 2003, apud CRESTANA, 2005).

Segundo o relatório do ISAE – FGV (2005), a estimativa é a de que no período 2008/2012, a produção do óleo de palma atinja uma média anual de 30 milhões de toneladas, superando a marca individual alcançada pelos demais óleos.

A Malásia e a Indonésia são os principais países produtores, com produção média no período 2001/2005 de 11 e 8,3 milhões de toneladas, respectivamente. O Brasil apesar da grande disponibilidade de terras em condições favoráveis, conforme pode ser observado na Tabela 19, tem participação pequena no mercado, ocupando o 13º lugar entre os países produtores, com uma média anual, de acordo com o Oil World Annual, de 115 mil toneladas. Porém, no que se refere à América Latina, a produção brasileira, conforme o relatório do ISAE – FGV (2005), só se mantém atrás da Colômbia e do Equador.

Tabela 19: Brasil – Área potencial e área plantada com dendê

Estados	Potencial para cultivo (ha)	Área cultivada (ha)
Acre	2.500.000	-
Amapá	1.500.000	2.000
Amazonas	50.000.000	1.200
Bahia	-	6.050
Maranhão	-	-
Mato Grosso	500.000	-
Pará	10.000.000	45.213
Rondônia	1.000.000	-
Roraima	4.000.000	-
Tocantins	500.000	-
Total	70.000.000	54.463

Fonte: Adaptada de AGROPALMA (2000, apud ISAE – FGV, 2005, p. 5)

Admitindo-se que o biodiesel de dendê será o responsável pela substituição do petrodiesel na região norte do país, fez-se uma simulação da quantidade de produção necessária quando em vigor a obrigatoriedade das misturas B2 e B5.

Considerando-se que em 2004, a região norte do país foi responsável por 9% do consumo nacional de petrodiesel, segundo a ANP (2005a), tem-se que para substituir 2% e 5% do petrodiesel nesta região, são necessários 73.704.540 litros e 184.261.360 litros, respectivamente, de biodiesel de dendê. Para tais produções são necessários, respectivamente, 73.704.540 kg e 184.261.360 kg de óleo de dendê, de acordo com Silva (1997), o que, considerando uma produtividade média desse óleo da ordem de 4.000 kg/ha, correspondem às áreas de 18.426 ha e 46.065 ha.

Atualmente, a área cultivada corresponde a 54.463 ha, conforme visto na Tabela 20, o que aparentemente supriria as necessidades futuras de área destinada à plantação do dendê, determinadas anteriormente, porém todo óleo produzido na área cultivada atual é consumido, principalmente na área alimentícia e oleoquímica, e não seria justo deslocar parte da produção destinada a esses setores para a produção do biodiesel.

Sendo assim, o ideal seria aumentar a área cultivada, o que seria perfeitamente possível, segundo a Tabela 19, pois ainda existem 69.945.537 ha disponíveis para cultivo, porém, deve-se ressaltar, que a área não é apta apenas para plantação de dendê, pois outras culturas podem ser desenvolvidas nessa região e, além disso, parte dessa área corresponde à floresta amazônica e, desmatá-la para plantar alguma cultura causará perda de biodiversidade local. Portanto deve ser feita uma análise detalhada considerando aspectos sociais, econômicos e ambientais antes de se tomar qualquer decisão.

Em 2002, segundo MDIC – ALICE Web (2005), o Brasil importou uma quantidade de 9.269 toneladas para suprir suas necessidades internas. Os principais países exportadores de óleo de dendê para o Brasil são: a Malásia (43,25%), as Ilhas Maurício (30,42%) e a Indonésia (26,33%).

Atualmente, o Brasil possui um total de dez indústrias de processamento de óleo de dendê, com uma capacidade média instalada para processar aproximadamente 241 toneladas de cachos de frutos frescos (CFF) por hora.

O maior produtor de óleo de palma brasileiro é o Grupo Agropalma, com capacidade para produzir 26 toneladas de óleo por hora. Este Grupo iniciou suas atividades de produção e extração de óleo de palma e óleo de palmiste em 1982, no município de Tailândia, a 150 km de Belém. É composto por seis empresas, sendo cinco agroindústrias e uma refinaria: Crai Agroindustrial S/A, Agropalma S/A, Companhia Agroindustrial do Pará, Amapalma S/A (em implantação), Companhia Palmares da Amazônia e Companhia Refinadora da Amazônia.

4.4.3 Variedades do dendezeiro

De acordo com a espessura da casca do fruto, podem ser consideradas quatro variedades, assim definidas por Rittner (1996):

- **Macrocaraya:** com casca grossa de 4 a 8,5mm, representando cerca de 40% do peso do fruto.
- **Dura:** com casca de 2 a 5 mm, representando 20-40% do peso do fruto.
- **Tenera:** casca de 1 a 2,5mm, representando menos de 20% do peso do fruto
- **Piscífera:** com ausência de casca.

A variedade tenera, obtida pelo cruzamento das variedades piscífera e dura, é a usualmente utilizada em plantações industriais de grande porte, por suas características de produtividade (possui elevado número de cachos), casca fina e reduzida, e elevado teor de óleo.

4.4.4 Exigências ecológicas do dendezeiro

Para que o dendezeiro apresente alta produtividade, é essencial a implantação do mesmo em condições propícias de clima e solo. No Brasil, segundo Kaltner (1997), quase a totalidade da região amazônica (região do estuário compreendendo Belém e adjacências, uma parte do Estado do Pará e a zona da Amazônia Ocidental) e uma estreita faixa no litoral da Bahia são consideradas favoráveis às exigências ecológicas da cultura. Pode-se dizer que toda área compreendida de cinco graus acima a cinco graus abaixo da linha do Equador é propícia para plantação do dendê.

A área amazônica propícia pode ainda ser dividida em apta e marginal. A primeira é a mais representativa, compreendendo a região da Amazônia Ocidental,

estimada em 708.000 km², iniciando-se a 400 km ao norte da cidade de Manaus em direção às fronteiras com a Colômbia, a Venezuela e o Peru, (compreendendo ainda uma pequena parte do Estado do Acre e uma faixa do litoral do Estado de Roraima), além de parte da região da Amazônia Oriental, constituída pelos Estados do Pará e Amapá, apresentando uma área estimada em 40.700 km². Nesta, de acordo com Müller (1980), a planta tem todas as possibilidades de desenvolver o seu potencial genético de produção.

Já a área marginal, ainda segundo Muller (1980), apresenta desenvolvimento da cultura um pouco inferior em relação a anterior, mas não chega a ter fatores climáticos que interajam negativamente no desenvolvimento e produção do dendezeiro, como ocorre nas áreas ditas inaptas.

4.4.4.1 Fatores climáticos

Para altas produções, o dendezeiro requer temperaturas mínimas médias superiores a 25°C. A temperatura tem efeito marcante sobre o número de folhas emitidas, número de cachos produzidos e sobre o teor de óleo nos frutos.

A duração do tempo de insolação é outro fator importante. Admite-se como ideal aquela superior a 1500 horas anuais, bem distribuída ao longo do ano, ou no mínimo, 5 horas de luz por dia.

Quanto à umidade relativa, recomenda-se uma média mensal situada entre 75% e 90%.

Segundo Barcelos et al (1995), a quantidade e a distribuição das chuvas são, na realidade, os principais responsáveis pelas elevadas produções. As precipitações pluviométricas acima de 2000mm/ano, regularmente distribuídas durante todos os meses, sem déficit hídrico, são condições ideais para que sejam alcançados rendimentos econômicos satisfatórios.

4.4.4.2 Fatores Edáficos

Segundo Rittner (1996), os solos apropriados são os argilosos, argilo-arenosos e terras ricas em matéria orgânica. Os solos compactos e com drenagem deficiente não são satisfatórios.

O dendezeiro é bastante tolerante às condições químicas do solo, porém os melhores rendimentos virão de solos bem equilibrados em sais minerais. Adapta-se bem a solos ácidos, com pH entre 4 e 6.

Outro aspecto importante diz respeito à topografia do terreno. Esta deve ser plana ou de pequena declividade (menor do que 10%) para facilitar as atividades de coleta e manuseio dos cachos, bem como o escoamento da produção.

4.4.4.3 Trabalhos preparatórios

A implantação do dendezeiro implica em alguns trabalhos preparatórios: levantamento topográfico, determinação da área a ser plantada, derrubada e queima de vegetação existente para a limpeza do terreno e abertura para construção de estradas de serviço. Além disso, faz-se necessária a semeadura de uma leguminosa, geralmente, a *Pueraria javanica* (em torno de 5 kg/ha), que controla o aparecimento de ervas daninhas, protege o solo evitando a degradação, fixa nitrogênio na terra, além de conservar a umidade do terreno, promovendo a recuperação do solo, com a reconstituição da atividade biológica dos microorganismos, prejudicada durante o período de queima e desmatamento.

4.4.5 Produção

A produção do óleo de palma divide-se em duas fases, uma agrícola e outra industrial. A fase agrícola compreende todas as etapas para produção do fruto do dendê (produção das sementes, pré-viveiro, viveiro, plantio definitivo e tratos de manutenção) até a colheita dos cachos; a fase industrial, compreende a extração do óleo, seu beneficiamento e refinamento.

A Figura 14 apresenta um esquema simplificado do processo de produção do óleo de palma.

Figura 14: Esquema simplificado do processo de produção do óleo de dendê

4.4.5.1 Fase agrícola

A primeira etapa para implantação do dendezeiro consiste na produção das mudas, que compreende a germinação das sementes, o pré-viveiro e o viveiro.

O principal cuidado nesta etapa é com a origem e qualidade das sementes. No Brasil, de acordo com Kaltner (1997), as sementes brasileiras são originárias de material genético das Estações Experimentais da África, sendo todas da variedade Tenera.

A germinação das sementes é feita pelo método denominado “calor seco”, no qual as sementes são colocadas em sacos plásticos de polietileno escuro, hermeticamente fechados. Esses sacos são levados a um germinador isotérmico, onde permanecem aquecidos por 80 dias.

Passado o período de aquecimento, as sementes são reidratadas para em seguida serem recolocadas nos sacos plásticos, os quais são novamente fechados

hermeticamente e mantidos à sombra. Segundo Kaltner (1997), o percentual médio de germinação gira em torno de 85%.

As sementes germinadas são imediatamente repicadas em sacos plásticos transparentes, cheios de terra húmica (matéria orgânica), para o pré-viveiro, que é um local coberto com folhas de palmeiras, onde permanecem por três a quatro meses. É o tempo de aparecerem as primeiras três a quatro folhas para que, então, sejam imediatamente transferidas para o viveiro. Segundo Kaltner (1997) e Müller (1980), nesta etapa, há uma perda em torno de 20% das sementes germinadas.

O viveiro é feito a céu aberto e, necessariamente, perto de uma fonte de água, a fim de facilitar a irrigação das mudas. Os sacos plásticos utilizados são de cor preta que, assim como no pré-viveiro, devem ser cheios de terra húmica (20 a 25kg por saco). As mudas, de acordo com Barcelos et al (1995), devem permanecer no viveiro por um período médio de oito meses, tempo suficiente para a planta exibir altura em torno de 80cm e cinco a oito folhas adultas; as mudas que não estiverem nessas condições não são selecionadas para o plantio definitivo, o que ocasiona uma perda em torno de 20% das mudas, conforme Barcelos et al (1995), Kaltner (1997) e Müller (1980).

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

Considerando todas as perdas e a necessidade de reservar cerca de 5% das mudas para o replantio, o cultivo de um hectare de dendezeiro requer aproximadamente 300 sementes para que restem 143 palmeiras no local definitivo.

Os tratos para a manutenção do plantio são essenciais para assegurar o melhor desenvolvimento das palmeiras, tendo em vista as condições de solo e clima. Os principais tratos são: o replantio – técnica para substituir as plantas que morreram ou que apresentam problemas em seu desenvolvimento; o coroamento – operação de limpeza manual do solo em torno da planta; o controle fitossanitário – fiscalização das plantas para verificar o aparecimento de pragas e doenças e, por fim, a adubação.

A adubação, ao contrário das outras atividades que se iniciam no plantio definitivo, deve acontecer logo na etapa do pré-viveiro, a partir do segundo mês de permanência. Segundo relatório do SEAGRI (2005), as adubações nessa fase devem ocorrer semanalmente, e devem ser feitas com uma mistura de 3 kg de N, 4 kg de P_2O_5 , 1kg de K_2O e 2 kg de sulfato de magnésio, que devem ser aplicadas em cada saco, de acordo com a Tabela 20.

Tabela 20: Dosagem de mistura de fertilizantes para período em pré-viveiro

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

Fonte: SEAGRI (2005, p.5)

No que se refere à adubação do viveiro, essa tem caráter mensal: durante os três primeiros meses, aplicam-se 20 g da mistura NPK: 13-13-26, ao redor de cada planta e, do quarto mês em diante, aumenta-se para 30 gramas.

Após o plantio definitivo, as adubações são baseadas na análise do solo, variando, portanto, de acordo com a região em que estiver o dendezeiro. A Tabela 21 indica as recomendações para adubação, sendo que, até o terceiro ano, esta varia também de acordo com o tempo de permanência no viveiro.

Tabela 21: Adubação do dendezeiro

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

Fonte: SEAGRI (2005, p.6)

Segundo Müller (1980), Barcelos et al (1995) e Kaltner (1997), a última etapa agrícola, a colheita, é a mais importante e delicada de uma plantação em produção, pois dela dependem a quantidade e qualidade do óleo que será extraído futuramente.

Conforme relatório do SEAGRI (2005), quando são encontrados em torno de cinco frutos (não mais que dez) soltos ao pé da palmeira, identifica-se o estágio ideal de maturação para fins de colheita.

A produção de uma plantação, conforme dito anteriormente, está relacionada com sua idade, levando oito anos para se estabilizar no patamar de 20 toneladas de cachos, por hectare, por ano. A partir do vigésimo ano, essa taxa de produção cai para 16.

A colheita é manual e praticada durante todo o ano. As ferramentas utilizadas variam conforme a idade e altura das plantas. Até o quarto ano de produção faz-se o uso do cinzel; do quinto ao sétimo ano, do machado e, a partir daí, faz-se necessária a utilização da foice malasiana, para que assim os colhedores não precisem subir na palmeira.

A maturação dos cachos exige que os intervalos de colheita sejam de 10 a 15 dias e o transporte do mesmo para o beneficiamento deve ser feito o mais rápido

possível. Da plantação até a beira da estrada, o transporte pode ser feito por meio de bois, burros ou microtratores e, da estrada para as usinas de beneficiamento, por caminhões.

4.4.5.2 Fase industrial

Para não comprometer a qualidade do óleo, segundo relatório do SEAGRI (2005), a extração deve ter início em, no máximo, 24 horas após a colheita.

Os cachos devem então ser colocados em esterilizadores, onde são submetidos a aquecimento por contato direto com vapor. Dessa forma, as enzimas presentes nos frutos tornam-se inativas, os processos degradativos são paralisados e a separação dos frutos dos cachos é facilitada.

Os cachos esterilizados são levados para o debulhador, onde os frutos são separados. Os frutos são encaminhados para o digestor e os cachos vazios são recolhidos para utilização como adubo. A Tabela 22 apresenta em quanto cada tonelada de cachos pode vir a substituir os elementos existentes na mistura do adubo.

Tabela 22: Quantidade de adubo a ser substituída por tonelada de cacho vazio

Tipo de fertilizante	Quantidade por tonelada de cacho vazio
Uréia	7 kg
Rocha fosfática	2,8 kg
Composto de potássio	19,3 kg

Fonte: Kaltner (1997)

No digestor, os frutos são submetidos a um processo de cozimento e fricção mecânica, com aquecimento direto para que ocorra a liberação do óleo das células olíferas. A massa que sai do digestor é colocada em uma prensa, onde é acrescentada água, para que finalmente o óleo de dendê seja extraído.

As fibras e as nozes que restam da prensa passam por um desfibrador, onde as fibras são então separadas para serem usadas como combustível em caldeiras, para geração de vapor. Parte desse vapor aciona turbo-geradores para a produção de energia elétrica e o restante é utilizado nos esterilizadores.

Quanto às nozes, estas são quebradas para separar as cascas das amêndoas. As cascas também são colocadas em caldeira, juntamente com as fibras. Já as amêndoas são trituradas e prensadas para a obtenção do óleo de palmiste e da torta de palmiste.

O uso dos resíduos do processo para geração de energia é uma alternativa interessante à queima de combustíveis fósseis, pois segundo Silva et al. (2000), essa é uma forma de prevenir as emissões de carbono, que contribuem para o agravamento do efeito estufa.

O óleo de dendê extraído pela prensa, denominado óleo cru, passa então por uma etapa de beneficiamento, que consiste, primeiramente, de uma decantação, na qual são separadas as impurezas sólidas e as matérias coloidais, e de uma depuração, na qual se elimina parte da umidade.

Para completar a fase industrial, o óleo deve passar por um processo de refino; este, segundo Rittner (1996), caracteriza-se por um conjunto de operações sequenciais, que visa a transformação do óleo que saiu do beneficiamento (denominado clarificado ou bruto) que contém ácidos graxos livres bem como componentes menores diversos, em um óleo constituído quase que somente por glicerídeos, ou seja, praticamente isento de acidez livres e de impurezas indesejáveis. A Tabela 23 apresenta uma comparação entre o óleo bruto e o óleo refinado.

Tabela 23: Características do óleo de palma bruto e refinado

Característica	Óleo bruto	Óleo refinado
ácidos graxos livres	2,5 – 3,0 %	0,05 %
Carotenos	500 – 700 mg/kg	0
Tocoferóis	600 – 1000 mg/kg	300 – 500 mg/kg
Esteróis	500 mg/kg	-
Ferro	4 -10 mg/kg	0,15 mg/kg max
Umidade	0,20 %	0
Impurezas	0,05 %	0,02 % max
p. específico 50/25 °C	0,8927	0,8920
Insaponificáveis	0,51 %	-
índice de iodo	51 - 55	51 – 55
ponto de fusão	34 - 38°C	34 – 38°C
índice de peróxido	3,9 meq/kg	0
Fósforo	10 – 20mg/kg	4 mg/kg max.

Fonte: Rittner (1996, p.151)

O transporte do óleo de palma bruto para a refinaria é feito, no caso do Grupo Agropalma, por via fluvial, visto que a refinaria encontra-se à beira do rio Pará.

Existem dois tipos de refinamentos: físico e químico. Os processos diferem na forma de eliminação dos ácidos graxos livres. No químico, são saponificados por reação com soda cáustica, para então serem separados do óleo na forma de sabões, enquanto que no físico, são separados por destilação.

A Companhia Refinadora da Amazônia, pertencente ao Grupo Agropalma, faz uso do refino físico e, por ser a maior produtora de óleo de dendê no Brasil, o processo por ela utilizado será descrito de forma mais detalhada.

O refino físico apresenta três operações básicas: degomagem, branqueamento e deacidificação. Na primeira, através da entrada de ácido fosfórico, removem-se os fosfatídeos presentes no óleo bruto. Na segunda, através de adsorventes, eliminam-se substâncias diversas, inclusive corantes. E, por fim, na deacidificação, segundo Silva (1997), o óleo passa por um processo de destilação a vapor, ou seja, ele é submetido a vácuo, à temperatura elevada e corrente de vapor, para que sejam destilados os ácidos graxos livres e outros compostos de volatilidade similar.

4.4.6 Usos do óleo de palma e de seus subprodutos

Segundo Barcelos et al (1995), o principal uso do óleo de dendê é o alimentício, pois este óleo faz parte de margarinas, de pó para sorvete, do óleo de cozinha, de gorduras para pães, biscoitos, massas e tortas, além de, conforme relatório do SEAGRI (2005), ser substituto para a manteiga de cacau e fornecer vitaminas E e beta-caroteno.

A utilização do óleo de palma, no entanto, estende-se ao uso oleoquímico, pois este entra na composição de sabões, sabonetes, velas, detergentes, produtos farmacêuticos e cosméticos, além de aplicação industrial em siderurgia, como a laminação de chapas de aço e banho de estanhagem.

No entanto, a utilização que muito tem sido comentada atualmente, e é foco de estudo deste trabalho, é o uso do óleo como matéria-prima na produção de biodiesel. De acordo com Macedo e Nogueira (2004), o biodiesel originário de palmáceas apresenta uma qualidade superior à das demais oleaginosas, devido à presença de maior teor de ácidos graxos de baixo peso molecular e com alto nível de saturação.

Além disso, é proveniente de uma cultura de produção durante todo o ano, sem entressafras e que possui alta produtividade.

Como subprodutos, o óleo de palma apresenta o óleo palmiste e a torta de palmiste. O primeiro tem grande importância comercial nas indústrias alimentícias, de cosméticos e de sabão, além de também poder substituir a manteiga do cacau. Já a torta, por conter, segundo o relatório do SEAGRI (2005), 18% de proteína, é utilizada na alimentação de animais e também como adubo orgânico para plantas.

4.5 Etanol

4.5.1 Introdução

O etanol ou álcool etílico, de forma molecular C_2H_6O , é um tipo de álcool incolor e solúvel em água, produzido através da fermentação da sacarose por determinadas leveduras.

Este apresenta importante papel na matriz energética brasileira, cerca de 11 bilhões de litros foram consumidos no setor de transportes em 2003. Isso se deve à possibilidade do combustível ser comercializado como anidro (99%) e como hidratado (95%). O anidro é adicionado à gasolina em uma mistura denominada gasohol (nacionalmente conhecida apenas como gasolina), na qual cerca de 25% correspondem ao álcool e 75% a gasolina, o hidratado é comercializado diretamente como combustível em motores a explosão. (ALMEIDA; MOREIRA, 2005).

Mundialmente, diversas matérias-primas são utilizadas na fabricação do etanol: beterraba, milho, arroz, etc. No Brasil, no entanto, é obtido através da fermentação dos açúcares da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é uma planta da família Gramineae e foi introduzida no Brasil, no período colonial, quando se deu origem ao ciclo econômico do açúcar.

De acordo com Saciloto (2003), a cana, atualmente, cultivada no país, é originária de um cruzamento entre *Saccharum officinarum* e *Saccharum spontaneus*, que apresenta elevada produtividade e alta resistência às doenças.

De acordo com Macedo (2005), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar com uma safra estimada em 380 milhões de toneladas, o que equivale a um quarto da produção mundial.

Segundo Saciloto (2003), a área de cultivo corresponde a 5 milhões de hectares, sendo os estados de Alagoas, Pernambuco, Minas Gerais e Rio de Janeiro, importantes produtores, contribuindo para cerca de 30% da safra brasileira, porém, a maior concentração de lavouras está no estado de São Paulo, o maior produtor.

De acordo com Townsend (2000), a cana-de-açúcar é uma cultura perene, normalmente madura no período seco, podendo atingir rendimentos de massa verde superiores a 120 t/ha/ano e produzir por 4 a 6 anos, visto que a cada safra, a produtividade por hectare diminui.

4.5.2 Mercado

Segundo Almeida; Moreira (2005), da safra 2003/2004, as produções brasileiras de etanol anidro, etanol hidratado (em milhões de litros) e de açúcar (em mil toneladas) foram, respectivamente: 5.620, 5.896 e 24.925.

O Brasil é o maior produtor de etanol, totalmente auto-suficiente na produção dos dois álcoois, e ainda assim, de acordo com BNDES (2003, *apud* Figueira, 2005), apresenta elevado potencial de crescimento, acreditando-se que o país tenha capacidade instalada para a produção de 16 bilhões de litros.

No total, o Brasil apresenta 272 usinas de processamento da cana, das quais 119 estão no estado de São Paulo, o qual é responsável pela produção de 49% do etanol hidratado e 63% do etanol anidro do país. (ALMEIDA; MOREIRA, 2005).

As usinas de produção de etanol podem ser autônomas ou anexas. Uma usina autônoma produz apenas etanol enquanto uma anexa produz também açúcar.

Como o açúcar não é foco deste estudo, será descrito neste trabalho apenas o processo de obtenção do etanol.

Conforme mencionado, anteriormente, para a produção de biodiesel via rota etílica, faz-se necessário o uso do etanol anidro. Foi feita, portanto, uma simulação da quantidade deste álcool necessária, quando em vigor a obrigatoriedade das misturas B2 e B5.

Considerando-se que em 2004 foram consumidos no país 40.946.968 m³ de petrodiesel, tem-se que para substituir 2% e 5% desse volume, são necessários cerca de 818.939 m³ e 2.047.348 m³ de biodiesel, respectivamente. Sendo assim, para atingir tais produções são necessários, respectivamente, 517.661 litros e 1.294.152 litros de álcool, conforme Silva (1997). A demanda necessária de etanol anidro, portanto, corresponde a menos de 0,1% da produção nacional.

4.5.3 Exigências ecológicas do canavial

De acordo com a AGROBYTE (2006), o Brasil possui extensa área territorial propícia para produção de cana-de-açúcar. Toda região compreendida entre os paralelos 35° de latitude Norte e Sul do Equador, a cinco graus abaixo da linha do Equador, pode ser considerada adequada para cultivo da cana.

Ainda segundo a AGROBYTE (2006), o clima ideal para a plantação de cana deve alternar uma estação quente e úmida, com uma fria e seca. A primeira, é essencial para a germinação e o crescimento da planta e, a segunda, é necessária para que a mesma torne-se madura para a colheita. No entanto, deve-se ter cuidado com a temperatura, pois quando abaixo de 20° C e acima de 38° C, o desenvolvimento da cultura é considerado nulo. Para o crescimento máximo recomendam-se temperaturas entre 30°C e 34° C (ASSIS et al., 2004).

A área onde deve ser estabelecido o canavial deve apresentar topografia plana a ligeiramente inclinada. Recomenda-se o uso do solo do tipo aluvional e que seja profundo e fértil. Solos com camada impermeável superficial, ou seja, mal drenados, não são indicados, para que, dessa forma, não haja risco de encharcamento (TOWNSEND, 2000).

De acordo com a AGROBYTE (2006), na preparação do solo devem ser consideradas duas situações: cana plantada pela primeira vez e renovação do canavial, normalmente após quatro ou cinco cortes consecutivos.

No primeiro caso, deve-se primeiramente, realizar uma aração profunda, com a finalidade de descompactar a terra para um melhor desenvolvimento das raízes e, como complemento desta atividade, uma gradagem, que deixa a superfície do solo

mais uniforme, ao eliminar ervas daninhas e eventuais torrões de terra (AGROBYTE, 2006 e TOWNSEND, 2000).

Já na segunda situação, ainda conforme a AGROBYTE (2006) e Townsend (2000), faz-se necessário, logo após a colheita, erradicar a soqueira (base e raízes que permaneceram no solo após o corte), por meio de uma gradagem pesada e complementada por uma aração rasa. De acordo com Ometto (2005), a erradicação da soqueira também pode ser realizada pelo modo químico, com a aplicação de herbicidas.

Considerando ainda a preparação para a renovação do canavial, conforme Ometto (2005), recomenda-se a calagem, aplicação de calcário, sempre que a análise química do solo identificar baixas quantidades de cálcio e/ou magnésio.

4.5.4 Produção

A produção do etanol anidro divide-se em duas fases, uma agrícola, que compreende a colheita e todas as etapas para produção da cana-de-açúcar, e outra industrial.

4.5.4.1 Fase agrícola

A melhor época para plantio na região centro-sul, segundo ABROBYTE (2006), é no período de janeiro a março. Este é realizado, preferencialmente por modo manual, sendo feitos sulcos de aproximadamente 30 a 40 cm de profundidade com espaçamento de 1,4 m onde são colocados os fertilizantes e as mudas da planta, com idade de 10 a 12 meses. Os sulcos são então cobertos com, aproximadamente, 7 cm de terra, conforme relatório SEAGRI (2006).

A quantidade de fertilizante colocada nos sulcos dependerá da análise do solo, que revelará quais são suas características e os elementos de que tem carência.

