



Análise Energética e Ambiental de Ciclo de Vida do óleo de palma na Colômbia

Jaime Filipe Oliveira Rodrigues dos Santos

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Pedro Carvalheira (Prof. Aux. Un. Cbr)

Orientador: Fausto Freire (Prof. Aux. Un. Cbr)

Vogais: José Costa (Prof. Aux. Un. Cbr)

Setembro de 2008

Agradecimentos

Ao professor Fausto Freire, pelo empenho, compreensão, e acima de tudo, por acreditar em mim, o meu agradecimento.

Ao João Nunes, aos colegas de Engenharia Mecânica e Ambiente, ao professor João Malça, por me ajudarem sempre que precisei, o meu agradecimento.

À minha família, em especial a minha mãe, que tanto esperou e sofreu para viver este momento, o meu agradecimento.

Aos meus amigos, que vou obrigar a ler esta tese, o meu agradecimento.

E finalmente à Beatriz, que me ensina todos os dias a dar valor às “pequenas coisas”, e que vale a pena lutar por aquilo que se gosta, aqui vai uma prenda de casamento!

Resumo

A indústria do óleo de palma desempenha um papel cada vez mais importante no desenvolvimento económico da Colômbia, principalmente no ramo da energia. No entanto, têm surgido algumas controvérsias relativamente a este tipo de indústria, nomeadamente no que diz respeito a questões ambientais. Sendo assim, foi implementado um estudo de ciclo de vida, no qual são avaliados os principais impactes ambientais associados ao processo produtivo, e calculados indicadores de eficiência energética. A ACV tem como base um modelo descritivo do sistema produtivo e o ICV, cujos resultados foram calculados usando dados físicos do processo. A multi-funcionalidade do processo foi estudada com dois métodos – alocação de massa e expansão de sistema –, de forma a perceber quais os efeitos dos co-produtos nos impactes ambientais associados ao ciclo de vida do óleo de palma. Recorrendo ao método CML 2000, foram identificados como principais responsáveis dos impactes ambientais mais significativos, o uso de fertilizantes e de combustíveis fósseis. É analisada a resposta do sistema à aplicação de cenários alternativos: aproveitamento de metano (CH_4) e balanço de carbono relativo à transformação das terras. Na produção de 1 tonelada de óleo de palma verificou-se que, para o impacte de “aquecimento global”, o aproveitamento do metano libertado no tratamento de efluentes, evita a emissão de 753,39 kg de $\text{CO}_2\text{-eq}$, e tem um potencial energético de $2,32\text{E}+03$ MJ, que pode ser aproveitado. A aplicação de um balanço de carbono, relativo à transformação de terras em plantações de palma (Savana; floresta tropical com solo mineral; floresta tropical com solo turfoso), altera os valores de -851,89 kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ para -2019,95; 4828,72; e 10680,98 kg $\text{CO}_2\text{-eq}$, respectivamente. A aplicação de expansão de sistema afecta a produção de côco, soja e colza, e apresenta resultados de ACV bastante distintos dos obtidos com alocação de sistema. O balanço energético do sistema do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia apresenta um valor positivo de 3,47. São calculados indicadores de energia com base no inventário, para demonstrar que o ciclo de vida do óleo de palma apresenta um balanço energético positivo. Foi calculado um valor de 71,21% para a eficiência de renovabilidade energética, *ERenEf*.

Palavras-chave: Óleo de palma, ACV, $\text{CO}_2\text{-eq}$, emissões, eficiência energética.

Abstract

The palm oil industry plays an increasingly important role in economic development in Colombia, particularly in the energy industry. However, some controversies have arisen in this type of industry, particularly with regard to environmental issues. So was implemented a study of life cycle, in which are assessed the main environmental impacts associated with the production process, and calculated energy efficiency indicators. The LCA is based on a model describing the production system and the LCI, whose results were calculated using physical data of the process. The multi-functionality of the case was investigated by two methods – mass allocation and system expansion – in order to understand what the effects of co-products in the environmental impacts associated with the life cycle of palm oil. Using the method CML 2000, were identified as the main responsible of most significant environmental impacts, the use of fertilizers and fossil fuels. It has been examined the response of the system to the application of alternative scenarios: use of methane (CH₄) and carbon balance on the processing of land. In the production of 1 tone of palm oil it was found that for the impact of "global warming", the avoided emission of methane produced in POME treatment produces savings of 753.39 kg CO_{2-eq}, and has a energy potential of 2.32 MJ +03, which can be exploited. The application of a carbon balance on "land use" for plantations of palm (Grassland; Tropical Forest with mineral soil; tropical forest soil with peat soil), amending the values of -851.89 kg CO_{2-eq} to -2019.95; 4828.72 and 10680.98 kg CO_{2-eq}, respectively. The application for system expansion affects the production of coconut, soybean and rapeseed, and presents different LCA results than those obtained with allocation. The energy balance of the system of the life cycle of palm oil in Colombia presents a positive value of 3.47. Energy indicators are calculated with basis on the inventory, to demonstrate that the life cycle of palm oil presents a positive energy balance. It was calculated a value of 71.21% for the efficiency of energy renewability, *ERenEf*.

Key-Words: Palm oil, LCA, CO_{2-eq}, emissions, energy efficiency.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
ÍNDICE	iv
Índice de Tabelas	vi
Índice de Figuras	vii
Índice de Equações	vii
Nomenclatura	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Objectivos da tese	1
1.2 Recolha de dados	2
1.3 Estrutura da Tese	2
2 “STATE OF THE ART”: PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Óleo de palma e o biodiesel.....	4
2.3 Estudos de eficiência energética e avaliação ambiental de ciclo de vida.....	5
2.4 Potencial para melhoria de ciclo de vida.....	6
2.5 Óleo de palma: Questões ambientais.....	9
3 METODOLOGIA: Avaliação ambiental e Energética de ciclo de vida (ACV)	12
3.1 Enquadramento e objectivos	12
3.2 Inventário de ciclo de vida, Fronteiras de Sistema e Multi- funcionalidade.....	13
3.3 Avaliação de impactes ambientais de Ciclo de Vida	14
3.4 Avaliação energética do ciclo de vida (AECV)	17
4 MODELAÇÃO E INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	18
4.1 Modelo geral e fronteiras do sistema.....	18

4.2 Inventário do ciclo de vida.....	20
4.2.1 Plantação e Colheita.....	20
4.2.1.1 <u>Emissões relativas ao uso de Fertilizantes</u>	<u>22</u>
4.2.1.2 <u>Conversão de Terras: Implicações no Balanço de Carbono.....</u>	<u>26</u>
4.2.2 Planta extractora	31
4.2.3 Tratamento de Efluentes	35
4.3 Alocação de massa e Expansão de sistema.....	37
4.4 Cenários Alternativos	39
4.5 Hipóteses simplificadoras e limitações do estudo	40
5 Resultados: Avaliação ambiental e Energética de ciclo de vida.....	41
5.1 Sistema principal	41
5.2 Cenários alternativos	44
5.3 Indicadores de Eficiência Energética	46
6 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
Apêndice 1 Plantação e colheita.....	I
Apêndice 2 Tratamento de Efluentes	II
Apêndice 3 Eutrofização.....	III
Apêndice 4 Aquecimento Global.....	IV
Apêndice 5 Ecotoxicidade de Recursos Marinhos.....	V
Apêndice 6 Depleção Abiótica.....	VI
Apêndice 7 Acidificação.....	VII
Apêndice 8 Sistema principal normalizado. Método: Eco-Indicador 99	VIII

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Resíduos de biomassa no ciclo de vida do óleo de palma.....	6
Tabela 3.1 Categorias de Impacte Ambiental do “Eco-indicator 99 (E) V2.1 / Europe EI 99 E/E”.....	16
Tabela 3.2 Categorias de Impacte Ambiental do CML 2 baseline 2000 V2.1 / West Europe, 1995	16
Tabela 4.1 Coeficientes de relação entre entradas e saídas da planta extractora	19
Tabela 4.2 Fertilizantes aplicados na plantação	21
Tabela 4.3 Inventário do ciclo de vida para a plantação e colheita.....	22
Tabela 4.4 Emissões directas de N ₂ O na fase de plantação e valores dos parâmetros necessários para a equação do cálculo das emissões.....	24
Tabela 4.5 Emissões directas de NO na fase de plantação e valores dos parâmetros necessários para a equação do cálculo das emissões de NO	24
Tabela 4.6 Emissões de nitratos provenientes do balanço de N.....	25
Tabela 4.7 Emissões indirectas de N ₂ O	25
Tabela 4.8 Total de emissões do balanço de N	25
Tabela 4.9 Carbono presente numa plantação de palma na Malásia.....	27
Tabela 4.10 Balanço de Carbono relativo na conversão de terras para a vida das plantações de palma (20 anos), em ton.CO ₂ -eq/ha	31
Tabela 4.11 Balanço anual de carbono relativo na conversão de terras, em ton.CO ₂ -eq/ha.....	31
Tabela 4.12 Partilha das diferentes tecnologias para a energia eléctrica na Colômbia.....	32
Tabela 4.13 Propriedades energéticas dos co-produtos	33
Tabela 4.14 Emissões na caldeira, em função da massa de combustíveis (fibras+cascas).....	34
Tabela 4.15 Inventário para o ciclo de vida do óleo de palma na Planta extractora	34
Tabela 4.16 Características dos efluentes em função de 1 tonelada de POME	35
Tabela 4.17 Inventário de ciclo de vida do tratamento de efluentes, em função de 1 tonelada de efluentes	37
Tabela 4.18 Resultados do balanço de massa e energia entre a palma e o côco.	39
Tabela 4.19 Resultados do balanço de massa e energia entre a colza e a soja.....	39
Tabela 5.1 Resultados de ACV do sistema principal	43
Tabela 5.2 Comparação da ACV do óleo de palma na Colômbia e na Malásia. Método: CML 2000	43
Tabela 5.3 Implicações do aproveitamento de metano (CH ₄) no aquecimento global, em função de 1 tonelada de óleo de palma	44