Após o plantio, faz-se necessária a plantação de leguminosas (a chamada adubação verde) que é fundamental para recuperar solos de baixa fertilidade e elevar a produtividade da cana-de-açúcar. Além disso, contêm mais nutrientes e fixam nitrogênio no solo.

Os tratos para manutenção são: a capina – procedimento agrícola que consiste na remoção de plantas invasoras ou plantas daninhas, de modo a privilegiar o desenvolvimento da cultura de interesse; o controle fitossanitário – fiscalização das plantas para verificar o aparecimento de pragas e doenças e, por fim, a adubação. Estes, segundo Corbini (1987, *apud* Ometto, 2005), têm como finalidades: restaurar as propriedades do solo (físicas e químicas), evitar a erosão e controlar aparecimento de pragas e doenças.

De acordo com Townsend (2000), os tratos devem ser permanentes, sendo o período mais crítico, os primeiros 90 dias do estabelecimento, quando a planta se encontra mais suscetível ao ataque de pragas e doenças e, trava, competições severas com plantas invasoras, por água, nutrientes e luz. Tais cuidados também valem para as plantas-soca (cana proveniente da rebrota da cana colhida na safra anterior).

A colheita inicia-se, normalmente, em maio, prolongando-se até novembro, quando a planta atinge o ponto de maturação. O corte deve ser rente ao solo e pode ser manual ou mecânico. Para o primeiro, tem-se um rendimento médio de aproximadamente 6 toneladas por homem dia, de acordo com a AGROBYTE (2006) e, para o segundo, de 15 a 20 toneladas por hora, dependendo do tipo de colheitadeira utilizada.

Segundo relatório Seagri (2006), o corte da cana ainda é predominantemente manual, pois a introdução da colheita mecanizada está exigindo uma reformulação de todas as rotinas de trabalho, para adaptar as lavouras ao novo sistema. Em São Paulo, no entanto, segundo Macedo et al. (2004), cerca de 36,2% da colheita já está mecanizada.

Ainda segundo Macedo et al. (2004), 75% das lavouras do estado de São Paulo utilizam a prática da queima da palha da cana-de-açúcar antes do corte. No entanto, foi promulgada lei estadual, em setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa desta prática. De acordo com essa lei (LEI Nº 11.241, 2002), até 2021, deve ocorrer eliminação total da queima nas áreas de colheita mecanizadas e, até 2031, eliminação total também nas áreas não mecanizadas. Com a eliminação dessa prática, ter-se-á redução significativa nas emissões de gases do efeito estufa.

Após a colheita, a cana é transportada para a indústria por meio de caminhões.

4.5.4.2 Fase industrial

Logo que chega à usina, a cana-de-açúcar passa por uma lavagem com cerca de 3 a 7 m³ de água, para retirada de impurezas provenientes, principalmente, da queima da palha. Esta operação, no entanto, é descartada em usinas que não adotam o procedimento de queima durante a colheita (OMETTO, 2005).

Após a lavagem, a cana-de-açúcar é submetida a uma série de facas e desfibradores visando o aumento da eficiência na extração do caldo, nas moendas. Esse caldo, rico em sacarose, glicose e frutose, passa por um tratamento, constituído de aquecimento e decantação.

Visando o mínimo de perda possível de caldo, o lodo da decantação é submetido à filtração a vácuo. O filtrado retorna ao processo, e o resíduo sólido é utilizado como adubo.

O bagaço da cana-de-açúcar é usado como combustível em caldeiras, para geração de vapor e, parte desse vapor aciona turbo-geradores para a produção de energia elétrica. Todo processo é, portanto, auto-suficiente em vapor e energia, existindo ainda um excesso de, aproximadamente, 1,33 t de bagaço por tonelada de álcool produzido (OMETTO, 2005).

O caldo tratado é encaminhado à destilaria onde será fermentado. De acordo com a Copersucar (2005), o processo de fermentação mais comumente utilizado nas destilarias brasileiras é o de Melle - Boinot, cuja característica principal é a recuperação de leveduras através da centrifugação do vinho.

Segundo Ometto (2005), as leveduras utilizadas são do gênero *Saccharomyces*. Estas irão transformar a sacarose em etanol, liberando CO₂.

O produto resultante da fermentação é denominado vinho, e apresenta teor médio de álcool da ordem de 7% a 10%. Este é resfriado e enviado às centrífugas para a recuperação das leveduras. A fase leve da centrifugação é enviada para colunas de destilação (COPERSUCAR, 2005).

Da primeira coluna de destilação, obtém-se a flegma e, como efluente, a vinhaça. Para cada litro de álcool produzido, tem-se em torno de 10 a 15 litros de vinhaça. Esta, devido ao seu alto teor de matéria orgânica e potássio, é reciclada para

o campo, para fertirrigação (SOUSA, 2005). A Tabela 24 apresenta a composição química média da vinhaça.

Tabela 24: Composição química média da vinhaça

Elementos	Composição
N (kg/m ³ vinhaça)	0,33 – 0,48
P ₂ O ₅ (kg/m ³ vinhaça)	0,09 – 0,61
K ₂ O (kg/m ³ vinhaça)	2,10 – 3,40
CaO (kg/m ³ vinhaça)	0,57 – 1,46
MgO (kg/m ³ vinhaça)	0,33 – 0,58
SO ₄ (kg/m ³ vinhaça)	1,6
M. O. (kg/m ³ vinhaça)	19 – 45
Mn (mg/dm ³ vinhaça)	5 – 6
Fe (mg/dm ³ vinhaça)	47 – 130
Cu (mg/dm ³ vinhaça)	2 – 57
Zn (mg/dm ³ vinhaça)	3 - 50

Fonte: Sousa (2005)

A flegma é encaminhada para uma coluna de retificação, onde será concentrada e purificada, sendo retirada sob a forma de álcool hidratado (OMETTO, 2005). Do fundo desta coluna é retirada uma solução aquosa chamada flegmaça que, segundo Azania et al. (2004), apesar de não apresentar alto conteúdo de nutrientes como a vinhaça, é a esta adicionada e aplicada no campo, como substituto da adubação mineral.

O etanol hidratado apresenta de 4% a 5% de água e o anidro deve apresentar entre 0,7% a 0,1%. Sendo assim, o álcool hidratado obtido da coluna de retificação deve ser desidratado para ser considerado etanol anidro.

Vale ressaltar que água e álcool formam uma mistura azeotrópica e, por esse motivo, não conseguem ser totalmente separados por destilação. Para contornar esse problema, existem várias formas de desidratação do álcool. A mais usual é a chamada destilação azeotrópica. Este método consiste em acrescentar ao álcool hidratado um composto que forme uma segunda mistura azeotrópica com a água e o álcool, e que seja ao mesmo tempo pouco miscível com água quando frio. Este composto é geralmente um solvente. Um exemplo bastante utilizado é o benzeno, mas por ser

tóxico e cancerígeno está sendo substituído, principalmente, pelo ciclohexano (COPERSUCAR, 2005).

Segundo Kohl (2006), essas substâncias têm capacidade de formar uma mistura azeotrópica ternária, solvente-água-álcool, com ponto de ebulição inferior ao álcool anidro. Dessa forma, o etanol é retirado anidro no fundo da coluna e a mistura azeotrópica ternária do topo. A mistura é então condensada e encaminhada para um decantador onde se formam duas fases. A superior, rica no solvente, volta para a coluna de desidratação e a inferior, rica em água, é redirecionada para a coluna de retificação.

Outra forma de desidratar o álcool é através do processo de peneira molecular. As peneiras moleculares são zeólitas, que por sua vez são compostos de alumínio e silício, e apresentam poros de diâmetro muito pequeno para o tamanho das moléculas de álcool, mas suficientemente grandes para as moléculas de água, que entram, pelos poros e são adsorvidas na área interna da zeólita (KOHL, 2006)

Ainda segundo Kohl, a ligação entre a água e a superfície interna da zeólita é um fenômeno que ocorre pelo simples contato entre elas, como se aderissem entre si. A separação se dá ou por aumento de temperatura ou por diminuição de pressão. A grande vantagem desse método é que não há o uso de solvente e, portanto, o álcool anidro resultante é isento de contaminantes.

De acordo com Mahesh (2006), ainda há um outro método para desidratação denominado pervaporação. Este se caracteriza pela separação da água e do álcool pela diferença da permeabilidade entre eles, através de uma fina membrana de material polimérico. Esse processo de desidratação é o que apresenta menor consumo de energia.

4.5.5 Usos do etanol anidro e de seus subprodutos

O etanol anidro é usado como combustível quando adicionado à gasolina, conforme dito anteriormente. No entanto, apresenta uso muito variado. Pode ser utilizado nas fabricações de: polietileno, estireno, cetona, acetaldeído, poliestireno, ácido acético, éter, acetona e toda a gama de produtos que se extraem do petróleo.

Além disso, é utilizado na produção de fibras sintéticas, de vernizes, de solventes e de plastificantes.

Como subprodutos, tem-se o óleo fúsel, constituído por impurezas de alto grau de volatilização, que é vendido para indústrias químicas por um baixo valor comercial (AZANIA ET AL., 2004) e, o bagaço excedente, também de reduzido valor de mercado, que é comercializado como ração para alimentação animal, além de ser vendido como matéria-prima para produção de papel (RAMOS; SOUZA, 2006).

Este último pode ainda produzir, o chamado furfurol da cana que é um líquido excelente para produção de proteínas para rações e matéria-prima para a fabricação de *nylon*, plásticos e solventes para lubrificantes (RAMOS; SOUZA, 2006).

5. RESULTADOS

5.1 Avaliação de Ciclo de Vida

Serão apresentadas duas avaliações do ciclo de vida, uma para cada um dos produtos estudados (petrodiesel e biodiesel de dendê) cujos resultados foram utilizados na aplicação da ferramenta de análise de ecoeficiência da BASF.

5.1.1 Objetivo

O objetivo destas Avaliações do Ciclo de Vida foi fornecer subsídios referentes a duas fontes alternativas de energia: petrodiesel e biodiesel de dendê via rota etílica, para a aplicação da Análise de Ecoeficiência da BASF que, conforme dito anteriormente, foi utilizada para comparar a ecoeficiência dos dois combustíveis.

As avaliações contribuem para o projeto mencionado anteriormente, sobre a avaliação da sustentabilidade do biodiesel, que se encontra em desenvolvimento sob coordenação do GP2 e os inventários obtidos durante a avaliação podem compor um banco de dados brasileiro como apoio a ACV, o que facilitará o aproveitamento dos dados por outros usuários da técnica de ACV, que empreguem o diesel, o etanol, o petróleo, o óleo de dendê e o biodiesel de dendê em seu sistema de produto.

A razão principal para a condução destas ACVs, no entanto, foi a necessidade de se conhecer o desempenho ambiental do biodiesel em relação ao petrodiesel, fornecendo, dessa forma, subsídios e informações que auxiliem na tomada de decisões quanto à consolidação do biodiesel no Brasil.

5.1.2 Escopo

Em todo estudo de ACV, como é sabido, é necessário determinar a função do produto e, em estudos comparativos, esta deve ser a mesma para todos os produtos analisados. Neste caso, estabeleceu-se, como função, a geração de energia para motores de combustão interna e, a unidade funcional adotada, para a qual todos os aspectos ambientais foram normalizados, foi definida como 1.000 MJ.

Segundo Holanda (2004), o desempenho do petrodiesel é de 38,3MJ/L e o do biodiesel é de 33,3MJ/L. Sendo assim, para atender à unidade funcional, foram empregados como fluxo de referência, os seguintes volumes de petrodiesel e biodiesel, respectivamente: 26,11 litros e 30,03 litros.

Para a definição dos sistemas de produto, foi adotada a abordagem *cradle to gate*, ou seja, a aplicação da ACV recaiu apenas sobre as etapas de extração de recursos e transformação dos mesmos, não sendo consideradas no escopo do presente estudo as etapas de distribuição, uso e disposição final dos produtos.

Decidiu-se por esse enfoque, porque o estudo visa, conforme dito anteriormente, contribuir com inventários para composição de um banco de dados brasileiro como apoio a ACV. De qualquer forma, tal fato não impede que as fases excluídas possam ser adicionadas num futuro próximo, quando se acredita que haverá maior regularidade no uso do biodiesel, tanto que as mesmas fazem parte do projeto para avaliação da sustentabilidade do biodiesel previamente mencionado.

A seguir, serão expostos os sistemas para os produtos em estudo. Os dados que foram coletados na análise do inventário representam os fluxos de matéria e energia, porém foram excluídos dados de bens de capital, ou seja, aqueles relacionados à infraestrutura utilizada no sistema.

5.1.2.1. Sistema de produto do petrodiesel

A partir das informações obtidas na revisão bibliográfica sobre o petrodiesel, foi possível estruturar um modelo de sua produção no Brasil.

Conforme pode ser observado na Figura 15, que representa o sistema de produto do petrodiesel, o produto importado foi excluído da avaliação, pois representa apenas 7% do diesel consumido no Brasil e, por consequência, a atividade de transporte marítimo, responsável pela entrada do mesmo no país, também foi desconsiderada.

Figura 15: Sistema de produto do petrodiesel

5.1.2.2. Sistema de produto do biodiesel de dendê

Apesar de ainda não existir produção industrial de biodiesel a partir do óleo de dendê, com base na pesquisa bibliográfica realizada sobre o assunto, somada a algumas hipóteses formuladas, foi possível estruturar um modelo para a sua produção, conforme pode ser observado na Figura 16.

Figura 16: Sistema de produto do biodiesel de dendê

A primeira hipótese feita diz respeito à localização da usina de produção do biodiesel de dendê. Adotou-se como referência a usina do Grupo Agropalma, ainda que esta, até o momento, esteja operando apenas com a borra do óleo de dendê refinado como matéria-prima e fazendo uso da esterificação metálica. O óleo de palma bruto é transportado da indústria de extração do óleo para a usina de biodiesel por via fluvial. Admitiu-se que o etanol anidro e a soda cáustica utilizados no processo são transportados da Usina Pagrisa, localizada na cidade de Ulianópolis e, da Braskem S.A., situada em Maceió, respectivamente, ambos por via rodoviária.

Os subsistemas produção de óleo de dendê, produção do etanol e produção da soda cáustica, também foram modelados e, estão representados pelas Figuras 17, 18 e 19 respectivamente.

Figura 17: Subsistema da produção do óleo de dendê

Figura 18: Subsistema produção do etanol anidro

Figura 19: Subsistema da produção de soda cáustica

A etapa de refino do óleo de dendê foi excluída do subsistema, pois segundo Brito (2005) e Aguiar (2005), não há necessidade de se utilizar um óleo de qualidade tão alta para a fabricação do biodiesel, além do que este apresenta valor agregado muito alto, o que o torna economicamente inviável para ser destinado à produção de combustível.

No entanto, vale ressaltar que o subsistema produção do biodiesel considera, conforme descrito na revisão bibliográfica, uma etapa de tratamento do óleo bruto, na qual são reduzidos os percentuais de ácido graxo livre e de umidade.

Tanto para o subsistema da produção do óleo de dendê quanto para o subsistema da produção do etanol anidro, foram consideradas as entradas dos fertilizantes e defensivos nas fases agrícolas de produção, mas foram excluídos os aspectos ambientais referentes à produção dos mesmos, pois num compute geral estes devem ser poucos significativos. Além disso, a quantidade de fertilizantes utilizada na plantação do dendê e da cana-de-açúcar (para produção do etanol) é geralmente baixa, pois os resíduos do processo de obtenção do óleo de palma e do álcool são utilizados como fertilizantes. Portanto, acredita-se que o impacto ambiental da produção dos fertilizantes e defensivos não ocasionaria mudança considerável no estudo.

5.1.3 Análise de Inventário

5.1.3.1 Inventário do petrodiesel

De acordo com o sistema de produto modelado para o petrodiesel, fez-se necessário obter dados dos seguintes subsistemas para a consolidação do seu inventário: petróleo extraído em terra, petróleo extraído em mar, petróleo importado, transporte, energia elétrica e refino do petróleo.

Da base de dados do software GABI 4 (2004), encontra-se um inventário do petróleo consumido no Brasil, que inclui as atividades de extração em terra e mar e, a importação.

Segundo esse inventário, para cada 1 t de petróleo, cerca de 0,083 t são perdidos no transporte até a refinaria. A partir dessa informação e, levando-se em consideração a densidade do petrodiesel igual a $0,852 \text{ t/m}^3$ e os dados de produção do mesmo em relação à quantidade de petróleo refinado - cerca de 2,66 t de petróleo para cada 1 t de petrodiesel produzido, conforme ANP (2005d) - foi possível converter os dados obtidos junto ao citado software para o fluxo de referência determinado. Sendo assim, para 26,11 litros de petrodiesel, são necessários 64,60 kg de petróleo, dos quais 5,36 kg serão perdidos durante o transporte, entrando 59,2 kg na etapa do refino. A Tabela 25 apresenta os dados do petróleo nacional e importado consumido para a produção de 26,11 litros de petrodiesel.

Tabela 25: Inventário de 59,2 kg de petróleo nacional e importado

Entradas	
Petróleo (kg)	6,46E+01
Carvão (kg)	2,76E-03
Gás Natural (kg)	2,51E+00
Energia (MJ)	1,92E-02
Combustíveis renováveis (kg)	1,92E-02
Urânio natural (kg)	6,74E-07
Água (kg)	1,33E+01
Saídas	
Energia (MJ)	5,50E-02
Efluentes líquidos	
DBO (kg)	1,98E-03
DQO (kg)	1,22E-02
Metais pesados não especificados (kg)	2,74E-07
Hidrocarbonetos (kg)	1,15E-04
	continua

	conclusão
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,91E-06
Água residual (kg)	1,85E-04
Óleo não especificado (kg)	4,89E-04
Sólidos suspensos totais (kg)	6,29E-03
Emissões atmosféricas	
CO ₂ (kg)	9,63E+00
CO (kg)	1,91E-02
Vapor de água (kg)	1,36E-02
CH ₄ (kg)	1,53E-01
Material particulado (kg)	7,17E-03
Resíduos sólidos	
Resíduos não especificados (kg)	2,06E-08

Fonte Gabi 4 (2004)

No que diz respeito, ao transporte do petróleo importado, utilizaram-se os dados de Borges (2004), calculados para navio com capacidade média de 88.750 t, considerando o retorno do mesmo vazio à origem. De acordo com informações obtidas durante a revisão bibliográfica, foi possível estimar que 67% da quantidade de petróleo importado é proveniente da África e 33% proveniente do Oriente Médio. A distância média percorrida, portanto, é da ordem de 13.300 km, visto que segundo GROSVENOR et al (1995, apud BORGES, 2004), do Brasil ao continente africano tem-se cerca de 10.000 km e, do Brasil ao Oriente Médio 20.000 km.

Conforme visto durante revisão bibliográfica, 24% do petróleo consumido no país é de origem estrangeira, sendo assim, são importados cerca de 14,21 kg de petróleo dos 59,2 kg de petróleo refinado.

A Tabela 26 apresenta o inventário do transporte de 14,21 kg de petróleo por uma distância média de 13.300 km.

Tabela 26: Inventário do transporte de 14,21 kg de petróleo importado

Entradas	
Petróleo (kg)	1,55E+03
Energia (MJ)	3,85E+00
Gás natural (kg)	9,87E-02
Água (kg)	4,66E-05
Saídas	
Emissões atmosféricas	
Aldeídos (kg)	4,76E-06
NH ₃ (kg)	2,38E-06
CO (kg)	1,34E-02
CO ₂ (kg)	4,66E+00

continua

	conclusão
Hidrocarbonetos (kg)	1,08E-02
Material particulado (kg)	4,69E-04
Metais (kg)	1,41E-05
N ₂ O (kg)	5,72E-06
Nox (kg)	8,65E-02
SO ₂ (kg)	7,03E-02
SO _x (kg)	1,27E-04
COVNM (kg)	2,44E-04
Efluentes líquidos	
DBO (kg)	7,14E-07
Cl ⁻ (kg)	1,41E-05
DQO (kg)	3,54E-06
Petróleo (kg)	6,88E-05
Hidrocarbonetos (kg)	2,81E-05
Sólidos dissolvidos totais (kg)	1,51E-03
Sólidos suspensos totais (kg)	7,14E-07
H ₂ (kg)	4,23E-05
Íons metálicos (kg)	7,06E-06
Óleo não especificado (kg)	8,20E-06
Resíduos sólidos	
Resíduos minerais (kg)	1,97E-03
Resíduos sólidos oleosos (kg)	1,95E-02
Resíduos não inertes (kg)	1,86E-04
Escória (kg)	2,81E-06

Fonte: Borges (2004)

No que se refere ao subsistema do refino do petróleo, conforme mencionado anteriormente, há uma rota complementar para produção do petrodiesel, que não é adotada por todas as refinarias. A REPLAN faz uso dessas duas rotas e, por ser a maior produtora de petrodiesel do Brasil, decidiu-se utilizá-la como modelo para este estudo.

Na ausência de dados nacionais para o levantamento dos aspectos ambientais gerados nesse subsistema, utilizou-se como base, os dados referentes a uma refinaria australiana, disponíveis na base de dados do *Centre for Design* (2005). Tal estudo apresenta o mesmo processo de refino utilizado pela REPLAN e, de acordo com a Petrobras (2005), as tecnologias empregadas em suas refinarias não estão distantes daquelas utilizadas internacionalmente, sendo assim, pode-se dizer que os dados do *Centre for Design* (2005) podem ser aplicados no presente trabalho.

No entanto, na análise de inventário do Centre for Design (2005), foi considerado que todo o gás de refinaria é consumido internamente para a geração de energia, o que tornou a refinaria auto-suficiente energeticamente, porém, de acordo com informações obtidas junto a Oliveira (2005), essa não é a realidade das refinarias brasileiras, pois mesmo com todo o gás sendo consumido, cada uma apresenta uma carência média de aproximadamente 64 MWh por hora.

Foi necessário portanto, adicionar ao inventário do Centre for Design (2005), uma entrada de energia.

Segundo a ANP (2005d), a REPLAN refina em média 2.035.491 kg de petróleo por hora, sendo assim, a refinaria necessita de cerca de 0,11 MJ por kg de petróleo refinado, além da energia obtida pelo gás de refinaria. Portanto, foi acrescentada ao inventário do *Centre for Design* (2005), uma entrada de energia da ordem de 6,67 MJ para o refino de 59,2 kg de petróleo.

A Tabela 27 apresenta o inventário de 59,2 kg de petróleo refinado.

Tabela 27: Inventário do refino de 59,2 kg de petróleo

Entradas	
Petróleo refinado no Brasil (kg)	5,92E+01
Energia elétrica (MJ)	6,67E+00
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	4,92E-01
CH ₄ (kg)	2,25E-03
NO _x (kg)	3,46E-04
CO (kg)	1,56E-03
COVNM (kg)	5,66E-02
Material particulado (kg)	6,01E-04
SO _x (kg)	2,89E-04
Metil carptano (kg)	5,92E-07
Hidrocarbonetos (kg)	1,18E-06
H ₂ S (kg)	1,24E-05
Efluentes Líquidos	
Na (kg)	9,66E-04
Cl ⁻ (kg)	1,44E-03
Óleo não especificado (kg)	4,21E-04

Fonte: Centre for Design (2005), Oliveira (2006), ANP (2005d)

Para o inventário do ciclo de vida do subsistema energia elétrica, utilizou-se o estudo de Coltro; Garcia e Queiroz (2003). A Tabela 28 apresenta os dados desse inventário para 6,67 MJ de energia elétrica necessárias para o refino de 59,2 kg de petróleo conforme dito, anteriormente.

Tabela 28: Inventário da geração de 6,67 MJ de energia no Brasil

Entradas	
Energia (MJ)	1,05E+01
Reservas Bióticas (kg)	3,26E-02
Carvão (kg)	8,54E-02
Gás natural (kg)	5,08E-03
Petróleo (kg)	8,06E-03
Água (kg)	7,76E+02
Materiais secundários (kg)	6,01E-03
Urânio (kg)	1,20E-06
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
CH ₄ (kg)	3,66E-04
CO (kg)	9,93E-04
CO ₂ (kg)	1,19E-01
Vapor de água (kg)	1,53E+00
Hidrocarbonetos (kg)	5,00E-06
Metais (kg)	6,67E-11
NH ₃ (kg)	3,99E-12
COVM (kg)	4,85E-05
NO _x (kg)	3,84E-03
N ₂ O (kg)	7,33E-05
Material particulado (kg)	4,50E-04
SO ₂ (kg)	7,78E-04
Radioatividade para o ar (kBq)	6,52E-02
Efluentes líquidos	
Ácidas (kg)	1,13E-09
DBO (kg)	4,67E-07
DQO (kg)	1,20E-06
Cl ⁻ (kg)	1,96E-08
Metais pesados não especificados (kg)	1,20E-09
Hidrocarbonetos (kg)	2,00E-07
Metais (kg)	6,67E-08
Compostos de nitrogênio (kg)	3,01E-08
Óleos e graxas (kg)	9,37E-07
Compostos de enxofre (kg)	3,01E-09
Sólidos dissolvidos totais (kg)	3,34E-07
Sólidos suspensos totais (kg)	6,67E-07
continua	

	conclusão
Radioatividade para a água (kBq)	1,00E-01
Resíduos Sólidos	
Resíduos no solo (kg)	8,89E-02
Resíduos processuais (kg)	7,15E-02

Fonte: Coltro; Garcia e Queiroz (2003)

Com a conclusão dos inventários petróleo nacional e importado, transporte do petróleo importado, refino do petróleo e energia elétrica, a consolidação do inventário do petrodiesel, adaptado às condições brasileiras, pôde ser efetuada.

No entanto, conforme levantado durante revisão bibliográfica, o petrodiesel não é o único produto obtido com o refinamento do petróleo e, dessa forma, fez-se necessário ratear os aspectos ambientais entre todos os produtos, para se obter os dados relativos apenas ao petrodiesel. Decidiu-se, portanto, utilizar como critério, a alocação por poder calorífico.

Os fatores de alocação foram determinados com base nas porcentagens em volume das quantidades produzidas pela REPLAN de cada um dos derivados de petróleo no ano de 2004, de acordo com ANP (2005d), e nos seus poderes caloríficos, conforme pode ser observado na Tabela 29.

Tabela 29: Determinação dos fatores de alocação para os derivados do petróleo

Derivados do petróleo	% em volume	Para uma base de 100 m ³	Massa específica (kg / m ³)	Massa (kg)	Poder calorífico (kcal / kg)	Energia (kcal)	Alocação (%)
Petrodiesel	38,23%	3,82E+01	8,52E+02	3,26E+04	1,01E+04	3,29E+08	39,56%
Querosene de aviação	3,15%	3,15E+00	7,90E+02	2,49E+03	1,04E+04	2,59E+07	3,11%
Querosene iluminante	0,38%	3,84E-01	7,90E+02	3,03E+02	1,04E+04	3,15E+06	0,38%
Asfeto	0,62%	6,18E-01	1,04E+03	6,42E+02	9,79E+03	6,29E+06	0,76%
Gasolina automotiva	18,81%	1,88E+01	7,40E+02	1,39E+04	1,04E+04	1,45E+08	17,42%
GLP	8,03%	8,03E+00	5,50E+02	4,42E+03	1,11E+04	4,90E+07	5,91%
Óleo combustível	16,51%	1,65E+01	1,00E+03	1,65E+04	9,59E+03	1,58E+08	19,02%
Coque	4,68%	4,68E+00	1,04E+03	4,86E+03	8,39E+03	4,08E+07	4,91%
Nafta	8,87%	8,87E+00	7,20E+02	6,39E+03	1,06E+04	6,77E+07	8,14%
Outros	0,73%	7,30E-01	8,74E+02	6,38E+02	1,02E+04	6,51E+06	0,78%
Total						8,31E+08	

Fonte: ANP (2005d)

A Tabela 30 apresenta o inventário consolidado de 26,11 L de petrodiesel.