Tabela 5.4 Alterações do aquecimento global resultantes da aplicação do ciclo de carbono na conversão das terras, em função de 1 tonelada de óleo de palma	44
Tabela 5.5 Resultados de ACV do óleo de palma com alocação (sistema principal) e com expansão de sistema. Método: CML 2000	45
Tabela 5.6 Balanço energético de ciclo de vida	46
Tabela 5.7 Resultados para os indicadores de energia do ciclo de vida do óleo de palma	46

Índice de Figuras

Figura 2.1 Tenera, fruto híbrido proveniente do cruzamento entre Dura e a Pisifera.....	4
Figura 3.1 Fases da avaliação de ciclo de vida (Ferrão, 1998)	15
Figura 4.1 Diagrama de fluxos do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia	19
Figura 4.2 Diagrama de fluxos do sistema plantação, colheita e recolha do fruto.....	20
Figura 4.3 Ciclo de nitrogénio (<i>IFA 2007, pág. 4</i>).....	23
Figura 4.4 Savana colombiana (Llanos de Orinoco).....	30
Figura 4.5 Fluxos da planta extractora	32
Figura 4.6 Fluxos no tratamento de efluentes	35
Figura 4.7 Expansão de sistema para a produção de 1 tonelada de óleo de palma	38
Figura 5.1 Caracterização dos resultados de ACV do sistema principal. Método: CML 2000.....	41
Figura 5.2 Normalização da ACV do sistema principal do óleo de palma. Método: CML 2000.....	42
Figura 5.3 Comparação do ACV do óleo de palma com alocação (sistema principal) e com expansão de sistema. Método: CML 2000	45

Índice de Equações

Equação 1 Cálculo das emissões de N ₂ O	24
Equação 2 Cálculo das emissões de NO	24
Equação 3 Alterações de carbono no solo devido à conversão floresta tropical – plantação de palma	29
Equação 4 balanço de massa e energia entre a colza e a soja	38

Nomenclatura

ACP – Aceite Cruo de Palma. Em português: Óleo de Palma Cru

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

AECV – Avaliação Energética de Ciclo de Vida

AGB – Above Ground Biomass. Em português: biomassa abaixo do solo

BGB – Below Ground Biomass. Em português: biomassa acima do solo

BOD – Biological Oxygen Demand. Em português: Necessidade biológica de Oxigênio

CIA – Categorias de Impacte Ambiental

CFC – Clorofluorcarbonetos

COD – Chemmical Oxygen Demand. Em português: Necessidade Química de Oxigênio

ERenEf – Energy Renewability Efficiency,%, Em português: Eficiência de renovabilidade energética

E_{req} – Requisito Energético, MJ/MJ

FU – Fodder Units. Valor nutritivo de rações para animais

GHG = GEE – Green House Gases. Em português: Gases com Efeito de Estufa

HHV– High Heating Value. Em português: Poder calorífico superior

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

LCA – Life Cycle Assessment. Em português: Avaliação de ciclo de vida

LCEA – Life Cycle Energy Assessment. Em port.: Avaliação energética de ciclo de vida

LCI – Life Cycle Inventory. Em português: Inventário do ciclo de vida

LCIA – Life Cycle Impact Assessment. Em português: Avaliação ambiental de ciclo de vida

LHV– Low Heating Value. Em português: Poder calorífico inferior

PAG – Potencial de Aquecimento Global

POME – Palm Oil Mill Effluent - Em português: Efluentes da planta extractora de óleo de palma

PKO ou **AP** – Palm Kernell Oil ou Aceite de Palmiste – Em português: Óleo de Palmiste ou óleo de amêndoa de palma

RFF – Rácimos de Fruta Fresca. Em português: Cachos de fruta fresca

RFV – Rácimos de Fruta Vacios. Em português: Cachos de fruta vazios

RME – Rapeseed Methyl Ester. Em português: Éster metílico de colza

SME – Soy Methyl Ester. Em português: Éster metílico de soja

TVFA – Total Volatil Fatty Acid. Em português: Total de ácidos gordos voláteis.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Objectivos da tese

O trabalho de investigação realizado no âmbito desta tese de Mestrado teve como principais objectivos implementar um modelo de ciclo de vida do óleo de palma, realizar uma análise energética e uma avaliação ambiental de ciclo de vida, de acordo com a série de normas *ISO 14043 (2007)*. O modelo de ciclo de vida desenvolvido na presente investigação (e os resultados obtidos) podem ser utilizado enquanto uma ferramenta de apoio à decisão no âmbito da melhoria da eficiência energética e/ou ambiental do processo produtivo do óleo de palma, no contexto do seu ciclo de vida global. Os resultados obtidos podem ser comparados com outros sistemas produtivos semelhantes, de óleo de palma ou outros óleos. Este tipo de estudos reveste-se actualmente de grande importância, tendo em consideração o aumento de produção e utilização do óleo de palma no mundo, com destaque para a sua utilização na produção de biodiesel.

Esta investigação teve por base uma colaboração existente há vários anos entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (Prof. Fausto Freire) e o Departamento de Ingeniería Mecánica da Universidad Nacional de Bogotá (Prof. Helmer Acevedo). Neste contexto, a investigação realizada teve por base o caso de estudo específico do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia, produzido pela *Manuelita Aceites S.A.*, situada em San Carlos de Guaroa, departamento de Meta, Colômbia, e ainda um estudo realizado por *Pardo et al. (2006)*, que contém dados do ciclo de vida do óleo de palma.

Foram definidos os seguintes objectivos específicos para a presente investigação:

1. Revisão de estudos da literatura técnica e científica (“state of the art”), relativos ao ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia e nos principais países produtores de óleo de Palma (Malásia, Indonésia).
2. Desenvolvimento de um modelo de ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia, incluindo a definição e identificação das fronteiras do sistema principal e três subsistemas (plantação, planta extractora e tratamento de efluentes), que estão incluídos no sistema principal.
3. Determinação do inventário de ciclo de vida do óleo de palma, com destaque para as seguintes questões:
 - Cálculo das emissões provenientes de cada um dos subsistemas (plantação, planta extractora e tratamento de efluentes), onde se englobam:
 - Cálculo das emissões provenientes da utilização de fertilizantes, através de um balanço de nutrientes, na fase de plantação e colheita.

- Cálculo das emissões de GEE relativas à conversão das terras, através de um balanço de carbono.
 - Cálculo das emissões relativas à ao tratamento de efluentes, com especial incidência para o metano (CH₄).
4. Aplicação de alocação de massa (sistema principal) e expansão de sistema (cenário alternativo) tendo em conta que os co-produtos do sistema produtivo do óleo de palma (óleo da semente de palma e torta da semente de palma) podem ter funções alternativas noutros sistemas produtivos.
 5. Cálculo de indicadores de impacte ambiental
 6. Identificar os impactes ambientais mais relevantes no ciclo de vida do óleo de palma, e os processos/produtos/emissões causadores dos mesmos.
 7. Estudar as alterações nos resultados de ACV do óleo de palma, com a aplicação de cenários alternativos.
 8. Cálculo de indicadores de eficiência energética de ciclo de vida do óleo de palma.

1.2 Recolha de dados

A investigação que conduziu à presente dissertação foi realizada com base em diversos estudos científicos, os quais permitiram em particular elaborar um inventário de ciclo de vida detalhado do óleo de palma. A grande maioria dos dados relativos ao processo principal, e entradas de materiais no sistema, e.g. fertilizantes, combustíveis, electricidade foi obtido de *Pardo et al. (2006)*, que apresenta um inventário incompleto do processo associada à empresa Manuelita Aceites, que constitui a base para o caso de estudo abordado na presente dissertação. Adicionalmente, foi efectuada uma extensa recolha bibliográfica, que permitiu identificar diversos estudos de ciclo de vida e de análise energética e ambiental do óleo de palma, os quais são citados ao longo da tese. Alguns destes estudos são relativos a realidades distintas da Colombiana, uma vez que foram retirados de trabalhos relativos à produção de palma na Malásia e Indonésia, no entanto esta limitação é aceitável e não deve ter impacte significativo nos resultados.

1.3 Estrutura da Tese

A Tese encontra-se organizada em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório. No **capítulo 2** apresenta-se o “state of the art” dos estudos de estudos de ciclo de vida e de ecologia industrial mais relevantes à investigação desenvolvida, assim como algumas informações importantes relativas ao óleo de palma. No **capítulo 3** apresentam-se as

metodologias utilizadas nesta tese. O **capítulo 4** descreve a modelação e inventário do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia. A modelação envolve o desenvolvimento de um modelo de ciclo de vida, incluindo a definição e identificação das fronteiras do sistema principal e 3 subsistemas (plantação, planta extractora e tratamento de efluentes), os quais estão incluídos no sistema principal. No **capítulo 5** são apresentados os resultados da avaliação ambiental do ciclo de vida do óleo de palma, sendo que estes resultados são obtidos através do programa informático Simapro 7.0. São ainda apresentados os resultados de uma análise energética de ciclo de vida. O **capítulo 6** engloba as conclusões mais significativas da dissertação.

2 “STATE OF THE ART”: PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o “state of the art” dos estudos relativos à produção e utilização do óleo de palma, e das questões ambientais, energéticas e de melhoria de ciclo de vida mais relevantes para a investigação aqui apresentada.