Tabela 30: Inventário consolidado de 26,11 L de petrodiesel

Entradas	
Água (kg)	3,12E+02
Carvão (kg)	3,49E-02
Combustíveis renováveis (kg)	7,60E-03
Energia (MJ)	5,68E+00
Gás Natural (kg)	1,03E+00
Materiais secundários (kg)	2,38E-03
Petróleo (kg)	6,39E+02
Reservas Bióticas (kg)	1,29E-02
Urânio (kg)	7,41E-07
Saídas	
Energia (MJ)	2,18E-02
Efluentes líquidos	
Ácidas (kg)	4,47E-10
Água residual (kg)	7,32E-05
Cl ⁻ (kg)	5,75E-04
Compostos de enxofre (kg)	1,19E-09
Compostos de nitrogênio (kg)	1,19E-08
DBO (kg)	7,84E-04
DQO (kg)	4,83E-03
Efluentes líquidos não especificados (kg)	7,56E-07
H ₂ (kg)	1,67E-05
Hidrocarbonetos (kg)	5,67E-05
Íons metálicos (kg)	2,79E-06
Metais (kg)	2,64E-08
Metais pesados não especificados (kg)	1,09E-07
Na (kg)	3,82E-04
Óleo não especificado (kg)	3,63E-04
Óleos e graxas (kg)	3,71E-07
Petróleo (kg)	2,72E-05
Radioatividade para a água (kBq)	3,96E-02
Sólidos dissolvidos totais (kg)	5,98E-04
Sólidos suspensos totais (kg)	2,49E-03
Emissões atmosféricas	
Aldeídos (kg)	1,88E-06
CH ₄ (kg)	6,16E-02
CO (kg)	1,39E-02
CO ₂ (kg)	5,90E+00
COVNM (kg)	2,25E-02
H ₂ S (kg)	4,91E-06
Hidrocarbonetos (kg)	4,28E-03
Material particulado (kg)	3,44E-03
Metais (kg)	5,58E-06

continua

	conclusão
Metil carptano (kg)	2,34E-07
N ₂ O (kg)	3,13E-05
NH ₃ (kg)	9,42E-07
NO _x (kg)	3,59E-02
Radioatividade para o ar (kBq)	2,58E-02
SO ₂ (kg)	2,81E-02
SO _x (kg)	1,65E-04
Vapor de água (kg)	6,11E-01
Resíduos sólidos	
Escória (kg)	1,11E-06
Resíduos não inertes (kg)	7,36E-05
Resíduos minerais (kg)	7,79E-04
Resíduos não especificados (kg)	8,15E-09
Resíduos no solo (kg)	3,52E-02
Resíduos processuais (kg)	2,83E-02
Resíduos sólidos oleosos (kg)	7,71E-03

5.1.3.2 Inventário do biodiesel

Para o levantamento de dados do biodiesel, fez-se necessário, primeiramente, considerar os inventários das principais substâncias envolvidas no processo: o óleo de dendê, o etanol e a soda cáustica (catalisador). De acordo com Silva (1997), a transesterificação de 30 kg de óleo de dendê necessita de 24 kg de etanol (15kg como matéria-prima direta e 9 kg referentes à quantidade de etanol recuperado no processo) e 0,3 kg de soda cáustica, para que se produza o volume de biodiesel determinado pelo fluxo de referência.

Em seguida, fez-se necessário elaborar os inventários dos subsistemas de transporte das matérias-primas e do catalisador até a usina de biodiesel, além do inventário do subsistema produção do biodiesel.

5.1.3.2.1 Inventário do óleo de dendê

Os dados para a elaboração deste inventário foram obtidos de literatura especializada e de entrevistas conduzidas junto a funcionários do Grupo Agropalma, durante visitas realizadas no período de 6/2/06 a 8/2/06 e 11/04/06 a 13/04/06.

A maioria das informações sobre entradas referentes à unidade de processo agrícola da produção do óleo foi baseada em dados primários.

As quantidades de adubo e nutrientes consideradas no que se refere ao período do pré-plantio foram calculadas com base nos dados de Barcelos et al. (1995), enquanto aquelas relativas ao período do plantio definitivo, foram as utilizadas pelo Grupo Agropalma, no ano de 2004, sendo que cerca de 14% da área é destinada à plantação orgânica, ou seja, não usa adubação química, utilizando para tal função os cachos vazios, a borra e os 30% das fibras e cascas, todos resultantes da etapa industrial de produção do óleo.

Vale ressaltar que essas quantidades podem sofrer variações, pois são determinadas, primeiramente, a partir da análise da quantidade de fertilizantes presentes nos resíduos da extração (cacho, casca, fibra, etc), chamada análise da exportação. Por meio dela sabe-se que deve ser adicionada, no mínimo, as quantidades de fertilizantes perdidas nos resíduos. Em seguida, é realizada uma segunda análise, que pode ser da folha do dendezeiro ou do solo.

Considerou-se que cerca de 10% da entrada de N e P_2O_5 vão para efluentes líquidos, conforme recomenda Schmidt (2004) e, que 0,0125 kg de N_2O e 0,5 kg de CO_2 são emitidos para a atmosfera por kg de adubo nitrogenado e por kg de uréia, respectivamente, segundo Almeida (2006).

No que diz respeito aos defensivos, foram empregados os valores médios utilizados pela Agropalma. Apenas três defensivos são utilizados: acefato, carbaryl e glifosato, visto que a mesma tem preferência pelo controle biológico, para que não haja comprometimento do polinizador, responsável pela produção dos cachos de fruto. Admitiu-se que da entrada total de defensivos, 5% sai como emissão atmosférica, 20% como efluente líquido e o restante como emissão para o solo (YUSSOF; HANSEN, 2005).

A plantação do dendê no Grupo Agropalma não necessita de sistema de irrigação, pois as chuvas abundantes da região suprem toda necessidade de água do dendezeiro. No entanto, foi necessário considerar a entrada de água durante o período do pré-plantio, pois é uma fase em que a irrigação é controlada. Esta entrada de água foi obtida diretamente com a empresa.

Considerando a idade média dos dendezeiros da Agropalma, admitiu-se que a produção de cachos por hectare, por ano, é de cerca de 15 toneladas. Em 27 anos, tempo estimado de vida útil do dendê, esta área de 1 ha (10.000 m²) dará, no total,

405 toneladas de cachos. Como para a produção de 30 kg de óleo de dendê (quantidade necessária para atender o fluxo de referência) são necessários aproximadamente 150 kg de cachos, conforme Kaltner (1997), tem-se uma necessidade de 3,7 m² de área. Com essa determinação, foi possível estimar a quantidade de *Pueraria javanica*, pois conforme levantado durante a revisão bibliográfica, a necessidade da leguminosa gira em torno de 5 kg/ha.

A Tabela 31 apresenta os dados de inventário da etapa agrícola. Os dados foram quantificados tomando-se por base a produção de 150 kg de cachos de fruto, necessários, conforme dito anteriormente, para a produção de 30 kg de óleo de dendê.

Tabela 31: Inventário da etapa agrícola de 150 kg de cachos de fruto.

Entradas	
N (kg)	1,80E-01
P ₂ O ₅ (kg)	2,79E-01
KCl (kg)	4,38E+00
Mg (kg)	3,83E-01
Mn (kg)	4,75E-03
Zn (kg)	1,29E-02
B (kg)	3,05E-03
Glifosato (kg)	8,64E-02
Carbaryl (kg)	3,46E-02
Acefato (kg)	1,77E-05
<i>Pueraria javanica</i> (kg)	1,85E-03
Água (kg)	1,22E+04
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	2,20E-02
N ₂ O (kg)	1,68E-02
Acefato (kg)	8,85E-07
Glifosato (kg)	4,32E-03
Carbaryl 85M (kg)	1,73E-03
Efluentes Líquidos	
N (kg)	1,80E-02
P ₂ O ₅ (kg)	2,79E-02
Glifosato (kg)	1,73E-02
Carbaryl (kg)	6,92E-03
Acefato (kg)	3,54E-06
Emissões para o solo	
Acefato (kg)	1,33E-05
continua	

	conclusão
Glifosato (kg)	6,48E-02
Carbaryl (kg)	2,60E-02

O transporte dos cachos de fruto colhidos do dendezeiro para a indústria, segundo o Grupo Agropalma, é do tipo rodoviário, sendo percorrida uma distância de aproximadamente 29 km. Estes dados foram modelados em banco de dados estrangeiro (PRÉ-CONSULTANTS, 2003c), considerando-se o retorno do caminhão vazio até a origem. A Tabela 32 apresenta o inventário desta unidade de processo para 150 kg de cachos.

Tabela 32: Inventário do transporte de 150 kg de cachos de fruto.

Entradas	
Diesel (kg)	1,79E-01
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	5,79E-01
CO (kg)	3,57E-03
SO ₂ (kg)	4,79E-04
NO _x (kg)	1,18E-02
N ₂ O (kg)	1,48E-05
Material particulado (kg)	2,27E-04
COVNM (kg)	2,18E-03
CH ₄ (kg)	3,92E-04
Fonte : PRÉ-CONSULTANTS (2003c)	

Os dados da etapa industrial foram baseados em dados primários e complementados com fontes secundárias, pois a empresa não efetua todas as medições necessárias para a elaboração do inventário.

Como a extração do óleo de dendê é um processo físico, as entradas da etapa industrial resumem-se à água, ao vapor e à energia, além dos cachos de fruto.

A informação referente à quantidade de água foi obtida diretamente do Grupo Agropalma.

Quanto ao consumo de vapor e energia, a indústria de extração do óleo é auto-suficiente, pois conforme levantado durante a revisão bibliográfica, 70% das fibras e cascas resultantes do processo são queimadas em caldeira para geração de vapor, sendo parte deste vapor utilizado diretamente no processo e o restante usado para acionar turbo-geradores para a produção de energia elétrica.

Para a determinação dos dados referentes aos efluentes líquidos da etapa industrial; obteve-se junto ao Grupo Agropalma, os valores para DBO, DQO, matéria graxa, sólidos totais, sólidos em suspensão e sólidos sedimentados, os quais coincidiram, com os valores encontrados em literatura nacional especializada (RITTNER, 1996; KALTNER, 1997). Também foram utilizados os dados dessas fontes secundárias para completar as informações relativas aos efluentes líquidos (nitrogênio total e água).

No que diz respeito às quantidades de resíduos sólidos e emissão de vapor, as mesmas foram obtidas de Rittner (1996), porém os resíduos sólidos, conhecidos como borra, não serão computados neste inventário, pois são utilizados na plantação como adubo.

A Tabela 33 apresenta o inventário da etapa industrial para a produção de 30 kg de óleo de dendê.

Tabela 33: Inventário da etapa industrial para a produção de 30 kg de óleo de dendê

Entradas	
Cachos de frutos (kg)	1,50E+02
Água (kg)	3,90E+01
Saídas	
Energia (MJ)	1,57E+02
Emissões Atmosféricas	
Vapor de água (kg)	1,50E+01
Efluentes Líquidos	
DBO (kg)	6,32E-01
DQO (kg)	9,55E-01
Sólidos em suspensão (kg)	4,34E-01
Sólidos totais (kg)	1,78E+00
Sólidos sedimentares (kg)	3,87E-01
Compostos de nitrogênio (kg)	7,49E-02
Matéria graxa (kg)	1,73E-01

Para a determinação dos aspectos ambientais relacionados à unidade de processo energia térmica, utilizou-se fontes secundárias.

Segundo Rittner (1996), considerando-se como típico um rendimento energético da ordem de 60% na combustão das cascas e fibras para geração de vapor de alta pressão, e um rendimento não inferior a 80% nos turbo-geradores de energia

elétrica, tem-se que a energia utilizável a partir dos resíduos corresponde a cerca de 50% do valor teórico, o que resulta em 263.000 kcal por tonelada de cacho processado. Como a energia total requerida para processar uma tonelada de cacho é da ordem de 12.900 kcal, tem-se ainda um excedente de energia da ordem de 250.000 kcal por tonelada de cacho processado. Portanto, para a produção de 30 kg de óleo, há um excedente de energia de 157 MJ, visto que conforme mencionado anteriormente, para esta quantidade de óleo são necessários 150 kg de cachos.

No entanto, segundo o Grupo Agropalma, para se iniciar a produção do óleo, faz-se necessário gerar energia por queima de combustível fóssil, sendo consumidos, aproximadamente, 3 kg de petrodiesel por tonelada de óleo produzido.

Os dados correspondentes ao subsistema energia térmica, ou seja, às emissões da queima do petrodiesel e das cascas e fibras, foram todos obtidos de fonte secundária. Os primeiros da base de dados Pré-Consultants (2003b) e os demais do estudo de Yussof; Hanssen (2005).

A quantidade de CO₂ proveniente da queima da biomassa - denominada emissões de CO₂ renovável - não foi considerada, pois será absorvida pela plantação de dendê, já que as plantas têm capacidade de absorver todo o CO₂ emitido a partir do carbono que as constituem (CERRI, 2005).

As Tabelas 34 e 35 apresentam os inventários da unidade de processo energia térmica a partir da queima de petrodiesel e da energia térmica a partir queima das cascas e fibras, respectivamente.

Tabela 34: Inventário do subsistema energia térmica a partir da queima do petrodiesel para produção de 30 kg de óleo de dendê

Entradas	
Diesel (kg)	8,88E-02
Saídas	
Emissões atmosféricas	
Monóxido de carbono (kg)	4,88E-05
Material particulado (kg)	1,84E-04
SOx (kg)	1,48E-03
CO ₂ (kg)	3,01E-01
NO ₂ (kg)	5,77E-04
Hidrocarbonetos (kg)	2,66E-05

Fonte : PRÉ - CONSULTANTS (2003b)

Tabela 35: Inventário do subsistema energia térmica a partir da queima das cascas e fibras para produção de 30 kg de óleo de dendê

Entradas	
Cascas + fibras (kg)	1,79E+01
Saídas	
Energia (MJ)	1,57E+02
Emissões atmosféricas	
COVNM (kg)	1,50E-03
Monóxido de carbono (kg)	1,69E-01
Material particulado (kg)	4,14E-02
NO _x (kg)	1,92E-02
SO _x (kg)	6,00E-04

Fonte: Yussouf; Hanssen (2005)

Para a consolidação do inventário do subsistema óleo de dendê adaptado às condições brasileiras, fica faltando ainda, o inventário de ciclo de vida da unidade de processo produção do petrodiesel, que foi determinado no item 5.1.3.1 e, apresentado na Tabela 30.

Porém, deve-se ressaltar que os dados da Tabela 30 foram calculados para 26,11 litros e, portanto devem ser convertidos para a quantidade de petrodiesel que é utilizada neste subsistema. Conforme pode ser observado nas Tabelas 32 e 34, respectivamente, na unidade de processo transporte foram empregadas 179 g e, na unidade de processo energia térmica, 88,8 g, totalizando, portanto 268 g.

A consolidação do inventário foi feita, a partir da união dos dados das Tabelas 31, 32, 33, 34 e 35, além dos dados convertidos da Tabela 30. Entretanto, uma variável importante foi levada em consideração, o sequestro de carbono pela planta, para realização da fotossíntese.

De acordo com Cerri (2006) e Silva et al (2000), cerca de 40% da matéria seca da planta (copa, estipe e raízes) correspondem à quantidade em massa de carbono sequestrado por planta. No que diz respeito à plantação de dendê, de acordo com Silva et al (2000), tem-se um sequestro de aproximadamente 41,43 t de carbono por hectare, ao longo dos 27 anos de vida útil da planta.

Considerando-se os 3,70 m² de área plantada, determinada durante a execução do inventário da etapa agrícola, tem-se cerca de 15 kg de carbono sequestrado, o que

corresponde a cerca de 56 kg de CO₂. Dessa forma, para a conclusão do inventário do óleo de dendê, deve-se, portanto fechar o balanço de CO₂.

Dos 56 kg de gás carbônico seqüestrados, sabe-se que parte é proveniente da queima de cascas e fibras utilizadas para geração de vapor e energia, conforme Cerri (2005). Sabendo-se que na produção de 30 kg de óleo de dendê são queimadas aproximadamente 5,25 kg de cascas e 12,6 kg de fibras e que, de acordo com Torres (1990), as fibras e cascas apresentam, respectivamente, por volta de 53% e 45% de carbono em sua composição e, admitindo-se que, o rendimento seja de 60%, na queima, conforme Rittner (1996), estima-se que 19 kg de CO₂ são emitidos.

As quantidades de CO₂, de origem fóssil, lançadas a atmosfera em todos as unidades de processo que compõem o subsistema somam cerca de 0,98 kg. Sendo assim, toda a emissão de CO₂ fóssil emitida no subsistema óleo de dendê pode ser absorvida pela planta, restando ainda, um seqüestro de 36 kg. Esta quantidade ainda absorvida foi representada no inventário do consolidado pelo sinal negativo.

Vale ressaltar que não foi considerado o seqüestro de carbono pela *Puerária Javanica*, pois esta é uma leguminosa e, segundo Cerri (2006), as leguminosas apresentam baixa capacidade de realização da fotossíntese.

Conforme levantado na revisão bibliográfica, o óleo de dendê não é o único produto obtido do fruto do dendê, pois se têm ainda o óleo de palmiste e a torta de palmiste e, dessa forma, faz-se necessário alocar os aspectos ambientais entre os três produtos citados, para se obter os dados equivalentes apenas ao óleo de dendê.

O critério adotado foi o de alocação por valor econômico, considerando-se que ao produzir 30 kg de óleo de dendê, tem-se como co-produto 2,25 kg de óleo palmiste e 5,25 kg de torta de palmiste (KALTNER, 1997) e os valores de mercado são, respectivamente, R\$ 1.074,15, R\$ 1.377,95 e R\$ 200,00, por tonelada de produto (BRITTO, 2005). Atribuiu-se, portanto, um fator de 88,5% para o óleo de dendê, 3% para a torta de palmiste e 8,5% para o óleo de palmiste.

A Tabela 36 apresenta o inventário consolidado de 30 kg de óleo de dendê.

Tabela 36: Inventário consolidado de 30 kg de óleo de dendê.

Entradas	
N (kg)	1,60E-01
continua	

	continuação
P ₂ O ₅ (kg)	2,47E+00
KCl (kg)	3,88E+00
Mg (kg)	3,39E-01
Mn (kg)	4,20E-03
Zn (kg)	1,14E-02
B (kg)	2,70E-03
Glifosato (kg)	7,65E-02
Carbaryl (kg)	3,07E-02
Acefato (kg)	1,57E-05
<i>Pueraria javanica</i> (kg)	1,64E-03
Água (kg)	2,91E+05
Energia (MJ)	6,04E-02
Reservas Bióticas (kg)	1,37E-04
Carvão (kg)	3,71E-04
Gás natural (kg)	1,10E-02
Petróleo (kg)	6,79E+00
Materiais secundários (kg)	2,53E-05
Urânio (kg)	7,88E-09
Combustíveis renováveis (kg)	8,08E-05
Saídas	
Energia (MJ)	1,39E+02
Emissões Atmosféricas	
N ₂ O (kg)	1,49E-02
Acefato (kg)	7,84E-07
Glifosato (kg)	3,83E-03
Carbaryl (kg)	1,53E-03
CO (kg)	1,53E-01
SO ₂ (kg)	7,24E-04
CO ₂ (kg)	- 3,19E+01
NO _x (kg)	2,78E-02
Material Particulado (kg)	3,71E-02
COVNM (kg)	3,50E-03
Metano (kg)	1,00E-03
Vapor de água (kg)	1,33E+01
SO _x (kg)	1,85E-03
NO ₂ (kg)	5,11E-04
H ₂ S (kg)	5,22E-08
NH ₃ (kg)	1,00E-08
Hidrocarbonetos (kg)	6,91E-05
Metil carptano (kg)	2,49E-09
Metais (kg)	5,93E-08
Radioatividade para o ar (kBq)	2,74E-04
Aldeídos (kg)	2,00E-08
Efluentes Líquidos	
N (kg)	1,60E-02
P ₂ O ₅ (kg)	2,47E-01
Glifosato (kg)	1,53E-02
Carbaryl (kg)	6,13E-03
Acefato (kg)	3,14E-06

continua

	conclusão
DBO (kg)	5,60E-01
DQO (kg)	8,46E-01
Sólidos suspensos totais (kg)	3,84E-01
Sólidos totais (kg)	1,57E+00
Sólidos sedimentados (kg)	3,43E-01
Compostos de nitrogênio (kg)	6,63E-02
Matéria graxa (kg)	1,53E-01
Água residual (kg)	7,78E-07
Metais pesados não especificados (kg)	1,16E-09
Efluentes líquidos não especificados (kg)	8,03E-09
Óleo não especificado (kg)	3,86E-06
Ácidas (kg)	4,75E-12
Na (kg)	4,06E-06
Cl ⁻ (kg)	6,12E-06
Hidrocarbonetos (kg)	6,03E-07
Metais (kg)	2,81E-10
Compostos de enxofre (kg)	1,27E-11
Sólidos dissolvidos totais (kg)	6,35E-06
Óleos e graxas (kg)	3,94E-09
Radioatividade para a água (kBq)	4,21E-04
Petróleo (kg)	2,89E-07
H ₂ (kg)	1,78E-07
Íons metálicos (kg)	2,97E-08
Resíduos sólidos e Emissões para o solo	
Glifosato (kg)	5,74E-02
Carbaryl (kg)	2,30E-02
Acefato (kg)	1,18E-05
Resíduos no solo (kg)	3,74E-04
Resíduos processuais (kg)	3,01E-04
Resíduos não especificados (kg)	8,67E-11
Resíduos sólidos oleosos (kg)	8,20E-05
Resíduos minerais (kg)	8,29E-06
Resíduos não inertes (kg)	7,82E-07
Escória (kg)	1,18E-08

5.1.3.2.2 Inventário do etanol anidro

Para a elaboração deste inventário, considerou-se uma usina que produz apenas etanol do tipo anidro, tendo como co-produtos o óleo fúsel e o bagaço excedente.

Embasaram a preparação do referido inventário, dois trabalhos sobre avaliação do ciclo de vida do etanol, um elaborado por Almeida (2006) e outro por Ometto (2005). Os dados do segundo precisaram ser utilizados para complementar

algumas informações do trabalho do primeiro, pois este, até o momento de execução deste trabalho, ainda não foi concluída.

No entanto, os dados de Ometto (2005) necessitaram passar por um ajuste, pois foram calculados para 1 t de álcool hidratado e não anidro. Considerando-se que 1 t de cana-de-açúcar pode produzir 68 kg de álcool anidro ou 72 kg de álcool hidratado, conforme Macedo et al. (2004), pode-se dizer que 68 kg de etanol anidro equivalem a 72 kg de etanol hidratado. Dessa forma, por linearidade, foi possível determinar que uma tonelada de álcool hidratado corresponde a 0,95 t de álcool anidro. Sendo assim, cada um dos dados de Ometto (2005) utilizados na composição deste inventário, foi dividido por 0,95.

Foram obtidos de Almeida (2006), os dados de entrada de fertilizantes, petrodiesel e ciclo hexano, bem como as emissões relacionadas ao uso dos mesmos, além da perda de álcool devido à vinhaça (efluente da coluna de destilação).

Para as entradas de defensivos obtidas de Ometto (2005), admitiu-se, assim como feito para o óleo de dendê, que 5% da entrada total de defensivos, sai como emissão atmosférica, 20% como efluente líquido e o restante como emissão para o solo (YUSSOF; HANSEN, 2005).

As emissões de CO₂ renovável, provenientes da queima do bagaço para geração de energia e da queima da palha da cana-de-açúcar, assim como feito para o óleo de dendê, não foram consideradas, pois estas serão absorvidas pelas novas plantas de cana-de-açúcar em crescimento.

Para a consolidação do inventário do etanol foram ainda considerados os aspectos ambientais relacionados ao petrodiesel, determinados no item 5.1.3.1, pois é o combustível utilizado na etapa de transporte e, assim como feito para o óleo de dendê, foi levado em consideração o sequestro de carbono pela cana-de-açúcar.

De acordo com Resende et al. (2006), a cana-de-açúcar sequestra por volta de 16,3 t de carbono por hectare, porém de acordo com Campos (2003), o balanço de CO₂ é nulo, ou seja, a quantidade de CO₂ emitida durante a queima do bagaço e da palha e no decorrer do uso do etanol como combustível, é igual à quantidade sequestrada.

Admitindo-se uma eficiência na combustão de 90%, tem-se que 15 kg de etanol (quantidade necessária para atender o fluxo de referência) liberam

aproximadamente 25,8 kg de CO₂, porém, no sistema de produto do biodiesel (Figura 15), ao qual faz parte o subsistema etanol, a fase de uso não foi incluída, ou seja, para este trabalho, as emissões relacionadas à queima do combustível não são consideradas.

Sendo assim, para o contexto deste estudo, o balanço de CO₂ não é nulo, pois as plantas absorvem 25,8 kg a mais de CO₂ do que emite o sistema considerado.

As quantidades de CO₂, de origem fóssil, lançadas à atmosfera nesse subsistema somam cerca de 0,1 kg, segundo Almeida (2005). Sendo assim, toda a emissão de CO₂ fóssil emitida pode ser absorvida pela planta, restando ainda, um seqüestro de 25,7 kg. Esta quantidade ainda absorvida foi representada no inventário consolidado pelo sinal negativo.

Não foi necessário alocar as cargas ambientais entre os co-produtos gerados, pois estes apresentam baixo valor agregado e, no caso de uma alocação por massa, estar-se-ia beneficiando o álcool, visto que a quantidade do bagaço excedente é muito maior do que a do etanol produzido (ALMEIDA, 2006).

A Tabela 37 apresenta o inventário consolidado de 15 kg de etanol.