2.1 Introdução

O maior produtor mundial de óleo de palma é a Malásia. A indústria de óleo de palma na Malásia tem uma particular relevância económica e social. Os dados revelam uma produção de mais de 13 milhões de toneladas de ACP por ano e uma área plantada de cerca de 11% da área do país (Yousoff 2007). A Colômbia é o principal país produtor de palma na América, e o quarto a nível Mundial, logo depois da Malásia, Indonésia e Nigéria. Na Colômbia, o cultivo de óleo de palma tem crescido de um modo muito significativo: na década de 60 existiam cerca de 18 mil hectares de produção; em 2003 cerca de 188 mil hectares; hoje em dia são cerca de 300 mil hectares. Do total da produção de óleo de palma, cerca de 35% é exportado. Segundo Pardo *et al.* (2006) a produção de óleo de palma na Colômbia no ano de 2004 foi cerca de 630 mil toneladas. O plano nacional colombiano para o desenvolvimento da agro-indústria do óleo de palma pretende chegar à meta dos 830 mil hectares plantados, com base no fruto híbrido proveniente da árvore de palma denominado *Tenera* (Teoh 2002), o qual é cultivado apenas nos trópicos e a alturas de cerca de 500 metros do nível do mar.

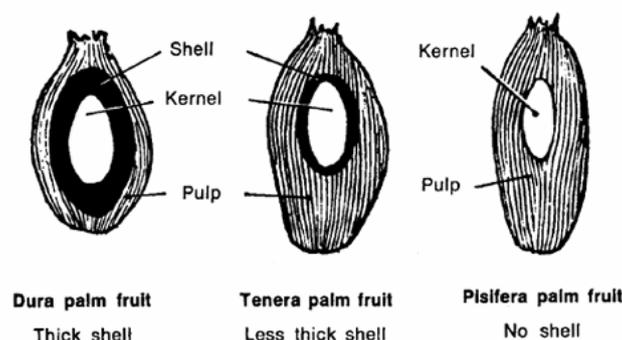


Figura 2.1 Tenera, fruto híbrido proveniente do cruzamento entre Dura e a Pisifera.

2.2 Óleo de palma e o biodiesel

Além da importância do óleo de palma nas indústrias alimentares, cosmética, etc., nos últimos tempos tem havido um crescente aumento de interesse a nível mundial na produção

de óleo de palma como matéria-prima na produção de biocombustíveis. Segundo *Sumathi et al. (2007)*, há inúmeras vantagens em introduzir a indústria de biodiesel na Malásia:

- Abrandamento dos efeitos da escalada dos preços petrolíferos,
- Poupança no mercado global através da redução das importações de diesel
- Protecção ambiental através da redução das emissões de gases com efeito de estufa
- Maior procura do óleo de palma,
- Benefícios mútuos nos sectores do petróleo e do óleo de palma.
- Segurança socioeconómica para os países produtores.
- Uso eficiente das matérias-primas.

No entanto há estudos que apontam para prejuízos acima de tudo ambientais, provocados pelo aumento exponencial da indústria do óleo de palma. Deste modo, torna-se cada vez mais importante o estudo do ciclo de vida e das possibilidades de melhoria de produtividade e sustentabilidade do processo de produção de óleo de palma, tanto em termos energético/produtivo como em termos ambientais. *Gauch (2007)* obteve resultados para o potencial de aquecimento global do ciclo de vida do óleo de palma de cerca de 0,11 kg CO_{2-eq} por MJ de energia do combustível, enquanto que para o diesel apresentou um valor de 0,17 kg CO_{2-eq} por MJ de energia do combustível. *Rosélis (2007)* efectuou um estudo de balanço energético para o ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma, comparando 3 empresas do Brasil relativamente a 3 empresas da Colômbia. Concluiu que as relações energéticas de entrada/saída andam na ordem dos 6,0-8,0 valores. Conclui também que o biodiesel de óleo de palma apresenta uma melhor eficiência na relação fóssil/renovável, relativamente ao biodiesel proveniente de outros óleos vegetais, como por exemplo o RME, SME ou o óleo de mamona.

2.3 Estudos de eficiência energética e avaliação ambiental de ciclo de vida

Os estudos de avaliação de ciclo de vida de óleo de palma são relativamente poucos, sendo os mais importantes: *Jannick Schmidt (2004, 2007)* e *Yousoff Sumiani (2006, 2007)* ambos relativos à realidade da Malásia, os quais são analisados de seguida:

Yousoff (2007) efectuou um estudo de ACV, relativo à produção de óleo de palma na Malásia, com o objectivo de indicar as consequências ambientais deste processo produtivo. Através do uso do software Simapro 5 e do método de ACV Eco-indicador 99, concluiu que, os processos relativos à fase da plantação, que produzem maiores impactes ambientais são os que estão ligados ao uso de energia: diesel para maquinaria e transportes e o uso de fertilizantes inorgânicos. Na planta extractora, considera que a única unidade processual com impactes relevantes é a caldeira – utilizada positivamente na produção de electricidade e

negativamente pelas emissões da queima de fibras e cascas. Os impactos relativos ao tratamento de efluentes são considerados apenas como cenários alternativos, e não na ACV do processo principal. Como solução para melhorias relativas a problemas ambientais e energéticos, *Yousoff (2007)* considera que existem alternativas de otimização com base em ecologia industrial, tais como: a utilização de fertilizantes orgânicos, caminhos-de-ferro para o transporte de matéria-prima, introdução de filtros nas saídas das caldeiras, produção interna de electricidade, e o aproveitamento do biogás proveniente da digestão do fruto da palma.

Schmidt (2004) efectuou um estudo comparativo sobre a importância do tipo de método delimitativo das fronteiras de um sistema de ciclo de vida, para os casos do óleo de palma e da colza, onde efectua uma comparação entre o uso dos métodos por atributo ou consequenciais. Concluiu que os resultados da ACV dependem muito das fronteiras do sistema. A contribuição para os impactos ambientais como o aquecimento global, acidificação, eutrofização e uso das terras variam até um factor 200, dependendo da metodologia utilizada para as fronteiras de sistema. Comparou também os impactos ambientais do ciclo de vida do óleo de palma comparativamente ao da colza, e conclui que o óleo de palma é uma melhor solução ambiental no que diz respeito a aquecimento global, acidificação e eutrofização, perdendo apenas nos impactos relacionados com o uso das terras. Considera que, para os óleos vegetais, o destino que se dá aos co-produtos é essencial para a obtenção dos melhores resultados de ciclo de vida.

2.4 Potencial para melhoria de ciclo de vida

São vários os resíduos de biomassa produzidos ao longo do ciclo de vida do óleo de palma, como se pode ver na Tabela 2.1. O não aproveitamento destes resíduos o aumento de impactos ambientais e, neste caso também, energia “largada no lixo”. Aplicando conceitos de ecologia industrial no aproveitamento de resíduos e co-produtos, pode melhorar os índices de eficiência energética e redução de emissões.

Tabela 2.1 Resíduos de biomassa no ciclo de vida do óleo de palma, em função de 1 tonelada de óleo de palma

Material	Destino	Valor	Referências
EFB, RFV	Plantação	930,23	Pardo et al. (2006)
POME (Efluentes)	Sist. Trat. Efluentes	4181,40	Pardo et al. (2006)
Fibras de palma	Caldeira, Planta extractora	651,16	Pardo et al. (2006)
Cascas	Caldeira, Planta extractora	279,07	Pardo et al. (2006)
Cinzas	Plantação	223,26	Weeraratne (2007)

Reid (2006) define ecologia industrial como a área que examina os fluxos locais, regionais e globais de materiais e energia em sistemas produtivos, em sectores industriais e

economias. Foca-se no papel potencial da indústria em reduzir os impactos ambientais dos processos ao longo do ciclo de vida do produto. Por isso, a ecologia industrial tem pelo menos duas ligações com o ACV: examina os fluxos de materiais e energia que constituem a “raiz” do inventário do ciclo de vida; e emprega o quadro de “*cradle-to-grave*” como meio central e crucial para uma melhor aproximação à análise ambiental e de tomadas de decisão. Baseado na análise de fluxos de massa e energia do sistema produtivo do óleo de palma na empresa Manuelita Aceites, e em conceitos de ecologia industrial, pode ser possível alcançar a meta de zero descargas.

Metano (CH₄) e efluentes tratados

Conil (1997) efectuou uma pesquisa sobre a valorização dos sub-produtos da planta de tratamento de efluentes, para o caso específico duma empresa colombiana (Palmar Santa Elena, em Tumaco), onde refere que o aproveitamento do biogás (metano), dos lodos e dos efluentes tratados, impõe uma série de benefícios económicos, energéticos e ambientais. O aproveitamento do biogás através de biodigestores anaeróbios impede quase totalmente a libertação de metano para a atmosfera, sendo este um combustível que pode ser aproveitado para a produção de energia eléctrica a ser utilizada na planta extractora, ou mesmo exportar para a rede eléctrica, promovendo a sustentabilidade energética da empresa. Desde que optaram pelo método de ferti-irrigação dos efluentes tratados na plantação, houve aumentos da produção de RFF na ordem dos 47-50%.

H-Kittikun (2000) refere que os efluentes (mistura de substâncias altamente poluentes provenientes da esterilização e da sala de óleo, e de efluentes pouco poluentes como vapor condensado, água de refrigeração, descarga de caldeira e efluentes sanitários) devem ser tratados separadamente de modo a minimizar os impactos ambientais do processo. *Mohd (2006)* efectuou um estudo sobre a possibilidade de produzir plásticos a partir dos efluentes. Estes possuem um elevado teor de carbono (BOD superior a 20 g/L), com baixo teor de nitrogénio (menos de 0.5 g/L). São uma fonte de produção de bio-plásticos e um decréscimo na dependência deste tipo de materiais relativamente ao petróleo. Esta pode ser uma forma barata de obter carbono renovável.

Schuchardt (2002) concluiu que a unificação dos efluentes líquidos com os RFF, provenientes da planta extractora, aumenta o potencial da planta em termos energéticos, uma vez que vai haver uma maior produção de metano. A mistura deve ser utilizada como composto rico em nutrientes e utilizada como fertilizante, depois da fermentação anaeróbia num reactor. *Ahmad (2006)* concluiu que a adição de pó de borracha de látex como um absorvente nos efluentes do processo, reduz o óleo residual nos efluentes a percentagens mais baixas. *Wu (2007)* estudou a viabilidade da utilização da tecnologia da ultra-filtração da

membrana. Segundo ele, esta tecnologia permite a recuperação de proteínas, hidrocarbonetos e da água. É dada uma elevada importância à pressão de trabalho da membrana como factor decisivo para a recuperação ou rejeição das proteínas e dos hidrocarbonetos. *Wanna (2007)* estudou o efeito da temperatura no tratamento anaeróbio dos efluentes. Um reactor de 37°C pode tolerar variações de temperatura na ordem dos 37-43°C sem a ocorrência de variações significativas na estabilidade do processo (TVFA e TVFA/Alcalinidade). O reactor de 55°C pode tolerar variações de temperatura na ordem dos 55-43°C. Contudo, neste caso há uma menor instabilidade no processo em termos de TVFA e TVFA/Alcalinidade, para variações de temperatura. *Subhash (2006)* estudou o comportamento da introdução do coagulante natural, as sementes *Moringa Oleifera*, aos efluentes provenientes da planta extractora. Segundo este estudo, estas sementes promovem a remoção de cerca de 95% dos sólidos suspensos na mistura, e da redução de cerca de 52,2% do COD. Este sistema combinado com um floculante promove o aproveitamento de cerca de 87,25% da matéria seca dos lodos e de cerca de 50,3% da água.

Abdul (2003) fez um estudo sobre a utilização de uma tecnologia de membrana para a reciclagem das águas residuais, chegando à conclusão que a utilização deste sistema diminui bastante as emissões provenientes das águas residuais, sendo que ao mesmo tempo se recicla a água, podendo voltar a ser utilizada novamente para alimentar a caldeira, ou pode mesmo ser transformada em água potável.

RFV , cinzas e cascas

Segundo *Weeraratne (2006)*, os RFV podem ser aproveitados para queima na caldeira ou para produzir MDF (medium density fireboard) além de serem utilizados como fertilizante orgânico na plantação. *Yousoff (2007)* concluiu que um dos problemas da combustão na caldeira prende-se com a falta de eficiência de combustão. Isto acontece devido à heterogeneidade da mistura dos resíduos sólidos produtos da combustão. A solução passa por utilizar um sistema controlado de alimentação de combustível e colectores de poeiras multi-clone. Refere que devem ser efectuados mais estudos para produzir caldeiras mais eficientes e ecológicas, no tratamento dos resíduos sólidos produtos de combustão e do sistema de controlo de cinzas, de modo a melhorar a eficiência energética e ambiental, e que o calor proveniente do fluxo de gases da chaminé da caldeira também pode ser aproveitado para a secagem de resíduos sólidos provenientes da decantação.

Abdullah (2007) efectuou um estudo sobre a dispersão de partículas e a potencial ocorrência de neblinas provocadas pelas emissões provenientes da queima de biomassa nas caldeiras, sendo esta a principal fonte de poluição atmosférica industrial na Malásia. As

partículas dissolvem-se com vapor e transformam-se em gotículas para humidade superior a 70%, provocando o fenómeno de neblina.

Segundo *Chun et al. (2008)*, foi determinado que as cinzas dos resíduos queimados na caldeira não são consideradas como lixo tóxico. Pelo contrário, contêm elevados teores de potássio (K), bem como de sílica, o que significa que podem ser utilizadas como fertilizante orgânico ou na produção de cimento.

Segundo *H-Kittikun (2000)* não se deve usar as cascas dos caroços da palma como produto de queima na caldeira, uma vez que produzem fumo negro, altamente poluente. Em vez disso devem ser utilizadas como fertilizantes orgânicos.

2.5 Óleo de palma: Questões ambientais

Segundo *Yousoff (2007)*, a indústria de óleo de palma é responsável por cerca de 3,5% dos impactes ambientais na Malásia. Neste país as plantações de palma ocupam mais de 1/3 da área cultivada, ou seja, cerca de 11% da área total. Segundo a FAOSTAT, a produtividade anual de óleo de palma na Malásia é cerca de 22 vezes superior à da Colômbia, o que implica uma área de cultivo muito menor na Colômbia, e conseqüentemente menores impactes ambientais relativos.

Geralmente, o uso do óleo de palma como fonte de energia é reconhecido como sendo uma prática amiga do ambiente. Realizando estudos de ACV ao óleo de palma, pode verificar-se que não é tão linear afirmar isso, pois é necessário utilizar energia fóssil no ciclo de vida do óleo de palma, como combustíveis fósseis para transportes, para a produção de fertilizantes e para a produção de electricidade. A utilização destes liberta GEE's que desequilibram a neutralidade do ciclo de carbono. Além disso, há que ter em consideração a libertação de outras gases com efeito de estufa, nomeadamente o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que tem um factor de impacte muito superior em termos de kg de carbono equivalente (1 kg CH₄ = 23kg CO₂ eq; 1 kg N₂O= 296 kg CO₂eq), e podem ter um papel importante no impacte de aquecimento global (*Reinhardt, 2007*).

Alguns estudos recentes estão a dar uma elevada importância às questões ambientais relacionados com a expansão das áreas de cultivo, como o **aquecimento global** (*Lasco (2002), Reijnders (2006), Germer (2006)*), o qual, para a questão da transformação das terras, é determinado pelo ciclo de carbono e os GEE's. Um outro impacte relevante relacionado com a expansão do cultivo de palma é o da **biodiversidade**, o qual foi estudado por *Michelsen (2007), Milà (2007), WWF (2008)*, e é determinado pela destruição de espécies vegetais e animais nativas, para a expansão da cultura de palma, a qual é uma monocultura.

Conversão das terras – Ciclo de carbono e GEE

Muitos cientistas defendem que as plantações de óleo de palma apresentam uma capacidade de armazenamento de carbono superior à das florestas tropicais. No entanto, estudos mais recentes afirmam que as plantações de óleo de palma estabelecidas em floresta tropical ou em solos turfosos provocam a emissão de mais gases de efeito de estufa. Com a aplicação de fertilizantes minerais, o valor das emissões aumenta mais ainda.

Segundo *WWF (2008)*, cerca de 20% das emissões mundiais de GEE, são causadas directa e indirectamente pela desflorestação, sendo que das regiões desflorestadas, as que apresentam os maiores índices de biodiversidade do Mundo, como o Brasil e a Indonésia, são as que contribuem mais (cerca de 54%) para o efeito. Já *Reijnders (2006)* estimou que uma floresta tropical apresenta um teor de 235 tonC/ha acima dos solos, e que numa plantação de palma esse valor é de 48 tonC/ha. Então há uma emissão de 187 tonC/ha para a atmosfera.

Outro foco de emissão de GEE relacionado com a desflorestação e as plantações de palma está relacionado como o modo que as terras são preparadas para a plantação. A maneira mais fácil de “limpar” a terra é através de queimadas. Este método é altamente poluente e é muito difícil controlar fogo, havendo o risco de se espalhar. A limpeza das terras deve ser feita de uma maneira controlada. A Malásia e a Indonésia (segundo maior produtor de óleo de palma no mundo) introduziram a lei “queimadura zero”, mas os fogos são frequentes nas florestas destes países, especialmente na Indonésia.

Conversão das Terras – biodiversidade

Em zonas tropicais, a expansão de áreas de cultivo pode implicar a destruição de floresta tropical, e consequentemente a extinção de inúmeras espécies animais e vegetais. *Michelsen (2007)* refere que o tipo de transformação das terras apresenta um papel preponderante na biodiversidade, no entanto ainda não há acordo sobre a melhor metodologia a utilizar para incluir este impacte na ACV. Segundo *Milà (2006)*, o uso das terras para agricultura, florestação, construção ou indústria leva a impactes substanciais, particularmente na biodiversidade e na qualidade do solo (erosão), fornecedor das funções que suportam as várias formas de vida. No caso do ciclo de vida do óleo de palma, a relevância deste impacte ainda é maior, uma vez que o óleo de palma é produzido em regiões tropicais, onde o aumento de produtividade normalmente significa expansão de cultivo, e consequentemente destruição de floresta tropical. Estes impactes devem ser incluídos no ACV. No entanto, o grande problema relativo a este impacte ambiental prende-se com a dificuldade de obter resultados sustentados, através da metodologia de ACV, e ainda não há um acordo global sobre o melhor método para incluir o impacte do uso das terras no ACV (*Kløverpris 2007*),

(Milà 2006), (Michelsen 2007). Schmidt (2004), pág. 29, efectuou um cálculo de impacte de ocupação de terras I_{occ} , do crescimento de palmas em 1 m^2 . Para uma produtividade de 1,83 kg de RFF por m^2 .ano, implica uma área ocupada de $0,55 \text{ m}^2$.ano/kg.RFF. No entanto há diversas soluções que são apresentadas para combater esta problemática: Segundo Reinhardt (2007), as soluções passam pela transformação de áreas tropicais de cultivo que não estejam a ser utilizadas em plantações de palma. Os benefícios ambientais e sociais deste tipo de política de aproveitamento e não de expansão maciça podem ser uma garantia de sustentabilidade para o mundo do óleo de palma. Kløverpris (2007) refere que o aumento da produção das culturas agrícolas pode ser conseguido através de deslocação, expansão ou intensificação. A deslocação leva à substituição e em última análise, a resposta marginal para o consumo das culturas será uma combinação de expansão e intensificação. A última pode ser alcançada através da optimização (aplicação de fertilizantes, pesticidas e irrigação) ou desenvolvimento tecnológico (melhoria de mecanismos, estirpes das culturas e práticas de agricultura).