Tabela 37: Inventário de 15 kg de etanol anidro

Entradas	
Água (kg)	2,19E+06
Ametrina (kg)	2,15E-03
CaCO ₃ (kg)	2,35E+00
Carbufuran (kg)	4,36E-02
Clorpirifos (kg)	1,38E-03
Comazona (kg)	9,20E-04
Diuron (kg)	2,30E-03
Fipronil (kg)	1,69E-05
Glifosato (kg)	2,43E-03
Ciclo hexano (kg)	1,14E-02
Hexazinone (kg)	9,20E-04
Isoflutoler (kg)	3,07E-04
K ₂ O (kg)	5,66E-01
Metribuzin (kg)	1,07E-03
N (kg)	3,93E-01
Mg (kg)	9,24E-04
P ₂ O ₅ (kg)	1,24E-01
Polímero de decantação (kg)	2,30E-05
Quartenário de amônia (kg)	2,30E-05

continua

	continuação
Sulfentrazone (kg)	1,20E-04
Tebuthiuron (kg)	6,14E-04
Energia (MJ)	9,99E-05
Reservas Bióticas (kg)	2,27E-07
Carvão (kg)	6,13E-07
Gás natural (kg)	1,82E-05
Petróleo (kg)	1,12E-02
Materiais secundários (kg)	4,18E-08
Urânio (kg)	1,30E-11
Combustíveis renováveis (kg)	1,34E-07
Saídas	
Energia (MJ)	3,81E-07
Emissões atmosféricas	
CO (kg)	7,61E-03
Material particulado (kg)	2,13E-02
NOx (kg)	1,79E-02
CO ₂ (kg)	-2,57E+01
CH ₄ (kg)	7,96E-05
N ₂ O (kg)	2,55E-03
COVNM (kg)	1,25E-03
SOx (kg)	2,69E-06
CO ₂ -eq (kg)	4,10E-03
Metil carptano (kg)	4,12E-12
H ₂ S (kg)	8,63E-11
NH ₃ (kg)	1,66E-11
Hidrocarbonetos (kg)	2,09E-06
Ametrina (kg)	1,08E-04
Carbufuran (kg)	2,18E-03
Clorpirifos (kg)	6,90E-05
Comazona (kg)	4,60E-05
Diuron (kg)	1,15E-04
Fipronil (kg)	8,45E-07
Glifosato (kg)	1,22E-04
Hexazinone (kg)	4,60E-05
Isoflutoler (kg)	1,54E-05
Metribuzin (kg)	5,35E-05
Sulfentrazone (kg)	6,01E-06
Tebuthiuron (kg)	3,07E-05
Aldeídos (kg)	3,31E-11
Radioatividade para o ar (kBq)	4,53E-07
Metais (kg)	9,81E-11
Efluentes Líquidos	
N (kg)	3,93E-02
P ₂ O ₅ (kg)	1,24E-02
Água residual (kg)	1,29E-09
Quartenário de amônia (kg)	2,30E-05

continua

	continuação
Polímero de decantação (kg)	2,30E-05
Glifosato (kg)	4,86E-04
Diuron (kg)	4,60E-04
Tebuthiuron (kg)	1,23E-04
Hexazinone (kg)	1,84E-04
Ametrina (kg)	4,30E-04
Metribuzin (kg)	2,14E-04
Comazona (kg)	1,84E-04
Sulfentrazone (kg)	2,40E-05
Fipronil (kg)	3,38E-06
Isoflutoler (kg)	6,14E-05
Carbufuran (kg)	8,72E-03
Clorpirifos (kg)	2,76E-04
Metais pesados não especificados (kg)	1,91E-12
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,33E-11
Óleo não especificado (kg)	6,39E-09
Ácidas (kg)	7,86E-15
DBO (kg)	1,38E-08
DQO (kg)	8,49E-08
Na (kg)	6,72E-09
Cl ⁻ (kg)	1,01E-08
Hidrocarbonetos (kg)	9,97E-10
Metais (kg)	4,64E-13
Compostos de nitrogênio (kg)	2,09E-13
Óleos e graxas (kg)	6,52E-12
Compostos de enxofre (kg)	2,09E-14
Sólidos dissolvidos totais (kg)	1,05E-08
Sólidos suspensos totais (kg)	4,38E-08
Radioatividade para a água (kBq)	6,95E-07
Petróleo (kg)	4,78E-10
H ₂ (kg)	2,94E-10
Íons metálicos (kg)	4,91E-11
Resíduos sólidos e emissões para o solo	
Ametrina (kg)	1,61E-03
Carbufuran (kg)	3,27E-02
Clorpirifos (kg)	1,04E-03
Comazona (kg)	6,90E-04
Diuron (kg)	1,73E-03
Fipronil (kg)	1,27E-05
Glifosato (kg)	1,82E-03
Hexazinone (kg)	6,90E-04
Isoflutoler (kg)	2,30E-04
Metribuzin (kg)	8,03E-04
Sulfentrazone (kg)	9,02E-05
Tebuthiuron (kg)	4,61E-04
Resíduos não inertes (kg)	1,58E-02
Etanol (kg)	1,50E-02

continua

	conclusão
Escória (kg)	1,99E-04
Resíduos no solo (kg)	6,18E-07
Resíduos processuais (kg)	4,97E-07
Resíduos não especificados (kg)	1,43E-13
Resíduos sólidos oleosos (kg)	1,36E-07
Resíduos minerais (kg)	1,37E-08

Fonte: Almeida (2006); Ometto (2005)

5.1.3.2.3 Inventário da soda cáustica

O grupo de Prevenção à Poluição da Escola Politécnica (USP), já efetuou um estudo que engloba o inventário da produção de soda cáustica. Este estudo, realizado por Borges (2004), considera que a mesma é 14% produzida através do processo de mercúrio e 86% através do processo de diafragma.

Destes processos, saem como subprodutos, o hidrogênio e o cloro. Fez-se necessário, portanto, alocar os aspectos ambientais entre o cloro, a soda cáustica e o hidrogênio. O critério adotado foi o de alocação em massa, atribuindo-se, portanto, um fator de 46,5 % para o cloro, 52,2 % para a soda, e 1,3 % para o hidrogênio.

No entanto, antes deste inventário ser utilizado, foi feita uma revisão dos dados para torná-los representativos ao contexto deste trabalho.

Primeiramente optou-se por considerar somente a produção por processo diafragma, visto que a Braskem S.A faz uso apenas dessa rota. Em segundo lugar, foram modificados os subsistemas produção do petrodiesel e produção do óleo combustível.

Os dados da unidade de processo produção do petrodiesel foram substituídos pelos dados de inventário determinados no item 5.1.3.1, com o devido cuidado de se adequar os aspectos ambientais para 1290 g de petrodiesel, que é a quantidade de petrodiesel utilizada neste subsistema para a produção de 0,3 kg de soda cáustica (quantidade necessária para atender o fluxo de referência), de acordo com Borges (2004).

No que diz respeito aos dados da unidade de processo produção do óleo combustível, estes também foram substituídos por um novo inventário, o qual foi elaborado, seguindo as mesmas etapas da determinação do inventário do petrodiesel,

no item 5.1.3.1., sendo o fator de alocação atribuído igual a 19,02%, conforme pode ser observado na Tabela 30.

A Tabela 38 apresenta o inventário de 49,8 g de óleo combustível utilizados, segundo Borges (2004), na fabricação de 0,3 kg de soda cáustica.

Tabela 38: Inventário de 49,8 g de óleo combustível

Entradas	
Energia (MJ)	8,89E-05
Reservas bióticas (kg)	2,73E-07
Carvão (kg)	7,46E-07
Gás natural (kg)	2,38E-05
Petróleo (kg)	1,36E-02
Água (kg)	1,41E-04
Materiais secundários (kg)	5,05E-08
Urânio natural (kg)	1,62E-11
Combustíveis renováveis (kg)	1,45E-09
Saídas	
Energia (MJ)	5,02E-07
Emissões Atmosféricas	
SO _x (kg)	3,72E-09
Metil carptano (kg)	5,43E-12
H ₂ S (kg)	1,14E-10
COVNM (kg)	1,04E-06
CH ₄ (kg)	1,42E-06
CO (kg)	3,09E-07
CO ₂ (kg)	1,33E-04
Vapor de água (kg)	1,30E-05
Hidrocarbonetos (kg)	9,07E-08
Metais (kg)	1,19E-10
NH ₃ (kg)	2,00E-11
NO _x (kg)	7,63E-07
N ₂ O (kg)	6,65E-10
Material particulado (kg)	7,75E-08
SO ₂ (kg)	5,98E-07
Radioatividade para o ar (kBq)	5,48E-07
Aldeídos (kg)	4,01E-11
Efluentes líquidos	
Metais pesados não especificados (kg)	1,26E-11
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,74E-11
Água residual (kg)	1,69E-09
Óleo não especificado (kg)	8,39E-09
Ácidas (kg)	9,54E-15
DBO (kg)	1,80E-08
DQO (kg)	1,11E-07

continua

	conclusão
Na (kg)	8,86E-09
Cl ⁻ (kg)	1,33E-08
Hidrocarbonetos (kg)	1,29E-09
Metais (kg)	5,61E-13
Compostos de nitrogênio (kg)	2,52E-13
Óleos e graxas (kg)	7,85E-12
Compostos de enxofre (kg)	2,52E-14
Sólidos dissolvidos totais (kg)	2,81E-12
Sólidos suspensos totais (kg)	5,73E-08
Radioatividade para a água (kBq)	8,45E-07
Petróleo (kg)	5,79E-10
H ₂ (kg)	3,56E-10
Íons metálicos (kg)	5,93E-11
Resíduos sólidos	
Resíduos no solo (kg)	7,50E-07
Resíduos processuais (kg)	6,00E-07
Resíduos não especificados (kg)	1,88E-13
Resíduos sólidos oleosos (kg)	4,88E-04
Resíduos minerais (kg)	1,65E-08
Resíduos não inertes (kg)	1,56E-09
Escória (kg)	2,37E-11

A Tabela 39 apresenta o inventário revisado de 0,3 kg de soda cáustica.

Tabela 39: Inventário de 0,3 kg de soda cáustica

Entradas	
Energia (MJ)	1,61E+00
Água (kg)	1,96E+02
Sal-gema (kg)	2,80E-01
Carvão (kg)	2,17E-02
Materiais secundários (kg)	1,51E-03
Gás natural (kg)	7,31E-02
Petróleo (kg)	4,43E+01
Reservas bióticas (kg)	8,20E-03
Urânio (kg)	3,21E-07
Combustíveis renováveis (kg)	5,08E-04
Saídas	
Energia (MJ)	1,51E-03
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	5,80E+00
SO _x (kg)	2,52E-02
NO ₂ (kg)	9,79E-03
CO (kg)	2,03E-03
Material particulado (kg)	3,53E-03
Hidrocarbonetos (kg)	8,23E-04
NH ₃ (kg)	6,53E-08

continua

continuação	
Metais (kg)	3,87E-07
N ₂ O (kg)	1,87E-05
NO _x (kg)	3,52E-03
SO ₂ (kg)	2,42E-03
Vapor de água (kg)	3,88E-01
Metano (kg)	4,37E-03
COVNM (kg)	1,64E-03
Radioatividade para o ar (kBq)	1,64E-02
CFC (kg)	2,37E-06
Cl ₂ (kg)	1,81E-07
H ₂ (kg)	1,40E-04
Metil carptano (kg)	1,63E-08
H ₂ S (kg)	3,41E-07
Tetraclorometano (kg)	8,37E-07
Aldeídos (kg)	1,31E-07
Efluentes líquidos	
DBO (kg)	5,46E-05
DQO (kg)	3,36E-04
Hidrocarbonetos (kg)	3,99E-06
Metais (kg)	3,27E-08
Óleo não especificado (kg)	2,53E-05
Óleos e graxas (kg)	2,36E-07
Sólidos suspensos totais (kg)	1,73E-04
Sólidos dissolvidos totais (kg)	5,97E-05
Ácidas (kg)	2,86E-10
Compostos de enxofre (kg)	7,58E-10
Compostos de nitrogênio (kg)	7,58E-09
Radioatividade para a água (kBq)	2,53E-02
Fe (kg)	4,92E-06
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,23E-05
Asbestos (kg)	3,63E-06
Br (kg)	1,06E-06
Organoclorados extraíveis (kg)	1,12E-07
Metais pesados não especificados (kg)	8,74E-09
Na (kg)	2,66E-05
Cl ⁻ (kg)	4,00E-05
Água residual (kg)	5,09E-06
Petróleo (kg)	1,89E-06
H ₂ (kg)	1,16E-06
íons metálicos (kg)	1,94E-07
Resíduos sólidos	
Resíduos processuais (kg)	1,80E-02
Resíduos no solo (kg)	2,25E-02
Asbestos (kg)	2,19E-05
Resíduos não inertes (kg)	6,84E+00
Resíduos não especificados (kg)	5,67E-10
Resíduos sólidos oleosos (kg)	5,68E-02
Resíduos minerais (kg)	5,41E-05

continua

	conclusão
Escória (kg)	7,71E-08

5.1.3.2.4 Inventário do transporte das matérias-primas e do catalisador

O transporte do óleo de dendê para a usina de produção do biodiesel é realizado, segundo o Grupo Agropalma, por meio fluvial.

Admitiu-se que 75% da quantidade do óleo vêm do porto de Acará (PA) e 25% do porto de Moju (PA), conforme dados de SAGRI (2005). As distâncias fluviais desses dois portos até Belém (PA), onde fica a usina, são de 95 km e 80 km, respectivamente, segundo Souza (2005).

No entanto, para que o óleo chegue aos portos, vindos da indústria de extração, é necessário ainda o transporte rodoviário. As distâncias percorridas até o porto de Acará e Moju, segundo informações obtidas junto ao Grupo Agropalma, são respectivamente, 22 km e 32 km.

Para a obtenção dos aspectos ambientais relacionados a essas atividades foram utilizadas duas bases de dados do software Simapro (PRÉ-CONSULTANTS, 2003a; PRÉ-CONSULTANTS, 2003c): *ETH - Archive 1994* para o transporte rodoviário e *BARGE 1 – Idemat 1996* para o transporte fluvial; considerando-se o retorno da balsa e do caminhão vazios até a origem.

Os resultados obtidos, considerando-se 30 kg de óleo de dendê transportado (quantidade necessária para atender o fluxo de referência), estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Inventário do transporte de 30 kg de óleo de dendê

Entradas	
Diesel (kg)	4,52E-02
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
SO ₂ (kg)	2,33E-04
CO ₂ (kg)	1,44E-01
CO (kg)	7,29E-04
NO _x (kg)	2,91E-03
C _x H _y (kg)	1,09E-04
Material particulado (kg)	3,78E-05
N ₂ O (kg)	2,11E-06
CH ₄ (kg)	5,59E-05
COVNM	3,11E-04
Fonte: PRÉ – CONSULTANTS (2003c)	

Para o transporte rodoviário da soda e do etanol até a usina de produção do biodiesel, admitiu-se a utilização de caminhões de 28 t e as distâncias percorridas consideradas foram de 390 km para o etanol e de 2173 km para a soda cáustica, segundo dados da SETRAN (2005) e DNIT (2005), respectivamente.

Esses dados também foram modelados no software Simapro (PRÉ-CONSULTANTS, 2003), na base de dados *ETH - Archive 1994*, considerando-se o retorno do caminhão vazio até a origem. Os resultados obtidos, considerando-se 15 kg de etanol e 0,3 kg de soda cáustica transportados (quantidades necessárias para atender ao fluxo de referência), estão apresentados nas Tabelas 41 e 42, respectivamente.

Tabela 41: Inventário do transporte de 15 kg de etanol anidro.

Entradas	
Diesel (kg)	2,40E-01
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	7,78E-01
CO (g)	4,80E+00
SO ₂ (g)	6,44E-01
NO _x (g)	1,58E+01
N ₂ O (mg)	1,99E+01
Material Particulado (mg)	3,04E+02
COVNM (g)	2,93E+00
CH ₄ (g)	5,27E-01
Fonte: PRÉ – CONSULTANTS (2003a)	

Tabela 42: Inventário do transporte de 0,3 kg de soda cáustica.

Entradas	
Diesel (kg)	2,67E-02
Saídas	
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	8,67E-02
CO (g)	5,35E-01
SO ₂ (g)	7,17E-02
NO _x (g)	1,76E+00
N ₂ O (mg)	2,22E+00
Material Particulado (mg)	3,39E+01
COVNM (g)	3,26E-01
CH ₄ (g)	5,87E-02
Fonte: PRÉ – CONSULTANTS (2003a)	

No entanto, para que os inventários de transporte estejam completos, fez-se necessário adicionar os aspectos ambientais relacionados às quantidades de petrodiesel utilizado. As Tabelas 43, 44 e 45 apresentam os inventários completos para os transportes de 30 kg de óleo de dendê, 15 kg de etanol e 0,3 kg de soda cáustica, respectivamente.

Tabela 43: Inventário consolidado do transporte de 30 kg de óleo de dendê

Entrada	
Energia (MJ)	1,15E-02
Reservas Bióticas (kg)	2,62E-05
Carvão (kg)	7,08E-05
Gás natural (kg)	2,10E-03
Petróleo (kg)	1,30E+00
Água (kg)	6,34E-01
Materiais secundários (kg)	4,83E-06
Urânio (kg)	1,51E-09
Combustíveis renováveis (kg)	1,54E-05
Saídas	
Energia (MJ)	4,42E-05
Emissões Atmosféricas	
SO ₂ (kg)	2,90E-04
CO ₂ (kg)	1,56E-01
CO (kg)	7,57E-04
NO _x (kg)	2,98E-03
Hidrocarbonetos (kg)	1,18E-04
Material particulado (kg)	4,48E-05
N ₂ O (kg)	2,18E-06
COVNM (kg)	3,56E-04
CH ₄ (kg)	1,81E-04
SO _x (kg)	3,34E-07
Metil carptano (kg)	4,76E-10
H ₂ S (kg)	9,96E-09
NH ₃ (kg)	1,91E-09
Vapor de água (kg)	1,24E-03
Metais (kg)	1,13E-08
Radioatividade para o ar (kBq)	5,24E-05
Aldeídos (kg)	3,82E-09
Efluentes líquidos	
Metais pesados não especificados (kg)	2,21E-10
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,53E-09
Água residual (kg)	1,49E-07
Óleo não especificado (kg)	7,38E-07
Ácidas (kg)	9,08E-13
continua	

	conclusão
DBO (kg)	1,59E-06
DQO (kg)	9,81E-06
Na (kg)	7,76E-07
Cl - (kg)	1,17E-06
Hidrocarbonetos (kg)	1,15E-07
Metais (kg)	5,36E-11
Compostos de nitrogênio (kg)	2,42E-11
Óleos e graxas (kg)	7,53E-10
Compostos de enxofre (kg)	2,42E-12
Sólidos dissolvidos totais (kg)	1,21E-06
Sólidos suspensos totais (kg)	5,06E-06
Radioatividade para a água (kBq)	8,04E-05
Petróleo (kg)	5,53E-08
H ₂ (kg)	3,40E-08
Íons metálicos (kg)	5,67E-09
Resíduos sólidos	
Resíduos do solo (kg)	7,14E-05
Resíduos processuais (kg)	5,75E-05
Resíduos não especificados (kg)	1,66E-11
Resíduos sólidos oleosos (kg)	1,57E-05
Resíduos minerais (kg)	1,58E-06
Resíduos não inertes (kg)	1,49E-07
Escória (kg)	2,26E-09

Tabela 44: Inventário consolidado do transporte de 15 kg de etanol anidro

Entradas	
Energia (MJ)	6,13E-02
Reservas Bióticas (kg)	1,39E-04
Carvão (kg)	3,76E-04
Gás natural (kg)	1,12E-02
Petróleo (kg)	6,89E+00
Água (kg)	3,37E+00
Materiais secundários (kg)	2,57E-05
Urânio (kg)	8,00E-09
Combustíveis renováveis (kg)	8,19E-05
Saídas	
Energia (MJ)	2,35E-04
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	8,42E-01
CO (kg)	4,95E-03
SO ₂ (kg)	9,47E-04
NO _x (kg)	1,62E-02
N ₂ O (kg)	2,02E-05
Material Particulado (kg)	3,41E-04
COVNM (kg)	3,17E-03
CH ₄ (kg)	1,19E-03

continua

	conclusão
SO _x (kg)	1,78E-06
Metil carptano (kg)	2,53E-09
H ₂ S (kg)	5,29E-08
NH ₃ (kg)	1,02E-08
Vapor de água (kg)	6,59E-03
Hidrocarbonetos (kg)	4,61E-05
Metais (kg)	6,02E-08
Radioatividade para o ar (kBq)	2,78E-04
Aldeídos (kg)	2,03E-08
Efluentes líquidos	
Metais pesados não especificados (kg)	1,17E-09
Efluentes líquidos não especificados (kg)	8,15E-09
Água residual (kg)	7,90E-07
Óleo não especificado (kg)	3,92E-06
Ácidas (kg)	4,82E-12
DBO (kg)	8,46E-06
DQO (kg)	5,21E-05
Na (kg)	4,12E-06
Cl - (kg)	6,21E-06
Hidrocarbonetos (kg)	6,12E-07
Metais (kg)	2,85E-10
Compostos de nitrogênio (kg)	1,28E-10
Óleos e graxas (kg)	4,00E-09
Compostos de enxofre (kg)	1,28E-11
Sólidos dissolvidos totais (kg)	6,45E-06
Sólidos suspensos totais (kg)	2,69E-05
Radioatividade para a água (kBq)	4,27E-04
Petróleo (kg)	2,94E-07
H ₂ (kg)	1,81E-07
Íons metálicos (kg)	3,01E-08
Resíduos sólidos	
Resíduos do solo (kg)	3,79E-04
Resíduos processuais (kg)	3,05E-04
Resíduos não especificados (kg)	8,79E-11
Resíduos sólidos oleosos (kg)	8,32E-05
Resíduos minerais (kg)	8,41E-06
Resíduos não inertes (kg)	7,94E-07
Escória (kg)	1,20E-08

Tabela 45: Inventário consolidado do transporte de 0,3 kg de soda cáustica

Entrada	
Energia (MJ)	6,82E-03
Reservas Bióticas (kg)	1,55E-05
Carvão (kg)	4,19E-05
Gás natural (kg)	1,24E-03
Petróleo (kg)	7,67E-01
Água (kg)	3,75E-01
Materiais secundários (kg)	2,85E-06
Urânio (kg)	8,90E-10
Combustíveis renováveis (kg)	9,12E-06
Saídas	
Energia (MJ)	2,61E-05
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	9,38E-02
CO (kg)	5,51E-04
SO ₂ (kg)	1,05E-04
NO _x (kg)	1,80E-03
N ₂ O (kg)	2,25E-06
Material Particulado (kg)	3,80E-05
COVNM (kg)	3,53E-04
CH ₄ (kg)	1,33E-04
SO _x (kg)	1,98E-07
Metil carptano (kg)	2,81E-10
H ₂ S (kg)	5,89E-09
NH ₃ (kg)	1,13E-09
Vapor de água (kg)	7,33E-04
Hidrocarbonetos (kg)	5,13E-06
Metais (kg)	6,70E-09
Radioatividade para o ar (kBq)	3,10E-05
Aldeídos (kg)	2,26E-09
Efluentes líquidos	
Metais pesados não especificados (kg)	1,31E-10
Efluentes líquidos não especificados (kg)	9,07E-10
Água residual (kg)	8,78E-08
Óleo não especificado (kg)	4,36E-07
Ácidas (kg)	5,37E-13
DBO (kg)	9,41E-07
DQO (kg)	5,80E-06
Na (kg)	4,59E-07
Cl ⁻ (kg)	6,90E-07
Hidrocarbonetos (kg)	6,80E-08
Metais (kg)	3,17E-11
continua	

	conclusão
Compostos de nitrogênio (kg)	1,43E-11
Óleos e graxas (kg)	4,45E-10
Compostos de enxofre (kg)	1,43E-12
Sólidos dissolvidos totais (kg)	7,17E-07
Sólidos suspensos totais (kg)	2,99E-06
Radioatividade para a água (kBq)	4,75E-05
Petróleo (kg)	3,27E-08
H ₂ (kg)	2,01E-08
Íons metálicos (kg)	3,35E-09
Resíduos sólidos	
Resíduos do solo (kg)	4,22E-05
Resíduos processuais (kg)	3,40E-05
Resíduos não especificados (kg)	9,78E-12
Resíduos sólidos oleosos (kg)	9,26E-06
Resíduos minerais (kg)	9,35E-07
Resíduos não inertes (kg)	8,83E-08
Escória (kg)	1,33E-09

5.1.3.2.5 Inventário da produção do biodiesel

Como ainda não existe produção industrial de biodiesel de dendê, via rota etílica, os inventários para o subsistema produção de biodiesel foram elaborados partindo-se de informações de Del Vecchio (2006a), Del Vecchio (2006b), Marques (2005) e Silva (1997) e, baseados em estudos de Reinhardt (1999), Sheehan et al (1998) e Vianna; Silva; Zanchetta (2006).

Todas as entradas de matéria e energia foram obtidas de Del Vecchio (2006a) e referem-se à tecnologia de produção de biodiesel da Dedini Indústrias de Base; tal tecnologia é a utilizada pelo Grupo Agropalma, Barralcool, Grupo Bertini e Granol.

Vale ressaltar que foi considerado para a desidratação do etanol, o processo por adsorção em peneira molecular como parte da tecnologia para produção do biodiesel.

As emissões atmosféricas foram obtidas de Reinhardt (1999) e Vianna; Silva; Zanchetta (2006) e, os efluentes líquidos e resíduos sólidos, de Silva (1997), Vianna; Silva; Zanchetta (2006) e Sheehan et al (1998). Todos os dados para serem utilizados nesse estudo foram revisados de acordo com informações adquiridas junto a Marques (2005).

A Tabela 46 apresenta os dados referentes às três etapas que incluem o subsistema produção do biodiesel: tratamento do óleo, transesterificação e recuperação do etanol para a produção de 30,03 litros de biodiesel, quantidade essa, correspondente, ao fluxo de referência calculado durante a elaboração do escopo da ACV.

Tabela 46: Inventário do processo de produção de 30,03 L de biodiesel de dendê

Entradas	
Água (kg)	2,65E+02
Vapor (Kg)	1,05E+01
Energia elétrica (MJ)	2,06E+00
Saídas	
Emissões atmosféricas	
Hidrocarbonetos (kg)	7,50E-02
CO ₂ (kg)	3,78E+00
NO _x (kg)	5,05E-03
SO ₂ (kg)	8,01E-03
Efluentes líquidos	
Resíduos não saponificáveis (kg)	4,07E+03
Sabão (kg)	2,10E-00
Glicerídios (kg)	2,66E-03
Resíduos sólidos	
Matéria-graxa (kg)	3,08E+00

Para concluir o inventário desse subsistema, é necessário ainda acrescentar os dados do inventário de Coltro; Garcia e Queiroz (2003) correspondentes a 2,54 MJ de energia elétrica, necessária para a produção de 30,03 litros de biodiesel de dendê.

A Tabela 47 apresenta os dados consolidados do inventário do subsistema produção de biodiesel para 30,03 litros de combustível.

Tabela 47: Inventário do subsistema produção do biodiesel para 30,03 litros do combustível

Entradas	
Água (kg)	1,47E+03
Vapor (Kg)	1,56E+01
Energia (MJ)	3,24E+00
Carvão (kg)	2,65E-02
Materiais secundários (kg)	1,85E-03
Gás natural (kg)	1,57E-03

continua

	conclusão
Petróleo (kg)	2,49E-03
Reservas bióticas (kg)	1,00E-02
Urânio (kg)	3,71E-07
Saídas	
Emissões atmosféricas	
Hidrocarbonetos (kg)	7,50E-02
CO ₂ (kg)	3,82E+00
NO _x (kg)	6,51E-03
SO ₂ (kg)	8,30E-03
CO (kg)	3,79E-04
Material particulado (kg)	1,71E-04
NH ₃ (kg)	1,52E-11
Metais (kg)	2,54E-11
N ₂ O (kg)	2,79E-05
Vapor de água (kg)	5,85E-01
Metano (kg)	1,39E-04
COVNM (kg)	1,85E-05
Radioatividade para o ar (kBq)	2,48E-05
Efluentes líquidos	
Resíduos não saponificáveis (kg)	4,07E+03
Sabão (kg)	2,10E-03
Glicerídios (kg)	2,66E-03
DBO (kg)	1,78E-07
DQO (kg)	4,57E-07
Hidrocarbonetos (kg)	7,62E-08
Íons metálicos (kg)	2,54E-08
Óleos e graxas (kg)	3,56E-07
Sólidos suspensos totais (kg)	2,54E-07
Sólidos dissolvidos totais (kg)	1,27E-07
Ácidas (kg)	4,32E-10
Cl ⁻ (kg)	7,49E-09
Compostos de enxofre (kg)	1,14E-09
Compostos de nitrogênio (kg)	1,14E-08
Metais pesados não especificados (kg)	4,57E-10
Radioatividade para a água (kBq)	3,83E-05
Resíduos sólidos	
Matéria graxa (kg)	3,08E+00
Resíduos processuais (kg)	2,72E-02
Resíduos no solo (kg)	3,40E-02

5.1.3.2.6 Consolidação

Concluída a elaboração dos inventários do óleo de dendê, do etanol, da soda cáustica, do transporte das matérias-primas e catalisador e, da produção do biodiesel, tornou-se possível consolidar os dados obtidos para se determinar o inventário do biodiesel de dendê via rota etílica.

Os inventários desses subsistemas foram todos elaborados, considerando a produção de 30,03 litros de biodiesel que, é o valor determinado durante a fase de escopo da ACV, para o fluxo de referência. Sendo assim, a consolidação do inventário do biodiesel de dendê dá-se pela união das Tabelas 37, 38, 40, 44, 45, 46 e 48.