3 METODOLOGIA: AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DE CICLO DE VIDA (ACV)

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada na presente dissertação: Avaliação Ambiental de ciclo de vida (ACV) e Avaliação Energética de Ciclo de Vida (AECV). Para tal, são analisadas as questões metodológicas mais relevantes para a avaliação ambiental e energética do ciclo de vida do óleo de palma, nomeadamente a escolha de unidade funcional, a definição de um modelo de fluxos energéticos e materiais, a obtenção de resultados de inventário (aplicação de expansão de sistema e alocação, o cálculo de emissões, etc.), e a análise de indicadores de eficiência energética. A ACV (ou LCA, na terminologia internacional) encontra-se estruturada nas seguintes etapas, *ISO 14040 e 14043 (2007)*:

- i) *Enquadramento e objectivos*
- ii) *Inventário do ciclo de vida*
- iii) *Avaliação dos impactes ambientais*
- iv) *Interpretação*

3.1 Enquadramento e objectivos

Nesta primeira fase da ACV, são formulados e especificados os problemas e os objectivos, relativamente à aplicação pretendida. O objecto de estudo é definido em termos de uma unidade funcional. Segundo as normas ISO 14040, a unidade funcional de um sistema produtivo serve como unidade de referência para a avaliação de impactes ambientais e para comparação de sistemas com funções semelhantes (ex. outros óleos vegetais). Deste modo foi escolhida a unidade funcional de **1 tonelada de óleo de palma**, produto de saída do sistema de fronteiras principal. No entanto, o sistema produtivo do óleo de palma apresenta subsistemas (plantação e tratamento de efluentes) que também podem ser estudados com outras unidades funcionais e que podem servir de comparação com outras realidades semelhantes. As unidades funcionais escolhidas para a plantação e o tratamento de efluentes são, respectivamente: **1 hectare de plantação de palmas** e **1 tonelada de efluentes (POME)**. As unidades funcionais utilizadas nos subsistemas podem ser utilizadas essencialmente para efectuar comparações com processos semelhantes.

O “*end point*” definido para este modelo ciclo de vida foi a produção de óleo de palma clarificado fisicamente. Considerando que o óleo de palma vai ser usado para a produção de biodiesel, seria necessário efectuar um processo de clarificação química e a posterior transesterificação do óleo, para se obter biodiesel.

3.2 Inventário de ciclo de vida, Fronteiras de Sistema e Multi-funcionalidade

Esta é a segunda fase do ACV, e envolve a modelação do sistema produtivo, a recolha de dados e o cálculo de resultados. Na Figura 4.1 apresenta-se um esquema do modelo, para o qual foi realizado o respectivo inventário de entradas e saídas de materias, energia e emissões, o qual tem como base artigos relativos à produção e ciclo de vida do óleo de palma, *Schmidt (2004 e 2007)*, *Pardo et al. (2006)*, *Yousoff (2004 e 2007)*, *Wambeck (2005)* *Niels et al (2007)* e *Weeraratne (2007)*.

Um dos problemas mais difíceis de resolver num estudo de ACV está ligado à multi-funcionalidade do processo. A produção de óleo de palma tem os seguintes co-produtos: **Óleo de Palmiste** e a **Torta de Palmiste**. O óleo de palmiste, apesar de poder ser utilizado para os fins semelhantes aos do óleo de palma (produtos alimentares e indústria oleoquímica), apresenta características químicas muito diferentes do óleo de palma. A torta de palmiste apresenta um destino totalmente diferente (produção de rações animais). Pelas razões mencionadas, tanto o óleo como a torta de palmiste têm que ser separados do óleo de palma em termos de funcionalidade, e tratados como co-produtos. Isto impõe um problema no estudo de ACV, uma vez que é necessário dividir os impactes ambientais do processo entre os produtos e os co-produtos. De acordo com as normas *ISO 14043 (2007)*, as dificuldades devido à multi-funcionalidade podem ser resolvidas aplicando uma **alocação** e/ou a **expansão do sistema**. A escolha de um dos dois pode apresentar resultados de avaliação de impactes muito diferentes. Segundo as normas *ISO 14043 (2007)*, deve-se evitar a alocação sempre que possível, utilizando a expansão de sistema.

A **expansão de sistema** consiste em aumentar o domínio do sistema, de modo a que os co-produtos do processo sejam uma alternativa a outros sistemas produtivos, no mercado global. A expansão de sistema é uma metodologia consequencial da ACV, em que procura encontrar as mudanças nos impactes ambientais, como consequência duma certa actividade. Este método é mais preciso que a alocação porque reflecte muito melhor a realidade e as forças do mercado. Este método inclui todos os processos que são afectados pela produção de um produto. Sendo assim, os processos pertencentes a um outro sistema produtivo, que sejam afectados pelo sistema produtivo em estudo, vão entrar na ACV deste como produtos a evitar. Expansão de sistema implica que as fronteiras do sistema investigado são expandidas, para incluir a produção alternativa de funções exportadas. Outras actividades fora do sistema produtivo investigado podem ser incluídas se elas forem afectadas pelas funções exportadas. Em termos gerais, a expansão de sistema requer apenas que haja um modo alternativo de gerar as funções exportadas, e que se possam obter dados para esta produção alternativa. A

vantagem de evitar a alocação através de expansão de sistema é a de ser possível modelar os efeitos indirectos das acções que são importadas para as fronteiras do sistema em estudo.

No caso de não ser possível utilizar a expansão de sistema, recorre-se a uma **alocação** que pode ser de natureza mássica, energética ou mesmo económica. De acordo com as normas *ISO 14043 (2007)*, a alocação deve reflectir as relações físicas entre os impactes ambientais e os processos, isto é, o modo como os impactes serão alterados com as mudanças quantitativas nos processos que compõem o ciclo de vida (*Malça e Freire, 2004*). A alocação consiste na repartição, segundo um coeficiente a determinar, das saídas de cada do processo do ciclo de vida consoante o produto em estudo, este coeficiente varia consoante a natureza da alocação. Por exemplo, se num processo se obtiver um co-produto na mesma quantidade mássica que o produto desse processo e se pretender aplicar uma alocação mássica, deve-se calcular o coeficiente mássico para se poder repartir as saídas pelos dois produtos. Como se produz a mesma massa do co-produto como do produto, pode-se dizer que o produto é responsável por metade das saídas desse processo. Assim o coeficiente mássico será de 0,5 e todas as saídas desse processo serão multiplicadas por ele, sendo os valores das saídas obtidos os considerados para o processo seguinte.

Cálculo de emissões

Há emissão de substâncias poluentes para todos os 3 subsistemas (plantação, planta extractora e tratamento de efluentes) do ciclo de vida do óleo de palma. Na fase da plantação, os elementos emissores são: uso de fertilizantes inorgânicos, de combustíveis fósseis e a conversão de terras (alteração do teor de carbono na biomassa e no solo). Na planta extractora há emissões gasosas relativas à queima de fibras e cascas na caldeira. No tratamento de efluentes há emissões consideráveis resultantes do processo natural de respiração aeróbia, sendo a mais importante o metano (CH_4), o qual contribui para o aquecimento global. Ao longo da secção 4.2 estão patentes os cálculos e as referências usadas para a obtenção de valores das emissões relativas ao ciclo de vida do óleo de palma.

3.3 Avaliação de impactes ambientais de Ciclo de Vida

A fase de inventário resulta numa grande quantidade de dados cuja análise impõe a sua redução a um conjunto limitado de informação, o que constitui o principal objectivo da terceira fase da ACV. A compactação de informação obtém-se classificando as diversas intervenções ambientais (emissões de CO_2 , SO_x , NO_x , etc.) em conjuntos de impactes ambientais. Esta fase é geralmente dividida em três etapas, como está ilustrado na Figura 3.1:

1. Classificação / Caracterização

2. Normalização (opcional), e
3. Avaliação

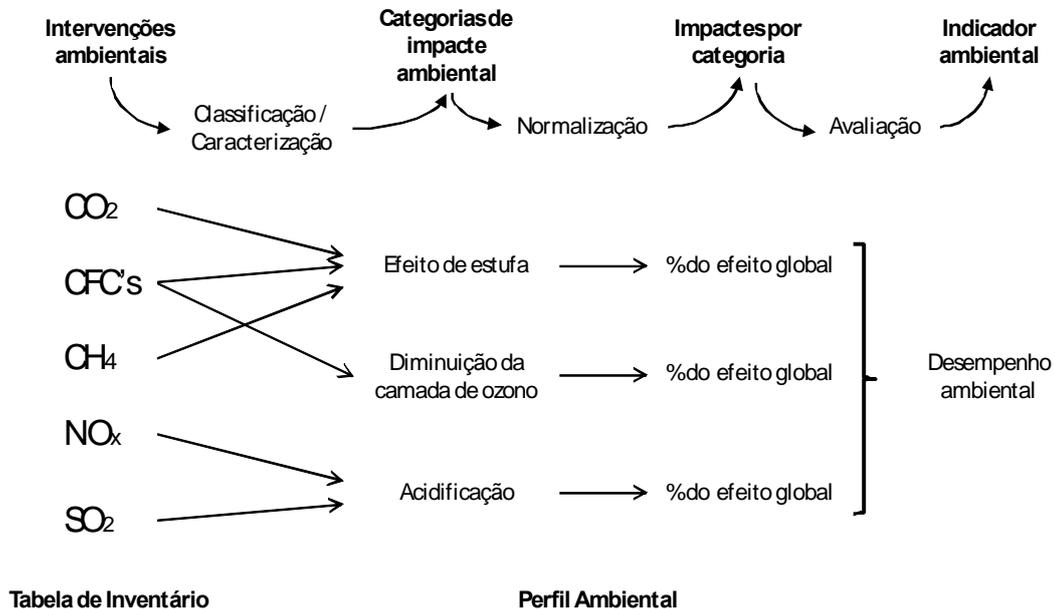


Figura 3.1 Fases da avaliação de ciclo de vida (Ferrão, 1998)

Segundo as normas *ISO 14043 (2007)*, a classificação/caracterização dos impactes ambientais tem como objectivo a quantificação do contributo das diversas intervenções ambientais de um sistema para um conjunto de categorias de impacte ambiental reconhecidas como tal.