Cabe ressaltar, porém, o cálculo realizado para o balanço do CO₂.

Conforme calculado durante a elaboração dos inventários dos subsistemas óleo de dendê e etanol, têm-se que 32 kg de CO₂ ainda são absorvidos pelo dendezeiro e, 25,7 kg que ainda são seqüestrados pelo canavial.

Somando-se as quantidades de CO₂ emitidas em todos os subsistemas que compõem o sistema de produto do biodiesel, tem-se no total, 10,7 kg.

Tem-se, portanto, como resultado do balanço, 47 kg de CO₂, que ainda são absorvidos.

A Tabela 48 apresenta o cálculo deste balanço.

Tabela 48: Balanço de CO₂

	Óleo de dendê	Etanol	Soda cáustica	Transporte do óleo de dendê	Transporte do etanol	Transporte da soda cáustica	Produção do biodiesel	Total
CO ₂ absorvido (kg)	-3,20E+01	-2,57E+01	-	-	-	-	-	-5,77E+01
CO ₂ emitido (kg)	-	-	5,80E+00	1,56E-01	8,42E-01	9,38E-02	3,82E+00	1,07E+01
Balanço: CO₂ absorvido (kg) + CO₂ emitido (kg) =								-4,70E+01

Como o biodiesel não é o único produto obtido no processo, pois apresenta a glicerina como co-produto, fez-se necessário alocar os aspectos ambientais entre eles, para se obter os dados equivalentes apenas ao biodiesel. Decidiu-se, portanto utilizar como critério, a alocação por massa.

Os fatores de alocação foram calculados baseados nas quantidades produzidas de cada um. Para 26,4 kg de biodiesel, segundo Silva (1997), são produzidos 3 kg de glicerina e, portanto, os fatores determinados foram 90% e 10% para o biodiesel e glicerina, respectivamente.

A Tabela 49 apresenta o inventário de 30,03 litros de biodiesel de dendê via rota etílica.

Tabela 49: Inventário de 30,03 litros de biodiesel de dendê via rota etílica

Entradas	
N (kg)	4,98E-01
P ₂ O ₅ (kg)	3,34E-01
KCl (kg)	3,49E+00
Mg (kg)	3,04E-01
Mn (kg)	3,77E-03
Zn (kg)	1,02E-02
B (kg)	2,42E-03
Glifosato (kg)	7,10E-02
Carbaryl (kg)	2,76E-02
Acefato (kg)	1,41E-05
<i>Pueraria javanica</i> (kg)	1,48E-03
Água (kg)	2,23E+06
Energia (MJ)	3,43E+00
Reservas Bióticas (kg)	1,67E-02
Carvão (kg)	4,41E-02
Gás natural (kg)	9,01E-02
Petróleo (kg)	5,41E+01
Materiais secundários (kg)	3,08E-03
Urânio (kg)	6,40E-07
Combustíveis renováveis (kg)	6,26E-04
Ametrina (kg)	1,94E-03
CaCO ₃ (kg)	2,12E+00
Carbufuran (kg)	3,92E-02
Clorpirifos (kg)	1,24E-03
Comazona (kg)	8,28E-04
Diuron (kg)	2,07E-03
Fipronil (kg)	1,52E-05
Ciclo hexano (kg)	1,03E-02
Hexazinone (kg)	8,28E-04
Isoflutoler (kg)	2,76E-04
K ₂ O (kg)	5,09E-01
Metribuzin (kg)	9,63E-04
Polímero de decantação (kg)	2,07E-05
Quartenário de amônia (kg)	2,07E-05
Sulfentrazone (kg)	1,08E-04
Tebuthiuron (kg)	5,53E-04

continua

	continuação
Sal-gema (kg)	2,52E-01
Vapor de água (kg)	9,45E+00
Saídas	
Energia (MJ)	1,25E+02
Emissões Atmosféricas	
CO ₂ (kg)	-4,23E+01
N ₂ O (kg)	1,58E-02
Acefato (kg)	7,06E-07
Glifosato (kg)	3,56E-03
Carbaryl (kg)	1,38E-03
CO (kg)	1,53E-01
SO ₂ (kg)	1,15E-02
NO _x (kg)	6,88E-02
Material Particulado (kg)	5,62E-02
COVNM (kg)	9,25E-03
Metano (kg)	5,00E-03
Vapor de água (kg)	1,27E+01
SO _x (kg)	2,43E-02
NO ₂ (kg)	9,27E-03
H ₂ S (kg)	4,17E-07
NH ₃ (kg)	7,97E-08
Hidrocarbonetos (kg)	6,85E-02
Metil carptano (kg)	1,99E-08
Metais (kg)	4,72E-07
Radioatividade para o ar (kBq)	1,54E-02
CO ₂ -eq (kg)	3,69E-03
Ametrina (kg)	9,72E-05
Carbufuran (kg)	1,96E-03
Clorpirifos (kg)	6,21E-05
Comazona (kg)	4,14E-05
Diuron (kg)	1,04E-04
Fipronil (kg)	7,61E-07
Hexazinone (kg)	4,14E-05
Isoflutoler (kg)	1,39E-05
Metribuzin (kg)	4,82E-05
Sulfentrazone (kg)	5,41E-06
Tebuthiuron (kg)	2,76E-05
CFC (kg)	2,13E-06
Cl ₂ (kg)	1,63E-07
H ₂ (kg)	1,26E-04
Tetraclorometano (kg)	7,53E-07
Aldeídos (kg)	1,59E-07
Efluentes líquidos	
N (kg)	4,98E-02
P ₂ O ₅ (kg)	3,34E-02
Glifosato (kg)	1,42E-02
Carbaryl (kg)	5,52E-03
Acefato (kg)	2,83E-06
DBO (kg)	5,04E-01
	continua

	continuação
DQO (kg)	7,62E-01
Sólidos suspensos totais (kg)	3,46E-01
Sólidos totais (kg)	1,42E+00
Sólidos sedimentados (kg)	3,09E-01
Compostos de nitrogênio (kg)	5,71E-02
Matéria graxa (kg)	1,38E-01
Água residual (kg)	6,20E-06
Metais pesados não especificados (kg)	4,49E-08
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,11E-05
Óleo não especificado (kg)	3,08E-05
Ácidas (kg)	5,83E-10
Na (kg)	3,24E-05
Cl ⁻ (kg)	4,88E-05
Hidrocarbonetos (kg)	4,96E-06
Compostos de enxofre (kg)	1,54E-09
Sólidos dissolvidos totais (kg)	6,71E-05
Óleos e graxas (kg)	4,80E-07
Radioatividade para a água (kBq)	2,37E-02
Quartenário de amônia (kg)	2,07E-05
Polímero de decantação (kg)	2,07E-05
Diuron (kg)	4,14E-04
Tebuthiuron (kg)	1,11E-04
Hexazinone (kg)	1,66E-04
Ametrina (kg)	3,87E-04
Metribuzin (kg)	1,93E-04
Comazona (kg)	1,66E-04
Sulfentrazone (kg)	2,16E-05
Fipronil (kg)	3,04E-06
Isoflutoler (kg)	5,53E-05
Carbufuran (kg)	7,85E-03
Clorpirifos (kg)	2,48E-04
Fe (kg)	4,42E-06
Asbestos (kg)	3,27E-06
Br (kg)	9,53E-07
Organoclorados extraíveis (kg)	1,01E-07
Resíduos não saponificáveis (kg)	3,66E+03
Sabão (kg)	1,89E-03
Glicerídios (kg)	2,39E-03
Petróleo (kg)	6,04E-07
H ₂ (kg)	3,71E-07
Íons metálicos (kg)	6,20E-08
Resíduos sólidos e emissões para o solo	
Glifosato (kg)	5,33E-02
Carbaryl (kg)	2,07E-02
Acefato (kg)	1,06E-05
Matéria graxa (kg)	2,77E+00
Resíduos no solo (kg)	4,53E-02
Resíduos processuais (kg)	3,66E-02
Resíduos não especificados (kg)	6,91E-10
Resíduos sólidos oleosos (kg)	5,13E-02

continua

	conclusão
Etanol (kg)	1,35E-02
Escória (kg)	1,79E-04
Ametrina (kg)	1,45E-03
Carbufuran (kg)	2,94E-02
Clorpirifos (kg)	9,36E-04
Comazona (kg)	6,21E-04
Diuron (kg)	1,56E-03
Fipronil (kg)	1,14E-05
Hexazinone (kg)	6,21E-04
Isoflutoler (kg)	2,07E-04
Metribuzin (kg)	7,23E-04
Sulfentrazone (kg)	8,12E-05
Tebuthiuron (kg)	4,15E-04
Asbestos (kg)	1,97E-05
Resíduos não inertes (kg)	6,17E+00
Resíduos minerais (kg)	6,60E-05

5.1.4 Determinação de aspectos, impactos e parâmetros

Para dar continuidade à análise de ecoeficiência da BASF, fez-se necessário, conforme mencionado durante revisão bibliográfica, dispor os dados do inventário do petrodiesel e do biodiesel em dez categorias: consumo de recursos energéticos, consumo de recursos materiais, resíduos sólidos, efluentes líquidos, formação fotoquímica de ozônio, efeito estufa, chuva ácida, destruição da camada de ozônio, uso da terra e potencial de toxicidade.

A seguir são demonstrados os cálculos necessários para a determinação de tais categorias, o chamado perfil ambiental.

5.1.4.1 Petrodiesel

- Consumo de recursos energéticos

A análise de inventário já apresenta o valor consolidado para essa categoria que é de 5,68 MJ, conforme pode ser observado na Tabela 30.

- Consumo de recursos materiais

As matérias-primas não-renováveis utilizadas são: petróleo, carvão, gás natural e urânio e, seus respectivos fatores são: 0,35; 0,11; 0,35; 108,40, cujos cálculos para obtenção encontram-se no item 4.1.2.1.2.

O valor desta categoria corresponde, portanto, ao somatório dos produtos da quantidade de cada uma dessas substâncias (determinadas durante análise do inventário) pelo fator correspondente, conforme pode ser observado na Tabela 50.

Tabela 50: Determinação da categoria recursos materiais para o petrodiesel

Recursos materiais	Quantidades (kg)	Fatores [1/(a*10 ⁶ t) ^{0,5}]	Produtos [kg/(a*10 ⁶ t) ^{0,5}]
Petróleo	6,39E+02	0,35	2,26E+02
Carvão	3,49E-02	0,11	3,93E-03
Gás natural	1,03E+00	0,35	3,64E-01
Urânio	1,65E-05	108,40	1,79E-03
Total [kg/(a*10⁶t)^{0,5}]			2,26E+02

- Resíduos sólidos

Conforme, visto durante a revisão bibliográfica, cada um dos resíduos sólidos identificados duante a análise de inventário devem ser classificados como resíduo de construção civil, resíduo de mineração, resíduo municipal ou resíduo industrial para que, de acordo com essa classificação, receba um peso.

A metodologia de análise de ecoeficiência da BASF recomenda que resíduos de indústrias petroquímicas sejam considerados como resíduos industriais, recebendo, portanto, conforme mencionado durante revisão bibliográfica, peso 5. O valor desta categoria corresponde, portanto, à multiplicação deste peso pela quantidade total de resíduos sólidos identificados durante a análise de inventário.

A Tabela 51 apresenta os resíduos sólidos identificados e quantificados durante a análise do inventário do petrodiesel.

Tabela 51: Resíduos sólidos identificados e quantificados no inventário do petrodiesel

Resíduos sólidos	(kg)
Escória	1,11E-06
Resíduos inertes	7,36E-05
Resíduos minerais	7,79E-04
Resíduos não especificados	8,15E-09
Resíduos no solo	3,52E-02
Resíduos processuais	2,83E-02
Resíduos sólidos oleosos	7,71E-03
Total	7,21E-02

Esta categoria vale, portanto, o produto de 7,21E-02 por 5 que corresponde a 0,36 kg.

- Efluentes líquidos

Conforme citado anteriormente, para o cálculo dessa categoria é necessário estimar as quantidades de água necessárias para diluir cada uma das substâncias encontradas no efluente, de forma que estas estejam de acordo com o limite estabelecido pelo *Regulation on requirements for the discharge of wastewater into surface waters*.

Durante a análise do inventário, foram identificados e quantificados 17 aspectos ambientais relacionados a efluentes líquidos. A metodologia de ecoeficiência da BASF propõe, no entanto, que os mesmos sejam limitados em dez aspectos: DQO, DBO, N-total, NH_4^+ , P-total, (AOX), metais pesados, HC, SO_4^{2-} e Cl^- e, que os demais, devam ser expressos na forma de um dos anteriores, de acordo com os fatores de conversão apresentados na Tabela 52.

Tabela 52: Fatores para expressar aspectos ambientais em termos de N-total, HC, Cl^- e HM

Poluentes	N-total	HC	Cl^-	HM
NO_3^-	0,23	-	-	-
CN^-	0,54	-	-	-
NO_2^-	0,30	-	-	-
organoclorados não especificados	-	1	1	-
óleos e detergentes	-	1	-	-
fenóis	-	1	-	-
dicloroetano	-	1	-	-

continua

	conclusão			
benzeno	-	1	-	-
tolueno	-	1	-	-
xilenos	-	1	-	-
etilbenzeno	-	1	-	-
diclorometano	-	1	-	-
hexaclorobenzeno	-	1	-	-
hexaclorobutadieno	-	1	-	-
hexaclorociclohexano	-	1	-	-
aromáticos policíclicos	-	1	-	-
Cl-	-	-	1	-
Cu	-	-	-	1
Hg	-	-	-	1
Pb	-	-	-	1
Ni	-	-	-	1
Zn	-	-	-	1
Cd	-	-	-	1
Cr	-	-	-	1
metais não especificados	-	-	-	1
As	-	-	-	1
Mn	-	-	-	1
Sn	-	-	-	1
Ag	-	-	-	1
Au	-	-	-	1
Sb	-	-	-	1
Bi	-	-	-	1
Co	-	-	-	1
V	-	-	-	1

Fonte: Kicherer, et al. (2001)

Alguns aspectos ambientais identificados e quantificados durante a análise do inventário, entretanto, foram desconsiderados, pois não são estudados pela metodologia de ecoeficiência.

A Tabela 53 apresenta os aspectos ambientais relacionados aos efluentes líquidos expressos em formato adequado à ferramenta de análise de ecoeficiência da BASF.

Tabela 53: Efluentes líquidos para aplicação da análise de ecoeficiência da BASF

Poluentes	Quantidades (mg)
DQO	4,81E+03
DBO	7,81E+02
N-tot	2,70E-03
Metais pesados	2,68E+00
HC	4,45E+02
SO ₄ ⁻²	1,19E-03
Cl ⁻	5,75E+02

Dividindo a quantidade de cada um dos poluentes da Tabela 53 pelo respectivo limite crítico apresentado na Tabela 2, foi possível calcular as necessidades de água para diluição dos mesmos, cujo somatório corresponde ao valor da categoria efluentes líquidos, conforme pode ser observado na Tabela 54.

Tabela 54: Determinação da categoria efluentes líquidos para o petrodiesel

Poluentes	Necessidades de água (L)
DQO	6,42E+01
DBO	5,20E+01
N-tot	2,08E-04
Metais pesados	2,68E+00
HC	2,23E+02
SO ₄ ⁻	1,19E-06
Cl ⁻	5,75E-01
Total	3,42E+02

- Formação fotoquímica de ozônio, Efeito estufa, Chuva ácida, Destruição da camada de ozônio

Durante a análise do inventário, foram identificados e quantificados 18 aspectos ambientais relacionados a emissões atmosféricas. No entanto, a metodologia de ecoeficiência da BASF propõe que os mesmos sejam limitados em nove aspectos: CO₂, SO_x, NO_x, CH₄, COVNM (compostos orgânicos voláteis não metano), CFCs (clorofluorcarbonetos), NH₃, N₂O, HCl e que os demais, devam ser expressos na forma de um dos anteriores, de acordo com os fatores de conversão apresentados na Tabela 55.

Tabela 55: Fatores para expressar aspectos ambientais em termos de CO₂, SO_x, NO_x, COVNM, CFCs,

HCl						
	CO ₂	SO _x	NO _x	COVNM	CFCs	HCl
SF ₆	1	-	-	-	-	-
SO ₂	-	1	-	-	-	-
H ₂ S	-	1,88	-	-	-	-
H ₂ SO ₄	-	0,65	-	-	-	-
NO ₂	-	-	1	-	-	-
Hidrocarbonetos não especificados	-	-	-	1	-	-
Aldeídos não especificados	-	-	-	1	-	-
C ₂ H ₄ Cl ₂	-	-	-	1	-	-
CH ₂ Cl ₂	-	-	-	1	-	-
C ₂ Cl ₄	-	-	-	1	-	-
CCl ₄	-	-	-	1	-	-
C ₆ H ₃ Cl ₃	-	-	-	1	-	-
C ₂ H ₃ Cl ₃	-	-	-	1	-	-
C ₂ HCl ₃	-	-	-	1	-	-
CHCl ₃	-	-	-	1	-	-
CH ₃ Cl	-	-	-	1	-	-
CH ₂ Br	-	-	-	1	-	-
CH ₂ Br ₂	-	-	-	1	-	-
CHBrF ₂	-	-	-	1	-	-
CFC-11 CCl ₃ F	-	-	-	-	1	-
CFC-12 CCl ₂ F ₂	-	-	-	-	1	-
CFC-13 CClF ₃	-	-	-	-	1	-
CFC-113 CCl ₂ FCCl ₂ F ₂	-	-	-	-	1	-
CFC-114 CClF ₂ CClF ₂	-	-	-	-	1	-
CFC-115 CF ₃ CClF ₂	-	-	-	-	1	-
HCFC-21 CHCl ₂ F	-	-	-	-	1	-
HCFC-22 CHClF ₂	-	-	-	-	1	-
HCFC-123 CF ₃ CHCl ₂	-	-	-	-	1	-
HCFC-124 CF ₃ CHClF	-	-	-	-	1	-
HCFC-141 CH ₃ CCl ₂ F	-	-	-	-	1	-
HCFC-142 CH ₃ CClF ₂	-	-	-	-	1	-
HCFC-225 CF ₃ CF ₂ CHCl ₂	-	-	-	-	1	-
HCFC-225 CClF ₂ CF ₂ CHClF	-	-	-	-	1	-
Halon-1211 CBrClF ₂	-	-	-	-	1	-
Halon-1301 CBrF ₃	-	-	-	-	1	-
Organoclorados não especificados	-	-	-	-	1	-
CF ₃ I	-	-	-	-	1	-
C ₆ Cl ₆	-	-	-	-	1	-
C ₆ H ₆ Cl ₆	-	-	-	-	1	-
C ₆ HCl ₅ O	-	-	-	-	1	-
C ₂ Cl ₄	-	-	-	-	1	-
CCl ₄	-	-	-	-	1	-
C ₆ H ₃ Cl ₃	-	-	-	-	1	-

continua

						continuação
C2H3Cl3	-	-	-	-	1	-
C2HCl3	-	-	-	-	1	-
CHCl3	-	-	-	-	1	-
CH3Cl	-	-	-	-	1	-
CH2Br	-	-	-	-	1	-
CH2Br2	-	-	-	-	1	-
CHBrF2	-	-	-	-	1	-
HF	-	-	-	-	-	1,83

Fonte: Kicherer, et al. (2001)

Aspectos ambientais identificados e quantificados durante a análise do inventário, não incluídos na Tabela 55, não são avaliados pela metodologia de ecoeficiência.

A Tabela 56 apresenta os aspectos ambientais relacionados às emissões atmosféricas, expressos em formato adequado à ferramenta de análise de ecoeficiência da BASF.

Tabela 56: Emissões atmosféricas do petrodiesel para aplicação da análise de ecoeficiência da BASF

Poluentes	Quantidades (mg)
CO ₂	5,80E+06
SO _x	2,69E+04
NO _x	3,42E+04
CH ₄	6,29E+04
COVNM	2,66E+04
NH ₃	9,42E-01
N ₂ O	3,13E+01

Para a determinação das quatro categorias (FFO, EE, CA, DCO) foram usados os dados da Tabela 56 e os fatores da Tabela 3, de acordo com os cálculos:

$$\text{FFO: } \left(62.900 * \frac{0,007}{1000} \right) + \left(26.631 * \frac{0,416}{1000} \right) = 1,15E + 01 \text{ gC}_2\text{H}_4\text{-eq}$$

$$\text{EE: } \left(5.803.610 * \frac{1}{1000} \right) + \left(62.900 * \frac{21}{1000} \right) + \left(31 * \frac{310}{1000} \right) = 7,13E + 03 \text{ gCO}_2\text{-eq}$$

$$\text{CA: } \left(26.896 * \frac{1}{1000} \right) + \left(31.188 * \frac{0,7}{1000} \right) + \left(1 * \frac{1,88}{1000} \right) = 5,08E + 01 \text{ gSO}_2\text{-eq}$$

DCO: Inexistente, pois não há emissão de CFC.

- Uso da terra

Para 1 tonelada de petrodiesel são ocupadas, durante seu ciclo de vida, segundo o estudo elaborado por Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt et al (1996), aproximadamente, 77,73 m²ano de área III, 10,30 m²ano de área IV e 0,43 m²ano de área V o que ocasionou, portanto, transformação de, aproximadamente, 88,46 m²ano de área II.

Vale ressaltar que, conforme mencionado durante a revisão bibliográfica, a área transformada recebe o sinal negativo e a área ocupada sinal positivo.

Para atender ao fluxo de referência determinado no escopo da ACV são necessários 22,25 kg de petrodiesel. Os dados de Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt et al (1996) foram então convertidos para atender ao fluxo de referência.

Considerando-se os pesos de cada área apresentados durante a revisão bibliográfica, foi possível calcular o valor desta categoria, que corresponde à média ponderada entre esses pesos e os valores de cada área (convertidos para o fluxo de referência).

A Tabela 57 apresenta o cálculo da categoria uso da terra para 22,25 kg de petrodiesel.

Tabela 57: Uso da terra para 22,25 kg de petrodiesel

Tipo de área	m²ano	Peso
Área II	-1,99E+00	1,5
Área III	1,75E+00	2,3
Área IV	2,32E-01	5,1
Área V	9,68E-03	7,6
Total da categoria:	2,29 m²ano	

- Potencial de toxicidade

A avaliação da toxicidade do ciclo de vida do petrodiesel já foi elaborada pela equipe de análise de ecoeficiência da BASF, porém, as implicações tóxicas decorrentes de seu uso não foram consideradas, pois esta etapa está fora dos limites do escopo.

Segundo os especialistas de ecoeficiência da BASF, o petrodiesel apresenta no total 1443 pontos por quilo de combustível, sendo, 550, destes provenientes do seu uso, visto que o mesmo se enquadra nas frases R 11, R23/25. Dessa forma, para este estudo considerou-se apenas 893 pontos por quilo.

Como para atender a unidade funcional faz-se necessário 22,25 kg de combustível, tem-se, portanto, para esta categoria, um total de 19.874 pontos.

- Resumo

A Tabela 58 apresenta os valores de todas as categorias calculadas para o petrodiesel.

Tabela 58: Categorias de ecoeficiência para o petrodiesel

Categorias de ecoeficiência	Valores por fluxo de referência
Consumo de recursos energéticos (MJ)	5,68E+00
Consumo de recursos materiais [$\text{kg}/(\text{a} \cdot 10^6 \text{t})^{0,5}$]	2,26E+02
Resíduos sólidos (kg)	3,59E-01
Efluentes líquidos (L)	3,42E+02
FFO ($\text{gC}_2\text{H}_4\text{-eq}$)	1,15E+01
EE ($\text{gCO}_2\text{-eq}$)	7,13E+03
CA ($\text{gSO}_2\text{-eq}$)	5,08E+01
DCO (gCFCs-eq)	-
Uso da terra (m^2ano)	2,29E+00
Potencial de toxicidade (pontos)	1,99E+04

5.1.4.2 Biodiesel

- Consumo de recursos energéticos

A análise de inventário já apresenta o valor consolidado para essa categoria que é de 3,43E+00 MJ, conforme pode ser observado na Tabela 49.

- Consumo de recursos materiais

As matérias primas utilizadas são: petróleo, carvão, gás natural, urânio, sal-gema, magnésio, manganês, zinco e boro e, seus respectivos fatores são: 0,35; 0,11; 0,35; 108,40; 0,01; 0,01; 4,20; 14,81; 12,13, cujos cálculos para obtenção encontram-se no item 4.1.2.1.2.

As entradas de fertilizantes, defensivos e calcário não foram levadas em consideração, pois dessa forma, estar-se-ia considerando o impacto ambiental causado pela produção dos mesmos, fato que não corresponde ao determinado no escopo.

O valor desta categoria corresponde, portanto, ao somatório dos produtos da quantidade de cada uma das substâncias que a compõem (determinadas durante análise do inventário) pelo fator correspondente, conforme pode ser observado na Tabela 59.

Tabela 59: Determinação da categoria recursos materiais para o biodiesel

Recursos materiais	Quantidades (kg)	Fatores $[1/(a \cdot 10^6 t)^{0,5}]$	Produtos $[kg/(a \cdot 10^6 t)^{0,5}]$
Petróleo	5,41E+01	0,35	1,89E+01
Carvão	4,41E-02	0,11	4,85E-03
Gás natural	9,01E-02	0,35	3,15E-02
Urânio	6,40E-07	108	6,91E-05
Sal-gema	2,52E-01	0,01	2,52E-03
Mg	3,04E-01	0,01	3,04E-03
Mn	3,77E-03	4,20	1,58E-02
Zn	1,02E-02	14,81	1,51E-01
B	2,42E-03	12,13	2,94E-02
Total $[kg/(a \cdot 10^6 t)^{0,5}]$			1,92E+01

- Resíduos sólidos

Todos os resíduos provenientes do ciclo de vida do biodiesel foram classificados como resíduos industriais, recebendo, portanto, conforme mencionado durante revisão bibliográfica, peso 5. O valor desta categoria corresponde, portanto, à multiplicação deste peso pela quantidade total de resíduos sólidos identificados durante a análise de inventário.

Vale ressaltar que os resíduos de defensivos não foram considerados, pois, na realidade, são emissões que em longo prazo têm como impacto a contaminação do solo, fato não contemplado pela metodologia de ecoeficiência.

A Tabela 60 apresenta os resíduos sólidos identificados e quantificados durante a análise do inventário do biodiesel.

Tabela 60: Resíduos sólidos identificados e quantificados no inventário do biodiesel

Resíduos sólidos	(kg)
Matéria graxa	2,77E+00
Resíduos no solo	4,53E-02
Resíduos processuais	3,66E-02
Resíduos não especificados	6,91E-10
Resíduos sólidos oleosos	5,13E-02
Escória	1,79E-04
Asbestos	1,97E-05
Resíduos não inertes	6,17E+00
Resíduos minerais	6,60E-05
Total	9,07E+00

Esta categoria vale, portanto, o produto de 9,07E+00 por 5 que corresponde a 45,4 kg.

- Efluentes líquidos

Os aspectos ambientais do ciclo de vida do biodiesel, relativos aos efluentes líquidos, foram expressos em formato adequado à ferramenta de análise de ecoeficiência, tal como foi realizado para o petrodiesel.

Para esta categoria, vale ressaltar que, os defensivos levados em consideração foram o glifosato e o clorpirifos por serem compostos organoclorados. Os demais foram descartados, pois não são avaliados pela metodologia.

A Tabela 61 apresenta, portanto, os aspectos ambientais relacionados aos efluentes líquidos expressos em formato adequado à ferramenta de análise de ecoeficiência da BASF.