A classificação estabelece a relação entre o conjunto das intervenções ambientais presentes no inventário e um conjunto de categorias ambientais. De uma forma geral, os factores de ponderação dos contributos, das diversas intervenções ambientais são estabelecidos por comparação com o seu efeito, relativamente a uma intervenção ambiental de referência. Por exemplo, no caso do efeito de estufa, todas as intervenções ambientais são convertidas em equivalente de CO₂. A diferença entre os diversos métodos resultantes desta metodologia centra-se na escolha das categorias de impacte ambiental. Para o cálculo de indicadores ambientais são utilizados dois métodos: o **Eco-Indicador 99** e o **CML 2000**.

Eco-Indicador 99

No Eco-Indicador 99 é usado o princípio da distância ao objectivo no cálculo dos pesos a utilizar na fase da avaliação. A abordagem baseia-se na premissa de que a gravidade de um impacte pode ser avaliada pela diferença entre o seu nível actual e o valor limite. Este método apresenta três CIA's principais, dentro das quais apresentam-se as onze mais específicas que o

compõem, e estão presentes na Tabela 3.1. Nessa tabela pode-se ver uma breve definição das categorias e a unidade referente a cada uma delas.

Tabela 3.1 Categorias de Impacte Ambiental do “Eco-indicator 99 (E) V2.1 / Europe EI 99 E/E”.

Categoria Principais	Categoria Especificas	Definição	Unidade equivalente
Human Health / Saúde Humana	Carcinogens	Efeitos carcinogénicos em humanos	DALY
	Respiratory Organics	Danos respiratórios causados à saúde humana por substâncias orgânicas	
	Respiratory Inorganics	Danos respiratórios causados à saúde humana por substâncias inorgânicas	
	Climate Change	Danos provocados à saúde humana pelo aquecimento global	
	Radiation	Danos provocados à saúde humana por radiação ionizada	
	Ozone Layer	Danos provocados à saúde humana pela depleção da camada de ozono	
Ecosystem quality / Qualidade do ecossistema	Ecotoxicity	Percentagem de espécies a viver sob stress tóxico	PDF*m ² yr
	Acidification/Eutrophication	Danos provocados ao ecossistema por acidificação e eutrofização.	
	Land Use	Danos provocados ao ecossistema pelo uso das terras: ocupação e transformação	
Resources / Recursos	Minerals	Danos provocados aos recursos naturais causados pela depleção de minerais	MJ surplus
	Fossil Fuels	Danos provocados aos recursos naturais causados pela depleção de combustíveis fósseis	

CML 2000

Outro método de avaliação de impactes ambientais é o “CML 2 baseline 2000 V2.1 / West Europe, 1995”. As unidades equivalentes de cada impacte ambiental do método CML (Center of Environmental Science of Leiden University) 2000 apresentam-se na Tabela 3.2. Este método é uma actualização do método CML 1992 sendo a versão V2 adaptada para o SimaPro 7.0. Este método é um método “midpoint”, pois são elaboradas as chamadas aproximações “orientadas para o problema”.

Tabela 3.2 Categorias de Impacte Ambiental do CML 2 baseline 2000 V2.1 / West Europe, 1995

Categoria de Impacte	Terminologia Inglesa	Unidade equivalente
Depleção abiótica	Abiotic depletion	kg Sb _{eq}
Efeito de estufa	Global warming (GWP100)	kg CO _{2-eq}
Depleção da camada de ozono	Ozone layer depletion	kg CFC-11 _{eq}
Toxicidade humana	Human toxicity	kg 1,4-DB _{eq}
Ecotoxicidade de recursos freáticos	Fresh water aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB _{eq}
Ecotoxicidade de recursos marinhos	Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB _{eq}
Ecotoxicidade terrestre	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB _{eq}
Oxidação fotoquímica	Photochemical oxidation	kg C ₂ H _{2-eq}
Acidificação	Acidification	kg SO _{2-eq}
Eutrofização	Eutrophication	kg PO _{4-eq}

3.4 Avaliação energética do ciclo de vida (AECV)

A AECV é baseada na metodologia de ACV, mas limitada às questões energéticas (Malça e Freire, 2006). Neste estudo, a AECV é realizada sob a forma de **indicadores de eficiência energética**, apontando para a caracterização da renovabilidade do ciclo de vida do sistema produtivo do óleo de palma. De acordo com Malça e Freire (2006, 2004, 2003), a análise energética do ciclo de vida contempla o estabelecimento de um inventário de energia – baseado em balanços de massa e de energia, 1ª lei da Termodinâmica – ao longo das várias etapas do ciclo de vida dos materiais analisados, desde a extracção/cultivo das matérias-primas até à sua utilização final e retorno ao meio ambiente (“*cradle to grave*”, na terminologia Anglo-Saxónica), incluindo actividades auxiliares e transporte entre fases. Os indicadores de eficiência energética que são calculados nesta dissertação são:

- Eficiência global de ciclo de vida (life cycle energy efficiency), η (CV), que neste caso corresponde à relação entre a energia final disponibilizada nos produtos finais e a energia primária total do ciclo de vida;
- Eficácia de utilização de energia fóssil (fossil energy ratio), *euef*, indicador da quantidade de energia final disponibilizada por unidade de energia de origem fóssil consumida no ciclo de vida;
- Requisito energético (energy requirement), E_{req} , definido como a energia primária não-renovável;
- Eficiência de renovabilidade energética (energy renewability efficiency), *ERenEf*, a qual mede a fracção da energia final, obtida a partir de recursos renováveis.

4 MODELAÇÃO E INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Neste capítulo apresenta-se o modelo de ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia, a análise de inventário realizada, bem como os cenários alternativos considerados para este modelo. No modelo estão definidas as fronteiras do sistema, os subsistemas, as unidades processuais mais importantes, os fluxos de massa, energia e emissões. O inventário de ciclo de vida está dividido em três partes, as quais correspondem aos subsistemas: 1) Plantação e Colheita; 2) Planta extractora; 3) Tratamento de efluentes. Os cenários alternativos considerados servem como elemento de comparação com o sistema principal.

4.1 Modelo geral e fronteiras do sistema

O caso de estudo investigado nesta tese tem por base o processo da empresa colombiana *Manuelita S.A.*, que se dedica ao cultivo, produção e comercialização de óleo de palma, nas instalações da Fazenda Yaguarito em *San Carlos de Guaroa*, com as seguintes condições (*Manuelita Aceites 2006*):

- 1) 14000 Hectares para plantação
- 2) Produção média anual: 19 tonRFF/ha.ano
- 3) Capacidade Máxima: 47 tonRFF/h
- 4) Tempo de operação: 22 h/dia, 24,5 dias/mês, 12 meses/ano.
- 5) Quantidade de óleo de palma processado por ano: 33.000 ton/ano

Esta empresa produz óleo de palma segundo o modelo descrito na Figura 4.1. A obtenção de um modelo de ciclo de vida é fundamental para a compreensão do processo e para tomada de decisões num estudo de ACV. Este modelo inclui um sistema principal que engloba 3 subsistemas: **Plantação e Colheita (1)**; **Planta Extractora (2)**; **Tratamento de Efluentes (3)**. Para cada um dos subsistemas estão ilustrados os principais fluxos de massa, energia e emissões. No subsistema **1**) são produzidos RFF (cerca de 19 toneladas/hectare.ano). Depois de colhidos, os RFF são conduzidos para o subsistema **2**), sendo processados como ilustrado na Figura 4.5, e de onde são extraídos os 3 produtos finais (**óleo de palma, óleo de palmiste e torta de palmiste**).

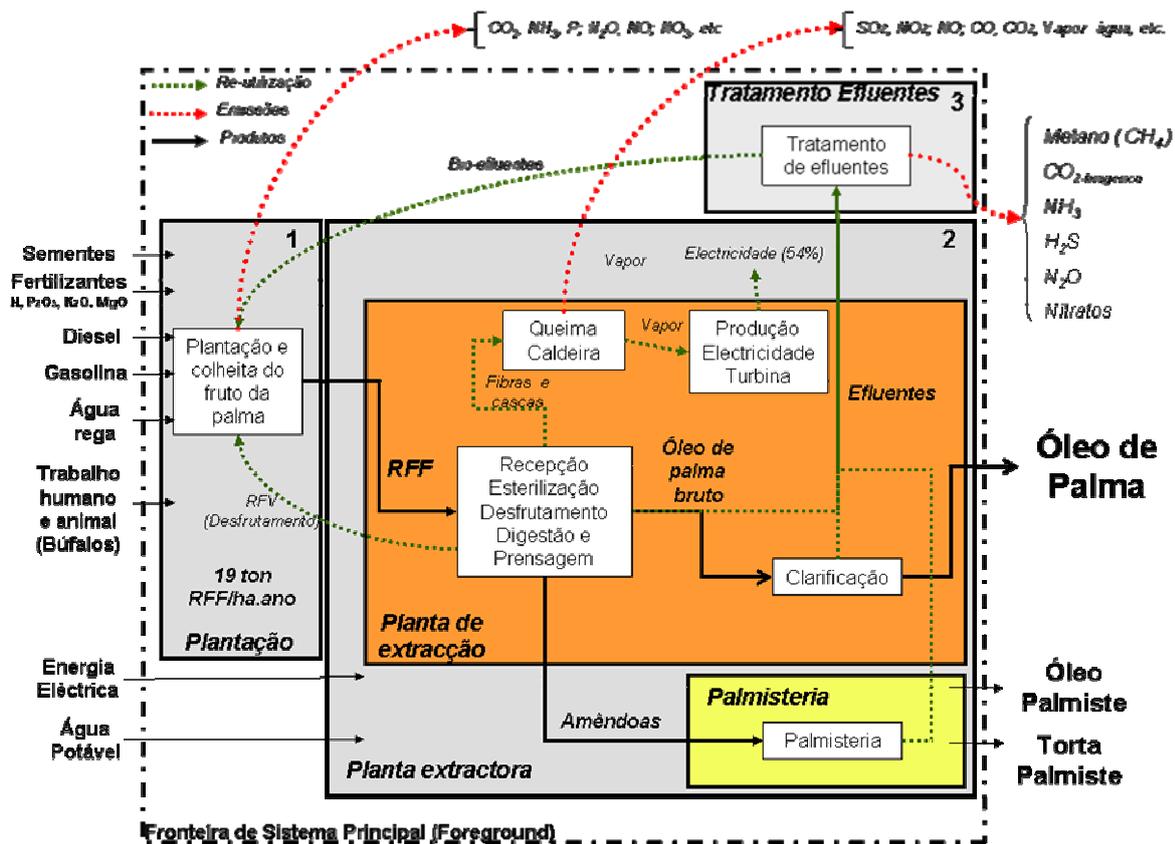


Figura 4.1 Diagrama de fluxos do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia

De acordo com a Tabela 4.1 cerca de 21,5% dos RFF que entram na planta extractora são transformados em óleo de palma. Os efluentes líquidos produzidos na planta extractora são encaminhados para o subsistema 3), onde são tratados como ilustrado na Figura 4.6.

Tabela 4.1 Coeficientes de relação entre entradas e saídas da planta extractora

Entradas	Saídas	Coef. Relação	
RFF	Óleos Vegetais	Óleo de palma	21,50%
		Óleo de palmiste	2,50%
		Torta de palmiste	6,00%
	Biomassa seca	RFV	20,00%
		Fibras	14,00%
Biom. + resid.	Cascas	6,00%	
Água	Efluentes		30,00%
		Água de efluentes	66,63%
		Perdas em vapor	33,37%

As setas indicam o destino dos fluxos de massa, energia e emissões, para cada um dos subsistemas. Como se pode ver na legenda da figura, as setas a preto representam os fluxos dos produtos, a vermelho as emissões libertadas em cada um dos subsistemas, e a verde, todos os co-produtos que são reutilizados internamente pelo sistema.

Para facilitar a implementação do modelo, nomeadamente a relação entre cada subsistema e a recolha/análise de dados de inventário, foi adoptada, para cada uma das fases do sistema produtivo, uma unidade funcional auxiliar distinta. Para a plantação: **1 hectare de**

plantação de palma. Para a planta extractora: **1 tonelada de óleo de palma** e para o tratamento de efluentes: **1 tonelada de efluentes.** A unidade do sistema principal que integra estes 3 sub-sistemas é de **1 tonelada de óleo de palma**, conforme explicado no capítulo anterior, e todos os resultados apresentados com esta mesma unidade funcional.

4.2 Inventário do ciclo de vida

O inventário de ciclo de vida é feito de acordo com o modelo descrito em 4.1, ou seja, está dividido em três grupos: *i)* Plantação e colheita; *ii)* Planta extractora; e *iii)* Tratamento de efluentes. Cada um dos subsistemas apresenta uma unidade funcional distinta, como foi referido na secção 4.1, e os resultados de inventário são apresentados em função de cada uma das unidades funcionais, respectivamente.

4.2.1 Plantação e Colheita

O diagrama de fluxos para o subsistema da plantação e colheita está representado na Figura 4.2, onde estão patentes: as fronteiras do subsistema, todas as unidades processuais, e a produtividade anual em função da unidade funcional: 1 hectare.

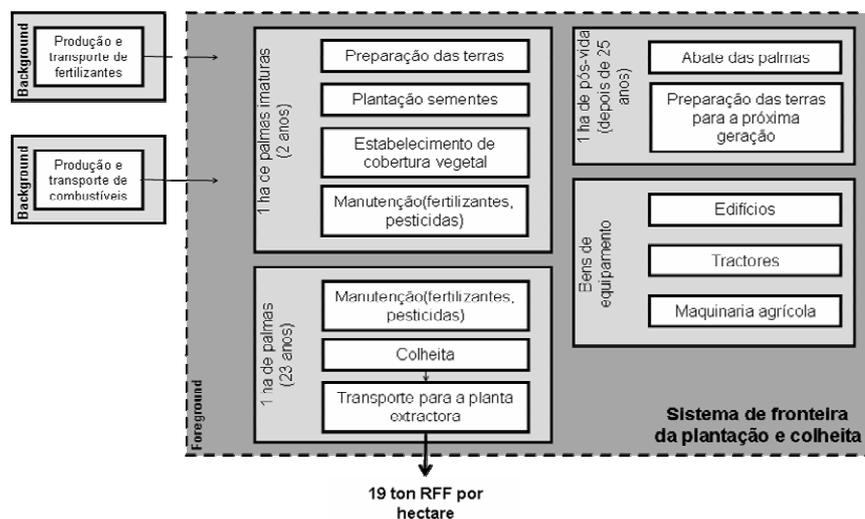


Figura 4.2 Diagrama de fluxos do sistema plantação, colheita e recolha do fruto

Os principais fluxos de entrada considerados na fase da plantação são: fertilizantes, pesticidas, combustíveis fósseis (diesel e gasolina), água, infra-estruturas e maquinaria.

Os fertilizantes são utilizados nas formas de N, K₂O, P₂O₅ e MgO. As entradas de fertilizantes e pesticidas para a realidade colombiana (*Pardo et al. 2006*) (Tabela 4.2) são relativos às plantações da empresa Manuelita Aceites.

Tabela 4.2 Fertilizantes aplicados na plantação

Tipo de fertilizante	Aplicação [kg./ha×ano] [3]	Aplicação [kg./ton.OP.ano] [3]	Energia Fertilizante [MJ/kg]	Energia adicionada [MJ/ton.OP]
N	140,0	3,42E+01	78,1	2,67E+03
P ₂ O ₅	60,0	1,46E+01	17,4	2,55E+02
K ₂ O	250,0	6,10E+01	13,7	8,36E+02
MgO	50,0	1,22E+01	7,1	8,67E+01
Total	500,0	122,0	116,3	3,85E+03
Total na vida útil da palma (incluindo pré-viveiro e viveiro) [MJ/ha×20 anos]				7,69E+04

Não é tomado em conta o transporte dos fertilizantes para a Colômbia, uma vez que não se sabe a proveniência dos fertilizantes. Não há referências da Colômbia relativas à utilização de pesticidas químicos. O controle de pragas faz-se através de diversas técnicas de controlo biológico, como a utilização de fungos entomopatogénicos, de plantas arvenses ou nectaríferas, e o uso de vírus específicos encontrados na mesma plantação (*Acevedo, 2006*).

Segundo (*Pardo et al. 2006*) são consumidos 915,3 litros de gasóleo e 30,5 litros de gasolina anuais por hectare de plantação de palma nas operações de maquinaria e transporte nas plantações, e no processo produtivo. A água utilizada na plantação provém de regadios, sem qualquer tipo de transformação química, e a sua distribuição pelas plantações é feita por acção da gravidade. Os consumos de água na plantação são dados por *Acevedo (2006)*: 0-3 meses: 5 mm.H₂O/dia.m²; 3-7 meses: 7 mm.H₂O/dia.m²; 7-10 meses: 15 mm.H₂O/dia.m²; 10 meses-20 anos: 10 mm.H₂O/dia.m². São considerados como bens de capital, para este caso, as infra-estruturas e maquinaria, adaptados de *Schmidt (2007)*.

Como se pode ver na Figura 4.2, o produto de saída da plantação e colheita são 19 toneladas de RFF, as quais vão ser produto de entrada na planta extractora. Os co-produtos considerados na plantação e colheita são: RFV (cachos de fruta vazia), provenientes do processo unitário de desfruteamento, na planta extractora, e os bio-efluentes, provenientes do tratamento de efluentes.

Segundo *Niels J. et al (2007)*, a capacidade de fixação de carbono numa plantação de palma é calculada a partir do teor de carbono nos RFF. Aponta um valor de 1,148 toneladas de fixação de CO₂ por tonelada de RFF, ou seja, uma fixação de 21,812 toneladas de CO₂ por hectare de palma.

As emissões na plantação e colheita têm várias proveniências: Conversão das terras (alteração do teor de carbono nos solos e biomassa), uso de fertilizantes e de combustíveis fósseis. Foram calculadas para a unidade funcional de 1 hectare, a partir de balanços de massa das substâncias mais relevantes, ou seja, N, P e C, durante o ciclo de vida do óleo de palma. Para o cálculo das emissões é necessário sintetizar todos os dados de entradas e saídas

conhecidas. Os valores residuais são em seguida distribuídos em várias emissões, calculadas a partir de diferentes modelos.