Tabela 61: Efluentes líquidos para aplicação da análise de ecoeficiência da BASF

Poluentes	Quantidades (mg)
DQO	7,60E+05
DBO	5,04E+05
N-tot	6,51E+04
NH ₄ -N	1,60E+01
P-tot	1,27E+04
Metais pesados	2,78E-01
HC	1,44E+05
SO ₄ ²⁻	1,53E-03
Cl ⁻	4,86E+01

Dividindo a quantidade de cada um dos poluentes da Tabela 61 pelo respectivo limite crítico apresentado na Tabela 2, foi possível calcular as necessidades de água para diluição dos mesmos, cujo somatório corresponde ao valor da categoria efluentes líquidos, conforme pode ser observado na Tabela 62.

Tabela 62: Determinação da categoria efluentes líquidos para o biodiesel

Poluentes	Necessidades de água (L)
DQO	1,01E+04
DBO	3,36E+04
N-tot	5,01E+03
NH ₄ -N	1,60E+00
P-tot	1,27E+04
Metais pesados	2,78E-01
HC	7,20E+04
SO ₄ ²⁻	1,53E-06
Cl ⁻	4,86E-02
Total	1,33E+05

- Formação fotoquímica de ozônio, Efeito estufa, Chuva ácida, Destruição da camada de ozônio

Os aspectos ambientais do ciclo de vida do biodiesel, relativos às emissões atmosféricas, também devem ser expressos em formato adequado à ferramenta de análise de ecoeficiência, tal como efetuado para o petrodiesel.

A Tabela 63 apresenta os aspectos ambientais já em formato adequado à análise de ecoeficiência da BASF.

Tabela 63: Emissões atmosféricas do biodiesel para aplicação da análise de ecoeficiência da BASF

Poluentes	Quantidades (mg)
CO ₂	-4,22E+07
SO _x	3,58E+04
NO _x	8,02E+04
CH ₄	6,44E+03
NM-VOC	7,60E+05
CFCs	3,62E+03
NH ₃	7,89E-02
N ₂ O	1,57E+04

Assim como feito para o petrodiesel, para a determinação das quatro categorias (FFO, EE, CA, DCO) foram usados os dados da Tabela 63 e os fatores da Tabela 3, de acordo com os cálculos:

$$\text{FFO:} \left(6.441 * \frac{0,007}{1000} \right) + \left(760.012 * \frac{0,416}{1000} \right) = 3,16E + 02 \text{ gC}_2\text{H}_4\text{-eq}$$

$$\text{EE:} \left(-42.202.032 * \frac{1}{1000} \right) + \left(6.441 * \frac{21}{1000} \right) + \left(3.622 * \frac{4000}{1000} \right) + \left(15.738 * \frac{310}{1000} \right) = -2,27E + 04 \text{ gCO}_2\text{-eq}$$

$$\text{CA:} \left(35.829 * \frac{1}{1000} \right) + \left(80.244 * \frac{0,70}{1000} \right) + \left(0,079 * \frac{1,88}{1000} \right) = 9,20E + 01 \text{ gSO}_2\text{-eq}$$

$$\text{DCO:} \left(3.622 * \frac{1}{1000} \right) = 3,62E + 00 \text{ gCFCs-eq}$$

- Uso da terra

Para 1 kg de soda cáustica são ocupadas, durante seu ciclo de vida, segundo o estudo elaborado por Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt et al (1996), cerca de 0,008 m²ano de área III, 0,002 m²ano de área IV e 0,003 m²ano de área V, ocasionando transformação de, aproximadamente, 0,013 m²ano de área II.

Em se tratando do etanol, têm-se para 1 kg de produto, 2,20 m²ano de área III, 0,06 m²ano de área IV e 0,01 m²ano de área V, acarretando, portanto, transformação de 2,27 m²ano de área II.

O estudo mencionado anteriormente, não compreende o óleo de dendê e, em decorrência, os dados tiveram que ser calculados.

Partindo-se de uma produtividade anual média de 3.000 kg/ha, considerando-se que 1 ha corresponde a 10.000 m², tem-se que para 1 kg de óleo de dendê são necessários, aproximadamente, 3,33 m²ano, o que corresponde à área III.

Segundo o Grupo Agropalma, a área ocupada por suas quatro indústrias é de, aproximadamente, 20.676 m² e, a produção média anual do óleo é de, aproximadamente, 110.000 t. Sendo assim, tem-se 1,88E-4 m²ano de área IV para cada kg de óleo.

Quanto à área V, utilizou-se o valor de 0,015 m²ano por tkm para caminhões de 16 t, obtidos junto ao estudo elaborado por Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt et al (1996). Conforme informações levantadas junto ao grupo Agropalma, tem-se 0,129 tkm por kg de óleo de dendê, o que permite concluir que, a área V ocupada é de aproximadamente, 1,87E-03 m²ano por kg de óleo.

O somatório de todas as áreas ocupadas (III, IV e V), corresponde ao total de área II transformada, ou seja, aproximadamente 3,33 m²ano para cada kg de óleo de dendê produzido.

As áreas V ocupadas pelo transporte da soda e do etanol, também foram retiradas do estudo mencionado anteriormente. Tem-se 1,45E-02 m²ano para 1 tkm de transporte rodoviário ocasionando transformação das mesmas quantidades de área II.

Para completar as informações necessárias, fica faltando ainda a área ocupada pela usina de biodiesel, que também não faz parte do estudo elaborado pelo Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt et al (1996). Utilizou-se, portanto, a área ocupada pela usina do Grupo Agropalma (74 m²) ainda que, conforme dito anteriormente, esta produza combustível a partir da borra do refino do óleo e não do óleo diretamente. Considerando a produção média anual de 6.000 t de combustível, tem-se 1,23E-05 m²ano de área IV para cada tonelada de biodiesel produzida, ocasionando transformação da mesma quantidade de área II.

Vale ressaltar que, conforme mencionado durante a revisão bibliográfica, a área transformada recebe o sinal negativo e a área ocupada sinal positivo.

Sabendo-se que para atender a unidade funcional são necessários 26,4 kg de biodiesel e que, para tanto, são necessários 30 kg de óleo de dendê, 15 kg de etanol anidro, 0,3 kg de soda cáustica e, 7,1 tkm para o transporte rodoviário, foi possível,

converter todos os dados levantados para o fluxo de referência, conforme pode ser observado na Tabela 64.

Tabela 64: Uso da terra por subsistema para produção de 26,4 kg de biodiesel

Tipo de área	Óleo de dendê	Etanol anidro	Soda cáustica	Transporte etanol e soda	Produção do biodiesel
Área II	-1,00E+02	-3,40E+01	-3,90E-03	-1,03E-01	-3,26E-04
Área III	1,00E+02	3,30E+01	2,50E-03	-	-
Área IV	5,64E-03	9,16E-01	5,39E-04	-	3,26E-04
Área V	5,61E-02	9,92E-02	8,72E-04	1,03E-01	-

No entanto, conforme visto anteriormente, o biodiesel não é o único produto obtido, tem-se ainda, a glicerina. Sendo assim, com exceção das áreas utilizadas no subsistema de produção do biodiesel, que já foram calculadas considerando-se apenas o biodiesel produzido, os valores obtidos na Tabela 64 foram rateados entre os dois co-produtos (biodiesel e glicerina). Para tanto, utilizou-se o fator de alocação calculado no item 5.1.3.2.6, igual a 90%.

Considerando-se os pesos de cada área apresentados durante a revisão bibliográfica, calculou-se à média ponderada entre esses pesos e os valores totais de cada área (convertidos para o fluxo de referência e devidamente alocados), conforme pode ser observado na Tabela 65.

Tabela 65: Uso da terra para 26,4 kg de biodiesel

Tipo de área	m ² ano	Peso
Área II	-1,21E+02	1,5
Área III	1,20E+02	2,3
Área IV	8,30E-01	5,1
Área V	2,33E-01	7,6
Média ponderada:	1,00E+02 m²ano	

Ressalta-se que os valores de uso da terra para o petrodiesel e para o óleo combustível, que fazem parte do ciclo de vida do biodiesel, foram desconsiderados, pois são utilizados em quantidade muito pequena e, portanto, não afetariam o valor final da categoria.

- Potencial de toxicidade

As avaliações de toxicidade do ciclo de vida da soda cáustica e do etanol, já foram elaboradas pela equipe de análise de ecoeficiência da BASF. A primeira apresenta 456 pontos e, a segunda, 1174 pontos, ambas por quilo de produto.

No entanto, no caso do etanol, foi necessário realizar uma modificação para atender ao contexto deste trabalho, pois nos 1174 pontos atribuídos, estão consideradas as implicações tóxicas de todos os produtos utilizados durante a produção dos fertilizantes e defensivos, produções estas que estão fora dos limites adotados durante o escopo deste estudo.

Sendo assim, a pontuação para um quilo de etanol, utilizada neste trabalho foi de 51, considerando-se para os fertilizantes e defensivos, apenas as decorrências de seu uso.

No que diz respeito ao óleo de dendê, foi necessário realizar a avaliação, pois até o momento de execução deste trabalho, não havia nenhuma disponível. Para o uso do óleo de dendê não foram consideradas implicações tóxicas, visto que é um produto utilizado, principalmente, pela indústria alimentícia. No entanto, as decorrências das matérias-primas participantes de seu ciclo de vida foram consideradas.

Dos fertilizantes utilizados, de acordo com as avaliações de toxicidade já desenvolvidas pela BASF, apenas os nitrogenados e fosfatados acusaram implicações durante seu uso. Para cada um foram atribuídos 300 pontos por quilo, visto que o nitrogenado se enquadra na frase R36/37/38 e, o fosfatado na R34.

Os defensivos, também de acordo com avaliações feitas pela BASF, são classificados pela frase R 22 e, portanto, durante o uso, apresentam, cada um, 300 pontos por quilo.

O petrodiesel utilizado nas atividades de transporte do ciclo de vida do óleo de dendê apresenta, conforme mencionado anteriormente, um total (produção e uso) de 1443 pontos por quilo.

Com as quantidades de fertilizantes, defensivos e diesel, determinadas durante o inventário do óleo de dendê, foi possível calcular a quantidade de pontos para 1 quilo de óleo de dendê. A pontuação encontrada foi 38.

Com as avaliações de toxicidade da soda, do etanol, do óleo de dendê e do petrodiesel utilizado no transporte das matérias-primas, foi possível determinar o potencial de toxicidade para 1 kg de biodiesel. O valor encontrado foi 83.

Como para atender a unidade funcional faz-se necessário 26,4 kg de combustível, tem-se para esta categoria, portanto, um total de 2.179 pontos.

- Resumo

A Tabela 66 apresenta os valores de todas as categorias calculadas para o biodiesel.

Tabela 66: Categorias de ecoeficiência para o biodiesel

Categorias de ecoeficiência	Valores por fluxo de referência
Consumo de recursos energéticos (MJ)	3,43E+00
Consumo de recursos materiais [kg/(a*10 ⁶ t) ^{0,5}]	1,92E+01
Resíduos sólidos (kg)	4,54E+01
Efluentes líquidos (L)	1,33E+05
FFO (gC ₂ H ₄ -eq)	3,16E+02
EE (gCO ₂ -eq)	-2,27E+04
CA (gSO ₂ -eq)	9,20E+01
DCO (gCFCs-eq)	3,62E+00
Uso da terra (m ² ano)	1,00E+02
Potencial de toxicidade (pontos)	2,18E+03

5.2 Avaliação de riscos de acidentes

Esta etapa apresenta duas avaliações de riscos simplificadas, uma para cada combustível estudado. Cada uma das avaliações teve por objetivo determinar os possíveis acidentes relacionados com o modelo representativo de cada produto, e classificá-los quanto à severidade das consequências e à ocorrência do acidente.

5.2.1 Petrodiesel

Os dados para a realização desta avaliação foram obtidos de fontes secundárias - artigos e dissertações - que discutem a problemática dos acidentes ocorridos nas plataformas da Bacia de Campos e nas refinarias de petróleo brasileiras.

Para a extração do petróleo no Brasil foram levantados cinco tipos de riscos: quedas, vazamentos, choques elétricos e incêndios, todos obtidos de Freitas et al. (2001).

A Tabela 67 apresenta, para o ano de 1997, a quantidade de acidentes que ocorreram relacionados a cada um dos riscos anteriormente mencionados na Bacia de Campos (RJ).

Tabela 67: Acidentes nas plataformas de petróleo da Bacia de Campos

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados
Quedas	20
Vazamentos	17
Choques elétricos	2
Incêndios	9

Fonte: Freitas et al. (2001)

Admitiu-se que as informações levantadas não sofrem grandes variações de uma plataforma de petróleo para outra e, portanto, sabendo-se que a Bacia de Campos produz 15.045.358 m³ (ANP, 2005e) - o que corresponde a 6,3% do petróleo refinado no Brasil (ANP, 2005f) - foi possível estimar o número de acidentes ocorridos relacionados à quantidade total de petróleo refinada no país.

A Tabela 68 apresenta as informações da Tabela 67 convertidas para a quantidade total de petróleo refinada no país.

Tabela 68: Acidentes relacionados ao total de petróleo refinado no Brasil

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados
Quedas	317
Vazamentos	270
Choques elétricos	32
Incêndios	143

Com a determinação do número de eventos registrados para cada um dos riscos de acidentes, deve-se determinar a ocorrência de cada um. Para tanto, primeiramente, dividiram-se os dados da Tabela 69 pela média anual de petróleo refinado no país, que é da ordem de $94.626.930 \text{ m}^3$, conforme ANP (2005f). Os quocientes obtidos estimam à quantidade de eventos ocorridos por m^3 de petróleo refinado.

Em seguida, multiplicaram-se os quocientes obtidos por $0,0268 \text{ m}^3$ de petróleo, que correspondem à cerca de 23,4 kg necessários para atender ao fluxo de referência do petrodiesel (determinado durante a realização da ACV). Os produtos determinados representam a ocorrência de cada risco e estão apresentados na Tabela 69.

Tabela 69: Determinação da ocorrência dos riscos relacionados ao petróleo refinado para a produção de 26,11 litros de petrodiesel

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados	Número de eventos por m^3 de petróleo refinado	Ocorrência
Quedas	317	3,35E-06	8,98E-08
Vazamentos	270	2,85E-06	7,64E-08
Choques elétricos	32	3,35E-07	8,98E-09
Incêndios	143	1,51E-06	4,05E-08

Para o refino do petróleo, foram levantados oito tipos de riscos: choques mecânicos, choques elétricos, vazamentos, quedas, acidente de trânsito interno e acidente de trânsito externo, queimaduras e incêndios. (SOUZA; FREITAS, 2002). A Tabela 70 apresenta, para o ano de 1997, a quantidade de acidentes ocorridos, relacionados a cada um dos riscos anteriormente mencionados.

Tabela 70: Acidentes nas refinarias brasileiras

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados
Choques mecânicos	50
Choques elétricos	2
Vazamentos	21
Quedas	28
Acidentes de trânsito interno	2
Acidentes de trânsito externo	1
Queimadura	8
Incêndios	0

Fonte: Souza; Freitas (2002)

Assim como foi feito para os riscos da extração do petróleo, foi necessário determinar as ocorrências dos riscos durante o refino. O procedimento de cálculo utilizado foi o mesmo, levando-se em conta que anualmente as refinarias da Petrobras produzem, cada uma, em média, 34.608.384 m³ de petrodiesel (ANP, 2005d) e que, durante a execução da ACV, foi determinado como fluxo de referência 26,11 litros de petrodiesel.

A Tabela 71 apresenta as ocorrências dos riscos de acidentes, na fase de refino, para a produção de 26,11 litros de petrodiesel.

Tabela 71: Determinação da ocorrência dos riscos do refino do petróleo para produção de 26,11 litros de petrodiesel

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados	Número de eventos por m³ de petrodiesel produzido	Ocorrência
Choques mecânicos	50	1,44E-05	3,77E-07
Choques elétricos	2	5,78E-07	1,51E-08
Vazamentos	21	6,07E-06	1,58E-07
Quedas	28	8,09E-06	2,11E-07
Acidentes de trânsito interno	2	5,78E-07	1,51E-08
Acidentes de trânsito externo	1	2,89E-07	7,54E-09
Queimaduras	8	2,31E-06	6,04E-08
Incêndios	0	0	0

Para que a avaliação de risco fique nos moldes necessários para a aplicação da análise de ecoeficiência da BASF, ainda fez-se necessário classificar os riscos quanto à severidade de suas consequências. Para tanto, partindo-se das informações de Freitas et al. (2001) e Souza (2000), a respeito do número de trabalhadores lesionados e da quantidade de óbitos decorrentes de cada um dos eventos, atribuíram-se pesos de 1 (menos grave) a 10 (mais grave) para todos os riscos levantados. Tais pesos foram validados pela equipe especialista em ecoeficiência da BASF brasileira.

Os riscos decorrentes da extração e refino do petróleo foram então consolidados e apresentados na Tabela 72 a seguir.

Tabela 72: Análise de riscos simplificada do petrodiesel

Riscos de Acidentes	Ocorrência	Severidade
Choques mecânicos	3,77E-07	4
Choques elétricos	2,41E-08	8
Vazamentos	2,35E-07	8
Quedas	3,01E-07	4
Acidentes de trânsito interno	1,51E-08	9
Acidentes de trânsito externo	7,54E-09	8
Queimaduras	6,04E-08	8
Incêndios	4,04E-08	10

Conforme visto durante revisão bibliográfica, para cada risco, fez-se o produto dos valores obtidos para ocorrência e severidade. A somatória de tais produtos corresponde à categoria de ecoeficiência potencial de risco. Para o petrodiesel, a categoria apresenta, portanto, o valor de 5,86E-06.

5.2.2 Biodiesel

A avaliação de riscos do biodiesel compreende outras quatro avaliações: do óleo de dendê, do etanol, da soda cáustica e da etapa de produção do biodiesel.

Para a análise do óleo de dendê utilizaram-se dados fornecidos pela área de segurança do trabalho do Grupo Agropalma. Foram identificados sete tipos de risco:

acidentes de trânsito interno, quedas, queimaduras, cortes, aerodispersóides nos olhos, contato com espinhos do dendê/palha e lesões musculares.

A Tabela 73 apresenta, para o ano de 2005, quantos acidentes ocorreram relacionados a cada um dos riscos anteriormente mencionados.

Tabela 73: Acidentes durante produção do óleo de dendê

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados
Acidentes de trânsito interno	44
Aerodispersóides nos olhos	68
Quedas	84
Cortes	34
Contato com espinhos do dendê/palha	156
Lesões musculares	117
Queimaduras	9

Para determinar a ocorrência de cada um destes riscos utilizou-se o mesmo procedimento adotado para o petrodiesel. Primeiramente, diviram-se os dados da Tabela 71 pela média anual de óleo produzido pelo Grupo Agropalma, da ordem de 110.000 toneladas. Os quocientes obtidos estimam a quantidade de eventos ocorridos por tonelada de óleo produzido.

Em seguida, multiplicaram-se os quocientes obtidos por 0,030 t de óleo, necessários para atender ao fluxo de referência do biodiesel (determinado durante a realização da ACV). Os produtos determinados representam a ocorrência de cada risco.

A classificação quanto à severidade foi realizada também a partir de informações obtidas junto ao Grupo Agropalma, sendo atribuídos pesos de 1 (menos grave) a 10 (mais grave), conforme feito anteriormente para o petrodiesel. Essa escala será adotada em todas as avaliações que compreendem a análise de riscos do biodiesel, para que seja possível consolidar as informações.

A Tabela 74 apresenta o resultado da análise de riscos de 30 kg de óleo de dendê.

Tabela 74: Análise simplificada de risco de 30 kg de óleo de dendê

Riscos de Acidentes	Ocorrência	Severidade
Acidentes de trânsito interno	1,20E-05	5
Aerodispersóides nos olhos	1,85E-05	1
Quedas	2,29E-05	1
Cortes	9,27E-06	7
Contato com espinhos do dendê/palha	4,25E-05	1
Lesões musculares	3,19E-05	1
Queimaduras	2,45E-06	1

Para a etapa agrícola da produção do etanol no Brasil foram levantados seis tipos de riscos, baseados nas informações de SIT (2002): acidentes de trânsito interno, quedas, cortes, contato com espinhos da palha, aerodispersóides nos olhos e lesões musculares. Sendo os percentuais médios de ocorrência da ordem de 13%, 6%, 46%, 14%, 13% e 8%, respectivamente, conforme Cordebello; Brasil; Pereira (2004).

Considerando que a média anual de ocorrências registradas é de 3.357, ainda de acordo com Cordebello; Brasil; Pereira (2004), foi possível estimar quantos acidentes ocorreram relacionados a cada um dos riscos anteriormente mencionados, os quais estão apresentados na Tabela 75.

Tabela 75: Acidentes durante a etapa agrícola da produção de etanol

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados
Acidentes de trânsito interno	423
Quedas	198
Cortes	1571
Contato com espinhos da palha da cana	467
Aerodispersóides nos olhos	433
Lesões Musculares	265

De acordo com Pro Cana (2006) tem-se uma produção média de 380 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano e, para a produção de 15 kg de etanol, necessários para fabricar 30,03 litros de biodiesel, tem-se, segundo Ometto (2005), uma necessidade de, aproximadamente, 234 kg. Com essas informações, assim como feito anteriormente, foi possível determinar a ocorrência de cada um dos riscos.

Quanto à severidade, os riscos apresentados são os mesmos da produção agrícola do dendê e, portanto, admitiu-se a mesma classificação, com exceção do item lesões musculares, que foi considerado mais grave, visto que o trabalhador da lavoura de cana-de-açúcar, em relação àquele do dendezal, trabalha em posição desfavorável.

A Tabela 76 apresenta o resultado da análise de risco simplificada da produção de 234 kg de cana-de-açúcar.

Tabela 76: Análise simplificada de risco para produção de 234 kg de cana-de-açúcar

Riscos de Acidentes	Ocorrência	Severidade
Acidentes de trânsito interno	2,60E-07	5
Quedas	1,22E-07	1
Cortes	9,67E-07	7
Contato com espinhos da palha da cana	2,88E-07	1
Aerodispersóides nos olhos	2,67E-07	1
Lesões Musculares	1,63E-07	2

Na ausência de dados detalhados, para a etapa industrial de produção do etanol, utilizou-se o dado consolidado apresentado no Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho (2006). De acordo com este anuário, em 2003, para a produção industrial do etanol (anidro e hidratado) foram registrados 123 eventos. Atribuiu-se, para tanto, uma severidade média classificada com peso 7.

Segundo BEN (2003), as produções médias anuais de etanol hidratado e anidro são da ordem de 8.753 m³ e 3.744 m³, respectivamente. Considerando-se as massas específicas dos dois álcoois, tem-se um total de 10.043.000 kg de álcool etílico (hidratado e anidro). Dividindo-se o número de ocorrências registradas pela produção total de álcool e multiplicando-se pela quantidade de 15 kg de etanol, necessários para fabricação de 30,03 litros de biodiesel, tem-se uma ocorrência de 1,84E-04.

Para a produção de soda cáustica foram levantados, de acordo com Freitas (2001), sete tipos de risco: choques mecânicos, quedas, queimaduras, choques elétricos, acidente de trânsito interno e incêndios.

Na ausência de dados específicos, para os eventos registrados em cada um dos riscos levantados, adotou-se a mesma estratégia feita para o etanol, utilizando-se o dado consolidado apresentado no Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho (2006).

De acordo com este anuário, em 2003, para a produção de soda foram registrados 9 eventos. Atribuiu-se para tanto, uma severidade média classificada com peso 8.

Segundo a Abiclor (2004), a produção nacional média de soda cáustica em 2004 foi de 1.298.600 toneladas. Portanto, sabendo-se que para 30,03 litros de biodiesel são necessários 0,3 kg de soda cáustica, seguiu-se o mesmo procedimento de cálculo adotado anteriormente, tendo-se obtido uma ocorrência de 2,08E-09.

Para a produção do biodiesel propriamente dita, utilizaram-se dados fornecidos pela área de segurança do trabalho do Grupo Agropalma, ainda que esta, conforme mencionado anteriormente, esteja operando apenas com a borra do óleo de dendê refinado como matéria-prima e fazendo uso da esterificação metílica. Foram identificados cinco tipos de risco: choques elétricos, incêndios, quedas, lesões musculares e cortes.

A empresa classificou cada um dos riscos quanto à probabilidade de ocorrência, atribuindo as palavras: baixa – nenhuma ocorrência registrada, média – uma a duas ocorrências por mês e, alta – três a quatro ocorrências no mês. De posse dessas informações, foi possível estimar o número de eventos registrados para cada um dos riscos.

A Tabela 77 apresenta as estimativas do número de acidentes ocorridos, relacionados a cada um dos riscos anteriormente mencionados.

Tabela 77: Acidentes da produção de biodiesel

Riscos de Acidentes	Número de eventos registrados
Choques elétricos	0
Incêndios	0
Quedas	54
Lesões musculares	72
Queimaduras	24
Cortes	24

A produção média anual de biodiesel de dendê, segundo a Agropalma, é da ordem de 6.000 toneladas por ano. Dessa forma, foi possível determinar, para 30,03 litros de biodiesel, as ocorrências de cada um dos riscos. A classificação quanto à severidade foi efetuada com base em informações obtidas junto ao grupo Agropalma.

A Tabela 78 apresenta o resultado da análise de riscos da produção de 30,03 litros de biodiesel.

Tabela 78: Análise simplificada de riscos do subsistema produção do biodiesel para 30,03 litros de combustível

Riscos de Acidentes	Ocorrência	Severidade
Choques elétricos	0	8
Incêndios	0	10
Quedas	2,38E-04	4
Lesões musculares	3,17E-04	1
Queimaduras	1,06E-04	6
Cortes	1,06E-04	1

Os riscos referentes às quatro análises realizadas - do óleo de dendê, do etanol (agrícola e industrial), da soda cáustica e da etapa de produção do biodiesel - foram então, consolidados e estão apresentados na Tabela 79, a seguir.

Tabela 79: Análise simplificada de riscos de 30,03 litros de biodiesel

Riscos de Acidentes	Ocorrência	Severidade
Acidentes de trânsito interno	1,23E-05	5
Aerodispersóides nos olhos	1,88E-05	1
Quedas	2,61E-04	2
Cortes	1,16E-04	5
Contato com espinhos do dendê/palha	4,28E-05	1
Lesões musculares	3,81E-04	1
Queimaduras	1,11E-04	3
Total produção industrial do etanol	1,84E-04	7
Total soda cáustica	2,08E-09	8
Choques elétricos	0	8
Incêndios	0	5

Conforme visto durante revisão bibliográfica, para cada risco, fez-se o produto dos valores obtidos para ocorrência e severidade. A somatória de tais produtos corresponde à categoria de ecoeficiência potencial de risco. Para o biodiesel a categoria apresenta, portanto, o valor de 3,31E-03.

5.3 Normalização

Os resultados da ACV e da avaliação simplificada de risco, realizadas para os dois combustíveis estudados, compõem o pilar ambiental da análise de ecoeficiência da BASF, conforme mencionado durante a revisão bibliográfica, e estão apresentados na Tabela 80.

Tabela 80: Valores absolutos das categorias

Categorias	Petrodiesel	Biodiesel
Cons. de rec. Materiais [$\text{kg}/(\text{a} \cdot 10^6 \text{t})^{0,5}$]	2,26E+02	1,92E+01
Cons. de rec. energéticos (MJ)	5,68E+00	3,43E+00
EE ($\text{gCO}_2\text{-eq}$)	7,13E+03	-2,27E+04
DCO (gCFCs-eq)	-	3,62E+00
FFO ($\text{gC}_2\text{H}_4\text{-eq}$)	1,15E+01	3,16E+02
CA ($\text{gSO}_2\text{-eq}$)	5,08E+01	9,20E+01
Efluentes líquidos (L)	3,42E+02	1,33E+05
Resíduos sólidos (kg)	3,59E-01	4,54E+01
Potencial de toxicidade	1,99E+04	2,18E+03
Uso da terra (m^2ano)	2,29E+00	1,00E+02
Potencial de risco (eventos)	5,86E-06	3,31E-03

Os valores obtidos para cada uma das categorias, devem ser então, normalizados. Para tanto, atribuiu-se o valor 1 à alternativa com maior valor, e a outra, foi calculada por linearidade. A Tabela 81 apresenta os valores normalizados das categorias.

Tabela 81: Valores relativos das categorias

Categorias	Petrodiesel	Biodiesel
Cons. de rec. materiais	1,00	0,09
Cons. de rec. energéticos	1,00	0,79
EE	1,00	-3,18
DCO	0,00	1,00
FFO	0,04	1,00
CA	0,55	1,00
Efluentes líquidos	0,00	1,00
Resíduos sólidos	0,01	1,00
Potencial de toxicidade	1,00	0,11
Uso da terra	0,02	1,00
Potencial de risco	0,00	1,00

5.4 Agregação das categorias para determinação dos índices ambientais

Com os valores das categorias normalizados, iniciou-se a fase de agregação, com o objetivo de se determinar um único índice preliminar. Esta fase, conforme revisão bibliográfica, é constituída por três partes:

Na primeira parte, as categorias EE, DCO, FFO e CA tornam-se uma única categoria, a qual recebe a denominação “emissões atmosféricas”. Em seguida, esta última, com os resíduos sólidos e os efluentes líquidos, formam uma nova categoria denominada rejeitos. E, por fim, as seis categorias restantes (rejeitos, consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos, potencial de toxicidade, potencial de risco e uso da terra) constituem o denominado, índice ambiental.

Para tanto, foram determinados para cada uma das categorias, três fatores: social, de relevância e de ponderação, sendo que este último é o resultado da média geométrica dos dois primeiros.

Todos os fatores sociais utilizados foram determinados a partir de informações obtidas por meio de questionários (ANEXO A) entregues a 15 pessoas (alunos e professores) do curso de engenharia química da Escola Politécnica da USP. As Tabelas 82, 83 e 84 apresentam os fatores sociais necessários para cada uma das partes da etapa de agregação.

Tabela 82: Fatores sociais para EE, DCO, FFO e CA

Categorias	Fator Social
Efeito estufa	29,3%
Destruição da camada de Ozônio	31,3%
Formação fotoquímica da camada de Ozônio	17,0%
Chuva Ácida	22,3%

Tabela 83: Fatores sociais para emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos

Categorias	Fator Social
Emissões Atmosféricas	34%
Efluentes Líquidos	35%
Resíduos sólidos	31%

Tabela 84: Fatores sociais para consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos, rejeitos, potencial de toxicidade, risco potencial e uso da terra

Categorias	Fatores Sociais
Consumo de recursos materiais	19%
Consumo de recursos energéticos	18%
Rejeitos	21%
Potencial de Toxicidade	17%
Potencial de Risco	12%
Uso da terra	13%

Os fatores de relevância, conforme mencionado durante a revisão bibliográfica, dependem do valor total da região considerada no estudo para cada uma das categorias, no caso deste trabalho, o Brasil. Esses valores foram determinados anteriormente, pela equipe de ecoeficiência da BASF brasileira e, estão apresentados na Tabela 85.

Tabela 85: Valor total anual de cada categoria para o Brasil

Categorias	Valor total do país
EE (10^3 t CO ₂ -eq)	1,25E+06
DCO (10^3 t CFCs-eq)	1,39E+01
FFO (10^3 t C ₂ H ₄ -eq)	1,44E+03
CA (10^3 t SO ₂ -eq)	7,47E+03
Efluentes líquidos (t)	1,67E+05
Resíduos sólidos (10^6 t)	2,35E+02
Consumo de recursos energéticos (PJ)	7,42E+03
Consumo de recursos materiais (10^6 t)	1,21E+02
Uso da terra (10^3 km ²)	1,34E+04

Para a primeira parte da agregação, isto é, a formação da categoria emissões atmosféricas, foram inicialmente determinados os fatores de relevância das quatro categorias a serem agregadas: EE, DCO, FFO e CA. Conforme visto durante revisão bibliográfica, cada um desses fatores foi calculado a partir da divisão entre o valor (absoluto) mais significativo da categoria dentre as alternativas pelo valor correspondente na Tabela 85. Foram obtidos os seguintes fatores de relevância normalizados em 100: 3%; 51%; 43; 3% para EE, DCO, FFO e CA, respectivamente, conforme cálculos a seguir.

Relevâncias não normalizadas:

$$\begin{aligned} \text{EE: } \left(\frac{2,27E+04}{1,25E+06} \right) * \frac{1}{1000} &= 0,0018\% & \text{DCO: } \left(\frac{3,62E+00}{1,39E+01} \right) * \frac{1}{1000} &= 0,0260\% \\ \text{FFO: } \left(\frac{3,16E+02}{1,44E+03} \right) * \frac{1}{1000} &= 0,0219\% & \text{CA: } \left(\frac{9,20E+01}{7,47E+03} \right) * \frac{1}{1000} &= 0,0012\% \end{aligned}$$

Relevância normalizada em 100:

$$\sum (\text{relevâncias}_{\text{ não normalizadas}}) = 0,0018 + 0,0260 + 0,0219 + 0,0012 = 0,0511$$

$$\text{EE: } \left(\frac{0,0018}{0,0511} \right) = 4\% \quad \text{DCO: } \left(\frac{0,0260}{0,0511} \right) = 51\% \quad \text{FFO: } \left(\frac{0,0219}{0,0511} \right) = 43\%$$

$$\text{CA: } \left(\frac{0,0012}{0,0511} \right) = 2\%$$

Em seguida, foram determinados os fatores de ponderação, os quais são resultantes da média geométrica entre os fatores de relevância e social. Os valores obtidos também normalizados em 100 foram: 12%; 47%; 32% e 9% para EE, DCO, FFO e CA, respectivamente, conforme cálculos a seguir.

Fatores de ponderação não normalizados:

$$\begin{aligned} \text{EE: } \sqrt{(4 * 29,3)} &= 10\% & \text{DCO: } \sqrt{(51 * 31,3)} &= 40\% & \text{FFO: } \sqrt{(43 * 17)} &= 27\% & \text{CA: } \\ \sqrt{(2 * 22,3)} &= 7\% \end{aligned}$$

Fatores de ponderação normalizados em 100:

$$\sum(fatores_de_ponderação_não_normalizados) = 10 + 40 + 27 + 7 = 85$$

$$EE: \left(\frac{10}{85}\right) = 12\% \quad DCO: \left(\frac{40}{85}\right) = 47\% \quad FFO: \left(\frac{27}{85}\right) = 32\% \quad CA: \left(\frac{8}{85}\right) = 9\%$$

A Tabela 86 apresenta o cálculo final para determinação da categoria emissões atmosféricas para o petrodiesel e biodiesel que, conforme visto durante revisão bibliográfica, é uma média ponderada dos valores relativos das categorias e seus respectivos fatores de ponderação determinados.

Tabela 86: Determinação da categoria emissões atmosféricas

Categorias	Petrodiesel	Biodiesel	Fatores de ponderação
EE	1,00	-3,18	12%
DCO	0,00	1,00	47%
FFO	0,04	1,00	32%
CA	0,55	1,00	9%
Emissões atmosféricas	0,18	0,49	

A nova categoria precisou ser normalizada conforme feito para as demais categorias no item 5.3, ou seja, o biodiesel por apresentar valor mais alto recebeu o valor 1 e o petrodiesel por linearidade, recebeu valor aproximadamente igual a 0,36.

Iniciou-se então, a segunda parte da agregação, a formação da categoria rejeitos. O procedimento adotado para cálculo foi o mesmo da primeira parte, com exceção do fator de relevância para emissões atmosféricas, que é determinado a partir dos fatores de relevância e sociais das categorias EE, DCO, FFO e CA. A fórmula recomendada para cálculo pela metodologia de ecoeficiência é a média ponderada entre fatores de relevância e fatores sociais, somada ao maior fator de relevância das quatro categorias, dividido por dois.

Os fatores de relevância normalizados, portanto, para as categorias efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas obtidos foram, respectivamente: 67%, 16% e 16% e, os fatores de ponderação também normalizados em 100 foram: 51%, 24% e 25%. A Tabela 87 apresenta o cálculo final para determinação da categoria rejeitos para o petrodiesel e biodiesel.

Tabela 87: Determinação da categoria rejeitos

Categorias	Petrodiesel	Biodiesel	Fatores de ponderação
Efluentes líquidos	0,00	1,00	51%
Resíduos sólidos	0,01	1,00	24%
Emissões atmosféricas	0,36	1,00	25%
Rejeitos	0,09	1,00	

As novas categorias devem ser sempre normalizadas, mas neste caso, o biodiesel, que apresenta o valor mais alto, corresponde ao valor 1 e, portanto, os dados dessa nova categoria não se alteram.

A última parte da agregação - a formação dos índices ambientais - segue o mesmo raciocínio adotado nas outras duas partes. O fator de relevância para a categoria rejeitos foi calculado da mesma forma que anteriormente, para a categoria emissões atmosféricas.

A metodologia de análise de ecoeficiência da BASF não calcula fator de relevância para as categorias potencial de toxicidade e risco potencial, sendo os fatores sociais os próprios fatores de ponderação.

Os fatores de relevância normalizados, obtidos para as categorias consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos, rejeitos e uso da terra foram, respectivamente: 75,4%, 0,03%, 24,3%, 0,3% e, os fatores de ponderação normalizados, também respectivamente, foram: 43%, 1%, 25%, 2%.

A Tabela 88 apresenta o cálculo final para a determinação dos índices ambientais para o petrodiesel e biodiesel.

Tabela 88: Determinação dos índices ambientais

Categorias	Petrodiesel	Biodiesel	Fatores de ponderação
Consumo de recursos materiais	1	0,09	43%
Consumo de recursos energéticos	1	0,79	1%
Rejeitos	0,09	1	25%
Uso da Terra	0,02	1	2%
Potencial de toxicidade	1	0,11	17%
Risco potencial	0	1	12%
Índices ambientais	0,63	0,46	

5.5 Levantamento de Custos

Nesta etapa, serão apresentadas estimativas de todos os custos envolvidos na produção dos combustíveis estudados (biodiesel de dendê e petrodiesel) que, foram utilizados, posteriormente, na aplicação da ferramenta de análise de ecoeficiência da BASF.

5.5.1 Petrodiesel

De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, os custos referentes à produção do petrodiesel estão ligados ao consumo de energia, petróleo e utilidades nas unidades de hidrotratamento, além dos gastos com mão-de-obra e manutenção e reparo de equipamentos.

Porém, segundo Machado e Silva (2005), a maior parte do custo total está relacionado às unidades de geração de hidrogênio que, como visto durante pesquisa bibliográfica, é um insumo necessário para a remoção de enxofre na etapa do hidrotratamento.

Para o levantamento de todas as informações necessárias, descritas anteriormente, foram contatadas algumas refinarias da Petrobras, porém por questão de confidencialidade, nem todos os dados necessários foram disponibilizados pela empresa. Obteve-se apenas o custo com a produção do hidrogênio (situado na faixa de US\$ 950 a tonelada) e, o custo total consolidado para o petrodiesel metropolitano, que sai da refinaria a um custo de R\$ 1,125/litro.

Para os 26,11 litros de petrodiesel, quantidade adotada durante a realização da avaliação do ciclo de vida do produto, tem-se, portanto, um custo de R\$ 29,375.

5.5.2 Biodiesel

Os custos referentes à produção do biodiesel estão relacionados ao consumo de energia, matéria-prima, catalisador além dos gastos com mão-de-obra, manutenção e reparo de equipamentos.

No que diz respeito ao óleo de dendê, considerou-se o preço de custo e não o preço de mercado, pois o Grupo Agropalma é produtor do óleo de dendê e do biodiesel. Tal preço foi obtido de ISAE-FGV (2005).

No que se refere aos preços do etanol e do catalisador, os mesmos foram obtidos de Portal UNICA (2006) e ABOISSA (2006), respectivamente, admitindo-se o NaOH no estado líquido.

Relativamente à produção do biodiesel, os dados foram obtidos de Del Vecchio (2006a), considerando-se uma planta de biodiesel pequena, da ordem de 100.000 toneladas por ano. Têm-se, portanto para a produção de uma tonelada de biodiesel, um gasto de R\$ 39,77 com o tratamento e transesterificação do óleo, R\$ 11,20 com reparos e manutenção de equipamentos, além de R\$ 4,80 com mão-de-obra.

Para cada litro de biodiesel produzido, o processo de transesterificação fornece como co-produto, segundo Silva (1997), 0,1 kg de glicerina, que atualmente, segundo Mota et al. (2005), apresenta no mercado internacional preço variando entre U\$ 0,5 a U\$ 1,0 por quilo. Dessa forma, para se obter um valor para o custo total do biodiesel, subtraiu-se o valor recuperado com a venda da glicerina, admitindo-se um preço médio de U\$ 0,75 por quilo.

Os custos do biodiesel foram estimados para 30,03 litros de combustível, que é a mesma quantidade adotada durante a realização da avaliação do ciclo de vida do produto e, estão apresentados na Tabela 89.

Convém notar que são necessários 15 kg de etanol, 30 kg de óleo de dendê bruto e 0,3 kg de soda cáustica para produzir esta quantidade de combustível (SILVA, 1997).

Tabela 89: Custos de 30,03 litros de biodiesel de dendê via rota etflica.

Itens	Valor em R\$
Óleo de dendê (matéria-prima)	34,985
NaOH (catalisador)	0,228
Etanol anidro (matéria-prima)	13,931
Tratamento e transesterificação do óleo	1,050
Reparos e manutenção de equipamentos	0,296
Mão-de-obra	0,127
Total considerando valor recuperado com a glicerina	45,686

5.6 Determinação dos Índices Econômicos

Após a determinação dos custos totais do petrodiesel e do biodiesel, foram obtidos os índices econômicos, calculados por linearidade, a partir da consideração de que o maior valor dos custos totais é representado pelo valor 1, conforme Tabela 90.

Tabela 90: Determinação dos Índices Econômicos

	Custos totais	Índices Econômicos
Petrodiesel	29,38	0,64
Biodiesel	45,69	1,00

5.7 Inter-relacionamento entre os pilares

Após a determinação dos índices econômicos e ambientais, foram calculados a relação ambiental-econômica e os desvios dos índices econômicos e ambientais em relação às respectivas médias.

Para o primeiro, determinou-se a média aritmética de todos os fatores de relevância calculados durante as agregações e o fator de relevância econômico, obtido da divisão entre o maior custo entre as alternativas pelo PIB do país. Os valores encontrados foram, 20,93% e 3,39% respectivamente. A raiz quadrada da divisão entre esses dois valores apresentou como quociente, aproximadamente, 2,48 que corresponde à relação ambiental-econômica, conforme mencionado na revisão bibliográfica.

Os desvios ambientais calculados foram -0,09 para o biodiesel e 0,09 para o petrodiesel, enquanto que os desvios econômicos obtidos foram 0,18 e -0,18, respectivamente.

A partir dessa relação, foram calculados novos índices econômicos e ambientais, apresentados na Tabela 91 que foram utilizados na determinação da matriz de ecoeficiência, a qual será apresentada no item 5.7.

Tabela 91: Índices ambientais e econômicos inter-relacionados

	Petrodiesel	Biodiesel
Novo índice ambiental	1,40	0,60
Novo índice econômico	0,91	1,09

5.8 Discussões

- Impressão ecológica

Com as seis categorias determinadas e normalizadas para cada um dos produtos - consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos, rejeitos, potencial de toxicidade, potencial de risco e uso da terra - foi possível determinar o gráfico de impressão ecológica, Figura 20, para o petrodiesel e biodiesel.

Figura 20: Impressão Ecológica do petrodiesel e biodiesel

Neste gráfico, quanto mais afastado do centro encontra-se o valor da categoria de ecoeficiência, maior é o impacto desta sobre o meio ambiente e a sociedade. Sendo assim, pode-se observar que o petrodiesel apresenta melhor performance nas categorias rejeitos, potencial de risco e uso da terra, enquanto o biodiesel é superior nas categorias consumo de recursos materiais, consumo de recursos energéticos e potencial de toxicidade.

O melhor desempenho do biodiesel na categoria consumo de recursos energéticos diz respeito à produção das principais matérias-primas envolvidas (etanol e óleo de dendê) que são auto-suficientes energeticamente. Isto ocorre porque os resíduos gerados nos dois processos são queimados para geração de energia. A energia obtida com os resíduos da produção do óleo é tão elevada que estes ainda sobram para serem utilizados como fertilizantes.

O petrodiesel apresenta alto valor para a categoria consumo de recursos materiais, pois é derivado de um produto de origem fóssil, o petróleo, enquanto que as matérias-primas para formação do biodiesel, o etanol anidro e o óleo de dendê, têm caráter renovável.

Para a categoria uso da terra, o petrodiesel tem destaque positivo, conforme Figura 21, pois apesar da grande área ocupada pelas refinarias e plataformas de petróleo, ele é produzido em quantidade elevada, o que deixa a relação área por quilo de combustível reduzida. Relevar que esta relação se reduz mais ainda porque o petrodiesel tem vários co-produtos, conforme mencionado anteriormente.

Figura 21: Uso da terra para petrodiesel e biodiesel

Outro fato que pesa de forma positiva para o combustível fóssil é que o transporte da plataforma à refinaria é feito por dutos, o que não exige extensão de terra para construção de estradas e rodovias; o mesmo não ocorre com o biodiesel, visto que a soda e o etanol são transportados para a usina por via rodoviária.

Os grandes responsáveis, no entanto, pelo elevado uso da terra no ciclo de vida do biodiesel, são o óleo de palma e o etanol, conforme Figura 22, porém deve-se ressaltar que apesar de ter sido enquadrado em uma área de agricultura convencional, o dendezal é considerado como uma floresta, ainda que não nativa e, portanto, a perda de biodiversidade é ainda menor comparada com a área ocupada pelo canavial.

Figura 22: Uso da terra para o biodiesel

Quanto à categoria potencial de toxicidade, o petrodiesel tem baixa performance em relação ao biodiesel, visto que existe, durante sua produção, o contato com muitos hidrocarbonetos voláteis, algo que não ocorre no combustível de origem vegetal, conforme pode ser observado na Figura 23.

Figura 23: Potencial de toxicidade para petrodiesel e biodiesel

As implicações tóxicas no ciclo de vida do biodiesel estão relacionadas, principalmente, ao óleo de palma e ao etanol anidro, conforme pode ser observado na Figura 24. Isso ocorre devido ao uso de fertilizantes e defensivos nas culturas da cana-de-açúcar e dendê. No entanto, a quantidade de fertilizante utilizada em ambas culturas é reduzida, pois ocorre reaproveitamento dos resíduos da obtenção do óleo e do álcool para tal função e, no que se refere aos defensivos, o emprego no dendezeiro é baixo, pois se dá preferência ao controle biológico, que não apresenta risco para a vida do polinizador (responsável pela formação dos cachos de fruto).

Figura 24: Potencial de toxicidade do biodiesel

Para a categoria potencial de risco, apesar da severidade das conseqüências dos possíveis acidentes durante o ciclo de vida do petrodiesel, estes apresentam ocorrência muito baixa. No ciclo de vida do biodiesel, no entanto, a situação se inverte, porém, neste caso, a ocorrência é tão elevada em relação ao petrodiesel que a categoria acaba recebendo valor muito maior.

A partir da Figura 25, pode-se observar que a produção do biodiesel propriamente dita é a maior responsável pelo valor desta categoria. Este fato pode ser justificado pela tecnologia de produção do biodiesel ainda ser recente, visto que a Agropalma, fornecedora dos dados para essa análise, completou um ano de operação no mês de abril deste ano (2006).

Figura 25: Potencial de risco de acidentes do biodiesel

No que se refere às emissões atmosféricas, conforme pode ser observado na Figura 26, as categorias FFO e DCO são as principais responsáveis pelo biodiesel apresentar o dobro do valor em relação ao petrodiesel.

Figura 26: Fatores de ponderação para determinação da categoria emissões atmosféricas

Na DCO, apenas o biodiesel contribui para este impacto, visto que tanto no dendezeiro quanto no canavial, faz-se uso de pesticidas organoclorados. Já a categoria FFO é mais acentuada no biodiesel, principalmente, devido ao ciclo de vida do óleo de dendê, que libera grande quantidade de COVNM durante a queima das fibras e cascas do dendê, para geração de energia e, do petrodiesel utilizado nas atividades de transporte.

Quanto à chuva ácida, a diferença entre biodiesel e petrodiesel é menos acentuada, mas o petrodiesel leva vantagem. A soda cáustica é a que mais contribui para este impacto no ciclo de vida do biodiesel, em virtude da queima dos combustíveis fósseis (petrodiesel e óleo combustível), para geração de energia térmica, conforme Figura 27.

Figura 27: Chuva ácida para petrodiesel e biodiesel

No entanto, no que se refere à categoria efeito estufa, pode-se observar a partir da Figura 28, um melhor desempenho do biodiesel. Essa melhor performance, deve-se às culturas de cana-de-açúcar e de dendê que conseguem sequestrar grande quantidade de CO_2 . Conforme visto durante a análise do inventário, para atender a unidade funcional proposta, as duas culturas juntas ainda têm capacidade de captar 42 kg de CO_2 , sendo assim, a categoria efeito estufa, para o biodiesel, acabou ficando com sinal negativo.

Figura 28: Efeito estufa para petrodiesel e biodiesel

No que se refere aos resíduos sólidos, o petrodiesel apresentou desempenho superior. O principal causador do alto índice desta categoria para o biodiesel foi a soda cáustica, conforme pode ser observado na Figura 29.

Figura 29: Resíduos sólidos

Quanto à categoria rejeitos (agregação das categorias efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas), conforme observado na Figura 30, os efluentes líquidos são os principais responsáveis pelo valor tão discrepante do biodiesel em relação ao petrodiesel.

Figura 30: Fatores de ponderação para determinação da categoria rejeitos

O alto valor para os efluentes líquidos do biodiesel deve-se, principalmente, à quantidade de matéria graxa arrastada pela água de lavagem utilizada, tanto no beneficiamento do óleo, quanto na purificação do éster vegetal.

A Tabela 92 apresenta um resumo dos principais motivos para as performances obtidas para o biodiesel e petrodiesel em cada uma das categorias.

Tabela 92: Comparativo Biodiesel x Petrodiesel

	Biodiesel	Petrodiesel
Consumo de recursos materiais	uso de matérias-primas renováveis; utilização dos resíduos das produções do óleo de dendê e do etanol como fertilizantes.	uso de matéria-prima (petróleo) não renovável.
Consumo de recursos energéticos	produção do óleo de dendê e etanol auto-suficientes energeticamente.	co-geração de energia elétrica não suficiente.
Uso da terra	elevada relação área utilizada por kg de produto.	baixa relação área utilizada por kg de produto, pois o volume de combustível produzido é muito alto além de apresentar diversos co-produtos.
Potencial de toxicidade	baixa toxicidade, pois as principais matérias-primas (óleo de dendê e etanol) não são tóxicas.	alta toxicidade, pois há contato com hidrocarbonetos voláteis durante toda sua produção.
Potencial de risco	baixa severidade das conseqüências dos possíveis acidentes; alta ocorrência de acidentes, pois a produção agrícola do dendê é não mecanizada e tecnologia de produção do biodiesel é ainda incipiente.	baixa ocorrência de acidentes, pois a relação número de acidentes por volume de combustível produzido é muito baixa; alta severidade das conseqüências dos possíveis acidentes.

continua

conclusão

Rejeitos	<p>alta quantidade de matéria-graxa arrastada pela água de lavagem utilizada nas produções do óleo de dendê e biodiesel;</p> <p>uso de pesticidas organoclorados na produção do óleo de dendê e do etanol que contribuem para a DCO;</p> <p>O uso das cascas e das fibras para geração de energia que emitem durante a queima COVNM, os quais contribuem para a FFO;</p> <p>grande quantidade de resíduos sólidos devido à produção de soda cáustica e produção do biodiesel.</p>	<p>efluente gerado em baixa quantidade;</p> <p>não apresenta aspectos ambientais que contribuam para a DCO;</p> <p>resíduo sólido gerado em baixa quantidade.</p>
-----------------	---	---

- Matriz de ecoeficiência

Com os índices calculados no item 5.7, foi obtida a matriz de ecoeficiência, Figura 31, que apresenta o resultado final da análise. Observa-se que o círculo correspondente ao biodiesel está localizado acima da diagonal, o que indica ser essa a opção mais ecoeficiente.

Figura 31: Matriz de ecoeficiência

No entanto, é recomendável estimar a confiança do resultado apresentado. Segundo Saling (2006), para as alternativas que se diferenciarem ambientalmente ou economicamente em menos de 10%, a análise deve ser feita com cuidado, pois as alternativas não são suficientemente distintas.

Para determinar se a diferença entre as alternativas é ou não superior a 10%, desenhou-se na matriz de ecoeficiência, um quadrado de medida 0,2 (10% da medida dos eixos), conforme pode ser observado na Figura 31.

A partir daí, comparou-se a medida do lado do quadrado com as distâncias tanto horizontal quanto vertical entre os centros dos dois apresentados na matriz. Observou-se que a distância vertical é maior do que o lado do quadrado enquanto que a horizontal é praticamente a mesma. Sendo assim, pode-se dizer que a diferença entre as alternativas no desempenho ambiental é superior a 10%, enquanto que no desempenho econômico é próxima a 10%.

Pode-se dizer, portanto, com confiança de no mínimo 90%, que para o contexto deste estudo, o biodiesel em relação ao petrodiesel apresenta melhor desempenho ambiental e inferior performance econômica.

A melhor performance ambiental do biodiesel indica que, apesar do produto não apresentar bom desempenho nos quesitos potencial de risco, uso da terra e rejeitos, as ótimas performances nas categorias consumo de recursos materiais, e potencial de toxicidade foram muito mais relevantes para o resultado da análise, considerando-se a realidade brasileira, conforme pode ser observado na Figura 32.

Figura 32: Fatores de ponderação para determinação dos índices ambientais.

O ótimo desempenho ambiental do biodiesel foi tão elevado em relação ao petrodiesel que mesmo sendo inferior economicamente, foi considerado como a opção mais ecoeficiente.

- Simulação de cenários

Para uma análise mais completa, foram ainda considerados dois cenários.

No cenário I, os efluentes líquidos oriundos da extração do óleo de dendê foram desconsiderados, pois segundo informações obtidas junto à Agropalma, estes são armazenados em lagoas artificiais para, paulatinamente, serem utilizados na irrigação do dendezal, não havendo contato algum com o corpo hídrico.

No cenário II, levou-se em consideração que a matéria-graxa resultante da transesterificação do óleo, em vez de ser descartada, será utilizada como matéria-prima em outro processo, provavelmente, para produção também de biodiesel, mas pelo processo de esterificação, o que já vem sendo utilizado pela Agropalma.

Dessa forma, a matéria-graxa deixa de ser considerada resíduo sólido, passando a ser considerada como co-produto. A alocação mássica que havia sido feita durante a análise do inventário para o biodiesel e glicerina é refeita, considerando-se também os 3,08 kg de matéria graxa. O fator de alocação para o biodiesel passa a ser, portanto, 82%.

Além disso, descontou-se do custo total o ganho de R\$ 0,24 por quilo com a venda da matéria-graxa, valor este estimado pela própria Agropalma.

As figuras 33 e 34 representam as matrizes de ecoeficiência para as situações propostas I e II, respectivamente, comparadas com o resultado anteriormente obtido para que dessa forma, seja possível verificar as alterações ocorridas.

Figura 33: Matriz de ecoeficiência para o cenário I

Figura 34: Matriz de ecoeficiência para o cenário II

A diferença observada com a simulação das duas situações propostas é perceptível, principalmente quando a alteração é feita no efluente líquido do óleo de dendê (cenário I), pois conforme dito anteriormente, a categoria dos efluentes líquidos é a mais relevante na composição dos rejeitos. Porém, ainda assim, neste quesito, o petrodiesel apresenta melhor desempenho.

O aproveitamento da matéria graxa (cenário II) acentuou ainda mais, a superioridade ambiental do biodiesel, mas a diferença entre as duas alternativas no quesito econômico, permanece favorável ao petrodiesel.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise mostrou que apesar do biodiesel apresentar pior desempenho em relação ao petrodiesel nas categorias potencial de risco, uso da terra e rejeitos, as ótimas performances apresentadas nos quesitos potencial de toxicidade e consumo de recursos materiais foram suficientes para torná-lo a opção mais vantajosa ambientalmente.

A vantagem do biodiesel nas categorias potencial de toxicidade e consumo de recursos materiais é justificada, principalmente, pelo reduzido consumo de recursos materiais e a baixa toxicidade do produto, pois as matérias-primas necessárias para sua formação (o etanol e o óleo de dendê) têm caráter renovável e, durante a produção do petrodiesel existe o contato com muitos hidrocarbonetos voláteis, algo que não ocorre com o biodiesel.

Ainda que sob o critério econômico o petrodiesel tenha se apresentado como a opção mais favorável, a diferença observada é muito reduzida frente à notada no quesito ambiental, em favor do biodiesel. Por esse motivo, teve-se como resultado, o biodiesel como opção mais ecoeficiente.

Pode-se dizer que o uso da análise de ecoeficiência da BASF atendeu aos objetivos propostos para este trabalho, pois fornece informações que poderão auxiliar na tomada de decisões sobre a consolidação do uso do biodiesel no Brasil e também contribui com inventários do ciclo de vida, que poderão auxiliar no desenvolvimento de um banco de dados de ACV, representativos da realidade brasileira.

Releva notar, porém, uma limitação desta análise de ecoeficiência, que diz respeito à forma de agregação das categorias: o cálculo dos fatores de ponderação é, em parte, subjetivo, visto que é difícil mensurar o que é realmente mais significativo para o meio ambiente.

Cabe ressaltar algumas dificuldades encontradas durante a execução deste estudo. Primeiramente, quanto ao grande número de informações necessárias para compor o inventário do ciclo de vida. A fase de coleta de dados apresentou vários empecilhos, pois não existe um banco de dados brasileiro para apoio a estudos de ACV, o que exige do usuário da técnica um grande esforço na obtenção dos dados.

Além disso, para a realidade brasileira, a obtenção de dados primários é muito difícil, pois muitas indústrias consideram confidenciais os elementos necessários; este foi o caso da Petrobras, que disponibilizou poucas informações para a consecução deste trabalho, o que resultou, em um inventário para o petrodiesel com a grande maioria dos dados estimada com base em literatura especializada e em banco de dados estrangeiros.

Algumas recomendações são sugeridas, portanto, para o aprimoramento deste trabalho. Em primeiro lugar, que seja feita uma ampliação do estudo, considerando-se as etapas de distribuição e uso dos combustíveis, pois é sabido que o biodiesel apresenta vantagens ambientais em sua queima frente ao petrodiesel, mas não se sabe como ficaria a logística de distribuição do mesmo e, portanto, quais impactos ambientais e econômicos esta acarretaria.

Além disso, outro fator que pode afetar os resultados da análise ao se considerar essas etapas, diz respeito aos custos do biodiesel, pois o governo, conforme visto durante revisão bibliográfica, estabeleceu diferentes taxas a serem cobradas, variando quanto ao uso ou não da agricultura familiar, quanto ao tipo de óleo vegetal utilizado e quanto à região de produção da matéria-prima.

Recomenda-se ainda, que seja feita uma adequação da análise de ecoeficiência da BASF para o Brasil, pois algumas categorias, como a dos resíduos sólidos, são calculadas levando-se em consideração a realidade européia. Além disso, convém verificar a possibilidade de se incluir na análise, os aspectos relacionados a efluentes líquidos e emissões atmosféricas que, atualmente, não são considerados, como é o caso do monóxido de carbono.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOISSA ÓLEOS VEGETAIS. **Óleo de Palma**. São Paulo. Disponível em: <http://www.aboissa.com.br/palma/index.htm> Acesso em : 11 de mai. de 2005.

ABICLOR. **Anuário Estatístico 2004**. Disponível em: http://www.abiclor.com.br/?a=down_visualizar&id=27

Acesso em: 17 de abr. de 2006.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Sistemas de gestão ambiental – Especificações e diretrizes para uso – NBR ISO 14001**. Rio de Janeiro, 1996

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. NBR ISO 14040**. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição e objetivo e escopo e análise de inventário. NBR ISO 14041**. Rio de Janeiro, 2004.

AGROBYTE – Semeando Informações. **Cana-de-açúcar (*Saccharum hybridas*)**. Disponível em: <http://www.agrobyte.com.br/cana.htm> Acesso em: 2 de mai de 2006.

AGUIAR, F. Colaborador da Petrobio - Indústrias e Comércio de Equipamentos e Processos para Biodiesel LTDA. **Comunicação pessoal**. 2005.

ALE Combustíveis. **A ALE saiu na frente. A primeira distribuidora do país a comercializar o biodiesel**. Disponível em: http://www.ale.com.br//area/lst_conteudo.asp?cod_conteudo=546&cod_area=5&tip_area=L Acesso em: 11 de jun. de 2006

ALMEIDA, M.C. **Sustentabilidade de Sistemas Energéticos à base de Biomassa Vegetal: Avaliação de Ciclo de Vida e de Externalidades aplicados aos Produtos da Cana-de-Açúcar**. Tese (Doutorado (em elaboração)). Instituto de Eletrotécnica e Energia - USP. São Paulo, 2006.

ALMEIDA, M.C.; MOREIRA, J.R. **Life cycle inventory analysis of sugarcane ethanol: Investigating renewable fuels environmental sustainability in Brazil**. Congresso SAE Brasil, 2005.

ALVES, A.A. No início soja será matriz energética principal. [Depoimento a Ibiapaba Netto]. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 20 jul. 2005. Agrícola, Caderno G, p.G7.

ANP, Agência nacional de petróleo. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo e do gás natural 2002**. Disponível em: http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_2004.asp. Acesso em: 22 de mar. de 2005a.

_____. **Importações e Exportações (metros cúbicos)**. Disponível em: http://www.anp.gov.br/doc/dados_estatisticos/Importacoes_e_Exportacoes_m3.xls. Acesso em: 21 de mar. de 2005b.

_____. **Petróleo e Derivados - Editorial de Refino de Processamento de Gás Natural**. Disponível em: http://www.anp.gov.br/petro/refino_editorial.asp. Acesso em: 22 de mar. de 2005c.

_____. **Produção Nacional de Derivados de Petróleo (metros cúbicos)**. Disponível em: http://www.anp.gov.br/doc/dados_estatisticos/Producao_de_Derivados_m3.xls. Acesso em: 21 de mar. de 2005d.

_____. **Produção Nacional de Petróleo e LGN (metros cúbicos)**. Disponível em: http://www.anp.gov.br/doc/dados_estatisticos/Producao_de_Petroleo_m3.xls. Acesso em: 21 de mar. de 2005e.

_____. **Volume de Petróleo Refinado nas Refinarias Nacionais (metros cúbicos).** Disponível em:

http://www.anp.gov.br/doc/dados_estatisticos/Processamento_de_Petroleo_m3.xls

Acesso em: 21 de mar. de 2005f.

_____. **Capacidade Autorizada de Plantas de produção de biodiesel.** Disponível em: http://www.anp.gov.br/petro/capacidade_plantas.asp

Acesso em: 11 de jun. de 2006a.

_____. **Leilões.** Disponível em: http://www.anp.gov.br/petro/leilao_biodiesel.asp

Acesso em: 11 de jun. de 2006b.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE TRABALHO. **Quantidade de acidentes do trabalho registrados, por motivo, segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) no Brasil – 2001/2003.** Capítulo 1 – Brasil e Grandes Regiões. Disponível em:

http://www.previdenciasocial.gov.br/AEAT2003/docs/3Act01_01.xls

Acesso em: 17 de abr. de 2006.

ARANDA, D. **Biodiesel Production: First Generation in Brazil.** World Fuels Conference 2005. Disponível em:

http://www.eq.ufrj.br/docentes/donato_web/world_fuels_conference.pdf Acesso em:

8 de dez. de 2005.

ASSIS, P. C. O. et al. **Resposta dos parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar a diferentes lâminas de irrigação e adubação.** Revista de Biologia e Ciências da Terra. vol.4. nº 2. 2004.

AZANIA, A. A. P. M. Et al. **Emergência e desenvolvimento de guanxuma (*Sida rhombifolia*), capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) e cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) influenciados por subprodutos da destilação do álcool.** Planta daninha. vol.22. nº.3. 2004.

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

BASF. The Chemical Company. **Desenvolvimento Sustentável: Fundação Espaço Eco é uma realidade agora na América Latina**. Disponível em: <http://www.basf.com.br/web/item.asp?id=41320>. Acesso em: 20 de mai. de 2005.

BASF. The Chemical Company. **Sustainability: Innovative fertilizer comes out ahead in eco-efficiency comparison**. Disponível em: <http://www.corporate.basf.com/en/sustainability/presse/pm.htm?pmid=2135&id=U6kca8mSBbcp0e9>. Acesso em: 12 de jun. de 2006.

BATISTA, A. C. F. **Resumo Histórico – No princípio, Diesel usou óleo vegetal**. 2005. Disponível em: <http://mbdobrasil.com.br/html/modules.php?name=News&file=article&sid=738>. Acesso em: 22 de set. de 2005.

BEN, **Balanco Energético Nacional**. Elaborado pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil. Brasília, 2003.

BORGES, F. J. **Inventário Brasileiro do Ciclo de Vida do PVC**. Dissertação – Escola Politécnica USP. 173p. São Paulo, 2004.

BRITTO, M. Gerente de operações do Grupo Agropalma. **Comunicação pessoal**. 2005.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono**. Tese (Doutorado) – Escola de Agricultura Luiz de Queiroz USP. 103p. São Paulo, 2003.

CENTRE FOR DESIGN. *Australian lca inventory data project - download page: Refinery production.* Disponível em: <http://simapro.rmit.edu.au/lca/datadownloads.html> Acesso em: novembro de 2005.

CERRI, C. C. Professor titular da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). **Comunicação pessoal.** 2005

CERRI, C. C. Professor titular da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). **Comunicação pessoal.** 2006

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos. Ferramenta gerencial da ISO 14000.** 1998.

COLTRO, L.; GARCIA, E.E.C. ; QUEIROZ, G.C. **Life Cycle Inventory for Eletric Energy System in Brazil.** International Journal of Life Cycle Assessment, 8 (5), 2003.

COPERSUCAR **Álcool.** Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/alcool.asp>. Acesso em: 05 de jun. de 2005

CORDEBELLO, D. M.; BRASIL, F.; PEREIRA, L. M. **Riscos no setor alimentação e trabalho rural.** Seminário de Engenharia de Segurança do Trabalho. UFSCAR. São Carlos. Disponível em: <http://www.simucad.dep.ufscar.br/ptbmain.html> Acesso em: 14 de mar de 2006.

CRESTANA, S. **Matérias-primas para a produção de Biodiesel: Priorizando Alternativas.** São Paulo, 2005. Disponível em: http://www21.sede.embrapa.br/a_embrapa/unidades_centrais/gpr/publicacoes/institucional/Palestra_Diretor_Presidente_Produção_Biiodiesel.pdf Acesso em: 13 de jun de 2005.

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

DEL VECCHIO, E. Acessor da diretoria da DEDINI – Indústria de Base. **Comunicação pessoal**. 2006.

DNIT – DISTÂNCIA ENTRE CIDADES. Disponível em: www.dnit.gov.br/rodovias/distancias/distancias.asp. Acesso em: 23 jan. 2006.

EUR-Lex-32001L0059-EN. **Directiva 2001/59/CE da Comissão, de 6 de Agosto de 2001, que adapta ao progresso técnico pela vigésima oitava vez a Directiva 67/548/CEE do Conselho, relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas respeitantes à classificação, embalagem e rotulagem das substâncias perigosas**. Jornal Oficial nº L 225. Disponível em: <http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32001L0059:PT:HTML>. Acesso em: 05 de jun de 2006.

FAVA, J. A. (Ed.); et al. **A Technical framework for Life-cycle Assessment**. Washington: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) and SETAC Foundation for Environmental Education, 1991.

FELIX, A. R. Entrevista a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Biodiesel deve estimular produção de óleos vegetais**. Disponível em: http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=177&cod_pai=75. Acesso em: 26 de set de 2005.

FIGUEIRA, S. R. **Os programas de álcool como combustíveis nos EUA, no Japão e na União Européia e as possibilidades de exploração do Brasil**. Tese (Doutorado) – Escola de Agricultura Luiz de Queiroz USP. 245p. São Paulo, 2005.

FREITAS et al. **Acidentes de Trabalho em plataformas de petróleo da Bacia de Campos, Rio de Janeiro, Brasil**. Cad. Saúde Pública, vol. 17 nº1. Rio de Janeiro, 2001.

GABI 4. The software system for Life Cycle Engineering: PE Europe GMBH Life Cycle Engineering. 1 CD-ROM: GABI extension Database II. **BR Crude oil mix (1995)**. Stuttgart, 2004.

GRUPPE ENERGIE-STOFFE-UMWELT et al.: **Ökoinventare von Energiesystemen, Bundesamt für Energie-wirtschaft (Schweiz)**, ENET, 1996.

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

ISAE – FGV, **Projeto Potencialidades Regionais Estudo de viabilidade econômica do Dendê**. São Paulo, 2005.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14042 - Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment**. Genebra, ISO, 2000.

KALTNER, F. J. **Agroindústria do Óleo de Palma no Pará**. Pará, 1997

KICHERER, A., et al. **Ökoeffizienz-Analyse der BASF AG**. Maske in MS Excel 97, Ludwigshafen 2001.

KOHL, S. *Ethanol 101-7: Dehydration*. *EthanolToday*. Disponível em: <http://www.ethanol.org/documents/Ethanol101.7.pdf>. Acesso em: 26 de set. de 2005.

LEI Nº 11.097. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/blei200511097.pdf> Acesso em: 26 de set. de 2005.

LEI N° 11.241. Disponível em:
http://www.cqgp.sp.gov.br/grupos_tecnicos/gt_licitacoes/legislacao/lei_11241_02.htm#08 Acesso em: 28 de abr. de 2005.

LEI N° 11.116. Disponível em:
<http://www.receita.fazenda.gov.br/Legislacao/Leis/2005/lei11116.htm> Acesso em: 11 de jun de 2006.

MACEDO, I. C; NOGUEIRA, L. A. H. **Avaliação do Biodiesel no Brasil _revisado.** CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2004.

MACEDO, I.C. et al. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol o Brasil.** São Paulo. 2004

MACHADO e SILVA, C.F.P. Engenheiro de Processamento da REDUC. **Comunicação pessoal.** 2006.

MAHESH, S. K. *Pervaporation: An Overview. Online Chemical Engineering Information.* Disponível em: <http://www.cheresources.com/pervaporation.shtml>. Acesso em 02 de mai. de 2006.

MARQUES, L.G. C. Responsável pela planta piloto de biodiesel IVIC/UFRJ. **Comunicação pessoal.** 2005.

MDIC – ALICE Web, 2005. Disponível em: <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/> Acesso em: 10 de jun. de 2005.

MENANI, R. **No passado e no presente, sempre uma alternativa.** Revista Biodiesel e Agronegócios. Ed. Letra Boreal. Ano 1. N° 1. 2005.

MOTA et. al. **Biogasolina: uma alternativa para o Aproveitamento da Glicerina.** Instituto de Química Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

http://www.biodiesel.gov.br/docs/05_claudiomotaglicerina.ppt#1 Acesso em: 25 de fev. de 2006.

MÜLLER, A. A. **A Cultura do dendê**. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. Belém, 1980.

NEIVA, J. **Conheça o Petróleo**. 6ª edição. Expressão e Cultura. Rio de Janeiro, 1993

OLIVEIRA, L. L. F. Engenheiro de processamento da Petrobras/REDUC. **Comunicação Pessoal**. 2005

OMETTO, A.R. **Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Paulo USP. São Carlos, 2005.

PARENTE, J. S. **Biodiesel: Uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**. Ceará, 2003.

PETROBIO, Indústrias e Comércio de Equipamentos e Processos para Biodiesel LTDA. **Relatório – Biodiesel: Aspectos Atuais e Viabilidade de Aplicação**. 2004.

PETROBRAS, **A Indústria do Petróleo – A perfuração em terra e no mar**. Disponível em:

http://www2.petrobras.com.br/minisite/sala_de_aula/petroleo/perfuracao_terra.stm.

Acesso em: 22 de mar. de 2005

PORTAL BR, **Óleo Diesel**. Disponível em:

http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf#http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf/CVview_postospetro/05?OpenDocument

Acesso em: 21 de mar. de 2005

PORTAL BR, Petrobras. **Distribuidora lança campanha dos 500 postos com biodiesel.** Disponível em: <http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf> Acesso em: 11 de jun de 2006.

PORTAL ÚNICA, **Preços do mercado de açúcar e álcool – Cotações Diárias.** Disponível em:
<http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=home&SubSecao=cotações%20tabe>
[la](#) Acesso em: 17 de fev. de 2006.

PORTARIA ANP N° 255. Disponível em:
<http://www.anp.gov.br/doc/anuario2004/Q6.1.pdf>
 Acesso em: 26/09/2005.

PRÉ-CONSULTANTS. Idemat 1996. **Barge I.** SimaPro. Versão 5.1. 2003a.

PRÉ-CONSULTANTS. Idemat 2001. **Energy Oil I.** SimaPro. Versão 5.1. 2003b.

PRÉ-CONSULTANTS. ETH – Archive 1994. **Truck 16 ton.** SimaPro. Versão 5.1. 2003c.

PRIESEMUTH, B. **Relatório do exame de métodos relativos à validação do método de Análise de ecoeficiência da BASF AG.** Ludwigshafen, 2001

PROCANA. **Um mercado de R\$ 40 bilhões.** Disponível em:
<http://www.canaweb.com.br/Conteudo/Conheca%20o%20Setor.asp>. Acesso em: 24 de abr. de 2006.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL. **Objetivos e Diretrizes.** Disponível em:
<http://www.biodiesel.gov.br/programa.html#seccaoObjetivos> Acesso em: 26 de set. de 2005.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL. **Regime Tributário.** Disponível em:

<http://www.biodiesel.gov.br/programa.html#seccaoRegime> Acesso em: 11 de jun. de 2006.

QUINTÃO, C. Biodiesel pode ser compulsório já... **Gazeta Mercantil**. São Paulo, 24 ago. 2005. Finanças e Mercados, Caderno B, p. B-12.

RAMOS, L. P. et al. **Biodiesel – Um projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil**. Revista Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento. Edição nº 31. 2003.

RAMOS, D. A. R.; SOUZA, J. G. **As transformações do setor sucroalcooleiro e seus impactos na composição orgânica do capital: Uma análise do setor no Município de Sertãozinho – SP**. VI Semana de Geografia - FCT/Unesp - Presidente Prudente. Realizada de 16 a 20 de maio de 2005. Disponível em: http://www2.prudente.unesp.br/eventos/semana_geo/dulcineiarissattiramos.pdf Acesso em: 06 de mai de 2006.

RESENDE, A.S. et al. **Efeito Estufa e o Seqüestro de Carbono em Sistemas de Cultivo com Espécies Florestais e na Cultura de Cana-De-Açúcar**. EMBRAPA Publicações on line. Ciclagem de Nutrientes. DOC 133. Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/cicl_nutr.html . Acesso em: 20 de abr. de 2006.

REINHARDT, G.A. et al. **Resource and Emission Balances: rapessed oil and RME in comparison with diesel fuel**. Berlim, 1999.

RIBEIRO, P. H. **Modelagem de Sistemas de Produto em Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV**. Dissertação – Escola Politécnica USP. 135p. São Paulo, 2004.

RITTNER, H. **Óleo de Palma: tecnologia e utilização**. São Paulo, 1996.

SACIOTO, R. F. Z. **Inserção do gene PR5K em cana-de-açúcar visando induzir resistência ao fungo da ferrugem.** Dissertação – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz USP. 74 p. Piracicaba, 2003.

SAGRI – Secretaria da Agricultura. *Produção Agrícola Municipal – PAM 2004.* Disponível em: www.sagri.pa.gov.br/dados.htm. Acesso em: 26 de jan. de 2006

SALING, P. Colaborador BASF_AG e especialista em Ecoeficiência. **Comunicação pessoal.** 2005

SALING, P. Colaborador BASF_AG e especialista em Ecoeficiência. **Comunicação pessoal.** 2006

SALING, P. et al. **Eco-efficiency analysis by BASF: The Method.** International Journal of Life Cycle Management. N° 7. vol.4. 2002.

SANTOS, J. A. **Óleo diesel.** 5ª edição. Guanabara Comunicação Ltda. Rio de Janeiro, 2000.

SCHMIDT, J. **The importance of system boundaries for LCA on large material flows of vegetable oils.** Text version of poster presented to the Fourth World SETAC Congress, 14-18. Portland, Oregon, USA. 2004

SEAGRI - Secretaria de Agricultura Irrigação e Reforma Agrária. **Cultura do Dendê.** Disponível em: <http://www.bahia.ba.gov.br/seagri/Dende.htm> Acesso em: 13 de jun. de 2005.

SEAGRI - Secretaria de Agricultura Irrigação e Reforma Agrária. **Cultura – Cana-de-açúcar.** Disponível em: <http://www.bahia.ba.gov.br/seagri/canaac1.htm> Acesso em: 13 de jun. de 2006.

SEQUEIRA, L. **Fatos históricos, desenvolvimento e políticas públicas do Biodiesel**. Revista Biodiesel e Agronegócios. Ed. Letra Boreal. Ano 1. Nº 1. 2005.

SETRAN – SECRETARIA EXECUTIVA DE TRANSPORTES. Disponível em: www.setran.pa.gov.br/distancias.php. Acesso em: 23 jan. 2006

SHEEHAN et al. **Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for use in an Urban Bus**. Prepared for U.S. Department of Energy's Office of fuels Development and U.S. Department of Agriculture's office of Energy. USA, 1998.

SILVA, O. C. **Análise do aproveitamento econômico e energético do óleo de palma na Guiné-Bissau na perspectiva do desenvolvimento sustentável**. Dissertação – Programa Interunidades em Energia. EP/IEE/FEA/IF USP. 192p. São Paulo, 1997.

SILVA, O. C. et al. **Potencial de mitigação de gases estufa pela indústria de óleo de palma visando a captação de recursos do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. In: 3º Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, 2000. Disponível em: www.proceedings.scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200043&Ing=en&nrm=abn. Acesso em: 7 de abr. de 2006.

SOUSA, S. A. V. **Vinhaça: o avanço das tecnologias de uso**. In: A energia da cana-de-açúcar. Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. Organizador: Macedo, I.C. São Paulo, 2005.

SOUZA, C.A.V. **Análise de Acidentes de Trabalho em Indústrias de Processo Contínuo – Estudo de Caso na Refinaria de Duque de Caxias, RJ**. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação. Rio de Janeiro, 2000.

SOUZA, C.A.V; FREITAS, C.M. **Perfil dos acidentes de trabalho em refinaria de petróleo**. Revista de Saúde Pública. vol 36. nº 5. São Paulo, 2002.

SOUZA, E. Representante AHIMOR – Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental. **Comunicação pessoal**. 2006.

TORRES, E. A. **Combustão pulsativa da casca do dendê**. Dissertação - Escola Politécnica USP. 120p. São Paulo, 1990.

TOWNSEND, C.R. **Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia**. EMBRAPA-CPAF. nº21. Rondônia, 2000.

VIANNA, F. C.; SILVA, G.A.; ZANCHETTA, M. T. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel de dendê**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ). São Paulo, 2006.

WENZEL, H; HAUSCHILD, M; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products. Vol. 1 – Methodology, tools and case studies in product development**. 2nd ed. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts, 2000.

YUSSOF, S.; HANSEN, S. B. **Feasibility Study of Performing an Life Cycle Assessment on Crude Palm Oil Production in Malaysia**. International Journal of Life Cycle Assessment. LCA Case studies. Online First: Agosto de 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2005.08.226> . Acesso em: 4 de jan. de 2006.

ZANCHETTA-URSO, M.; SILVA, G. A. **Análise de Ecoeficiência – Estudo de caso no Brasil**, Apresentado em CILCA (Conferência Internacional de Ciclo de Vida). Costa Rica, 2005.

ZANCHETTA, M. Vice-presidente executiva da Fundação Espaço ECO e diretora de Ecoeficiência. **Comunicação Pessoal**. 2005.

ANEXO A – Questionário de percepção

Análise de Ecoeficiência é uma ferramenta que auxilia na tomada de decisões, a partir da comparação intrínseca de produtos e processos, baseada no estudo dos pilares econômico e ambiental, onde ambos são tratados com igual importância.

Este questionário servirá como base para a ponderação das categorias de ecoeficiência para análises realizadas no Brasil, tendo como objetivo registrar a percepção da sociedade em relação a eventuais problemas ao meio-ambiente.

Instruções:

Deve ser atribuído o **valor em porcentagem** para cada item de cada grupo. Sendo que quanto maior a porcentagem atribuída mais importante ele é para você.

Os grupos estudados são Categorias de ecoeficiência, Tipos de emissões e Impactos ambientais. **Todos os itens devem ter valores atribuídos** e, devem somar 100%.

Não existe valor certo ou errado, e sim, apenas, a percepção individual da importância dos assuntos tratados.

Abaixo das tabelas, pode ser encontrado um pequeno resumo sobre os itens apontados.

Categorias de ecoeficiência		
Nota		
Consumo de recursos materiais		%
Consumo de recursos energéticos		%
Rejeitos		%
Potencial de toxicidade		%
Potencial de risco		%
Uso da terra		%

Tipos de emissões		
Nota		
Emissões atmosféricas		%
Efluentes líquidos		%
Rejeitos		%

Impactos ambientais		
Nota		
Efeito estufa		%
Deformação da camada de ozônio		%
Formação fotoquímica do ozônio		%
Chuva ácida		%

Consumo de recursos materiais e energéticos - estas categorias enfocam o uso da água e a extração de recursos naturais para consumo como fonte energética e como matérias-primas de processos industriais.

Potencial de toxicidade - a exposição a substâncias tóxicas através do ar, água ou solo, especialmente através da cadeia alimentar causa problemas à saúde humana.

Potencial de risco - apresenta os riscos operacionais ao trabalhador ou consumidor ao manusear o produto ou realizar um processo, bem como os riscos ambientais envolvidos.

Uso da terra - a utilização e alteração das características da terra são apontadas nesta categoria de ecoeficiência.

Efeito estufa - quantidades crescentes de dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), aerossóis e outros gases na atmosfera terrestre estão conduzindo a uma absorção cada vez maior das radiações emitidas pela terra, levando a um aquecimento global.

Deformação da camada de ozônio - a exaustão da camada de ozônio conduz a um crescimento na quantidade de raios ultravioleta que atingem a superfície da terra, o que pode resultar no crescimento de doenças, danos a

diversos tipos de materiais e interferência com o ecossistema.

Formação fotoquímica do ozônio - sob a influência dos raios ultravioleta, os óxidos de nitrogênio reagem com as substâncias orgânicas voláteis, produzindo oxidantes fotoquímicos que causam o nevoeiro (smog fotoquímico).

Chuva ácida - a deposição ácida (chuva ácida), resultante da emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre para a atmosfera, para o solo ou para a água pode conduzir a mudanças na acidez da água e do solo, com efeito tanto sobre a fauna quanto sobre a flora.