Tabela 4.3 Inventário do ciclo de vida para a plantação e colheita

Unidades	Entradas	Proveniência	Valor	Referências	
	Fertilizantes, Fixação de Carbono e Água				
Massa [kg]	N	Prod. Fertilizantes	140	Pardo, Richard (2007)	
	Fosfato (P ₂ O ₅)	Prod. Fertilizantes	60	Pardo, Richard (2007)	
	K ₂ O	Prod. Fertilizantes	250	Pardo, Richard (2007)	
	MgO	Prod. Fertilizantes	50	Pardo, Richard (2007)	
	CO ₂	Ar	21812	Niels J. et al (2007)	
Volume [l]	Água de regadio	Canais de rega	0	Wambeck, N. (2005)	
	Transporte				
	Diesel	Refinaria	915,3	Pardo, Richard (2007)	
	Gasolina	Refinaria	30,5	Pardo, Richard (2007)	
	Infra-estruturas e maquinaria				
Área [m ²]	Edifícios de agricultura (shed)		0,041	Schmidt (2007)	
Volume [m ³]	Edifícios de agricultura (adm.)		0,00139		
kg	Tractor		4,4		
	Maquinaria agricultura (tillage)		0,4		
	Maquinaria agricultura (geral)		2,1		
	Re-utilização (deposição no solo)				
Massa [kg]	RFV	Planta extractora	3800	Pardo et al. (2006)	
	Cinzas	Planta extractora	912	Weeraratne (2007)	
	Biomassa poda	Plantação	10070	Schmidt (2007)	
	Bio-Efluentes	Sist. Trat. Efluentes	17081	Wambeck (2005)	
	Saídas		Destino	Valor	Referências
	Produtos				
	FFB, RFF	Planta extractora	19000,00	Pardo et al. (2006)	
	Emissões				
		Amoníaco (NH ₃)	Ar	22,35	Schmidt (2007)
		Óxido Nitroso (N ₂ O)	Ar	12,18	
	Óxido Nitríco (NO)	Ar	3,25		
	Nitratos (NO ₃)	Água	407,55		
	Fósforo (P)	Água	1,61		

4.2.1.1 Emissões relativas ao uso de Fertilizantes

A aplicação de fertilizantes implica a emissão de elementos poluentes para o ar, solo e água. Nesta secção são apresentados os cálculos e/ou resultados das emissões provocadas pelo uso de N, P e K como fertilizantes, na fase da plantação e colheita.

Emissões relativas ao Nitrogénio (N)

As principais actividades relativas à plantação que alteram o teor de Azoto (N) nos solos são: A aplicação de fertilizantes e a conversão ou o uso das terras. O excedente de N do

balanço de nutrientes é distribuído em diferentes tipos de emissões, as quais derivam de diferentes reacções químicas e biológicas, presentes no ciclo de nitrogénio (Figura 4.3).

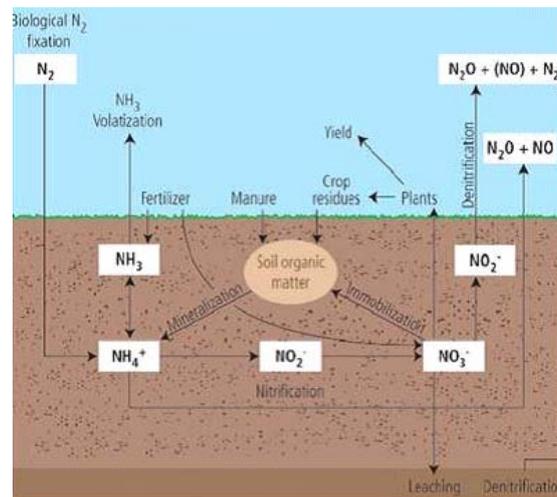


Figura 4.3 Ciclo de nitrogénio (IFA 2007, pág. 4)

A utilização de fertilizantes minerais nos solos provoca a emissão dos seguintes compostos: Amónio (NH_3), emissões directas e indirectas de N_2O , Emissões directas de Monóxido de Azoto (NO), Emissões de Nitratos (NO_3^-), as quais são analisadas de seguida:

Schmidt (2007) considera que o N aplicado é composto por 73% de Sulfato de amónio e 27% de ureia. Então dos 27% de ureia, 30% volatilizam em NH_3 , e 9,6% do N total aplicado volatiliza em NH_3 . As emissões de N_2 são calculadas com base na desnitrificação. O valor de N_2 é obtido subtraindo ao valor da desnitrificação as emissões de N_2O e NO . O óxido nitroso (N_2O) é produzido de uma forma natural em solos e sistemas aquáticos, através de processos microscópicos de nitrificação e de desnitrificação. Com a adição de fertilizantes inorgânicos ou antropogénicos na plantação, vão aumentar os valores de N no solo, e consequentemente, os índices de nitrificação, desnitrificação, e também as emissões de N_2O . Por falta de dados sobre os solos da Colômbia, foram considerados os mesmo parâmetros relativos aos solos que os utilizados por *Schmidt (2007)*. O N_2O é um poderoso GEE, emitido através das práticas de cultivo dos solos, especialmente no uso de fertilizantes comerciais e orgânicos, combustão de combustíveis fósseis, produção de ácido nítrico e queima de biomassa. Segundo o *protocolo de Kyoto* é um dos seis gases com efeito de estufa a ser mitigados¹ (*IPCC, 2002*). As emissões de N_2O que resultam da adição de N antropogénico podem ser: **Directas** – N_2O emitido directamente dos solos onde N é aplicado; **Indirectas** – Emissão de N_2O , proveniente da volatilização do amoníaco (NH_3) e óxidos de nitrogénio (NO_x) seguidos da deposição de amónio (NH_4) e de NO_x nos solos e água. Segundo *IPCC (2000)*, o método para determinar as emissões de N_2O na agricultura tem duas partes:

¹ Mitigação – Intervenção antropogénica para reduzir ou atenuar as fontes de efeito de estufa

1. Calcular as emissões directas de N₂O derivadas da adição de N nos solos
2. Calcular as emissões directas de N₂O derivadas da adição de matéria orgânica

As emissões directas de N₂O na plantação baseiam-se na metodologia apresentada em *IPCC (2000, pág 4.54 a 4.60)*:

Equação 1 Cálculo das emissões de N₂O

$$N_2O_{\text{direct-N}} = [(FSN + FAM + FBN + FCR) * EF1] + (FOS * EF2)$$

Tabela 4.4 Emissões directas de N₂O na fase de plantação e valores dos parâmetros necessários para a equação do cálculo das emissões, em função de 1 hectare (*IPCC 2000, pág 4.54 a 4.60*).

As emissões de NO foram calculadas segundo o modelo descrito em *FAO e FIA (2001)*, onde consideram que as emissões de NO devem ser calculadas através da equação

Equação 2 Cálculo das emissões de NO

$$\ln(\text{kgNO} - \text{N/ha}) = (-1.527) + (F \cdot N_{\text{aplicado}}) + C_r + S + C + D + pH + Cl + LM + FM$$

Os parâmetros utilizados nesta equação estão descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Emissões directas de NO na fase de plantação e valores dos parâmetros necessários para a equação do cálculo das emissões de NO, em função de 1 hectare (*FAO e IFA 2001, pág 35*)

Parâmetro	Descrição	Valor médio (kg/ha)	Comentários
F	Tipo de Fertilizante	0,0042	Valor para um fertilizante, combinação de orgânico e mineral
N _{aplicado}	N aplicado	140	Ver tabela 4.3
C _r	Tipo de cultura	0	0,000 Cultura do tipo "other"
S	textura do solo	-0,008	
C	Teor de carbono (C) no solo	0,14	
D	Drenagem do solo	-0,42	
pH	pH do solo	0	0,000 pH do solo inferior a 5.5, segundo Schmidt 2007
Cl	Clima	0,824	Tropical
LM	Período de tempo de medidas	0,825	
FM	Frequência de medidas	0	
Emissões NO_{direct-N}	Média 20 anos	1,525	

As **emissões de nitratos (NO₃⁻)** são calculadas como o resto ou o valor residual, i.e. o excedente de N do balanço de nutrientes menos as emissões calculadas anteriormente. Usando a média de 119,7 kg de N excedente por hectare para os 20 anos de vida de uma palma (*Schmidt 2007, pág. 101*), e calculados os valores das emissões de NH₃, N₂O e NO, é então possível calcular o valor das emissões de nitratos (**Tabela 4.6**).

Tabela 4.6 Emissões de nitratos provenientes do balanço de N

Parâmetro	Descrição	Valor médio de ciclo de vida (kg/ha)
Emissões Nitratos _{direct-N}	Emissões de nitratos	92,02

Além das emissões directas de N₂O inerentes ao balanço de N, também há emissões indirectas de N₂O provenientes do amoníaco e dos nitratos emitidos. A emissão do amoníaco e a sua subsequente deposição como NO_x, NH₄ e nitratos espalhados pelas plantações, aumenta a quantidade de N disponível para a desnitrificação e nitrificação (*IPCC 2000, pág. 4.67*). As emissões de N₂O-N produzidas pela deposição de NH₄-N e NO_x-N (originária das emissões de NH₃) é de 0,01 (kg.N₂O-N/kg.N) (*IPCC 2000, pág. 4.73*). É assumido que todo o amoníaco emitido é depositado como NO_x ou NH₄. As emissões de N₂O-N produzidos pelos nitratos são de 0,025 (kg.N₂O-N/kg.NO₃-N) (*IPCC 2000, pág. 4.73*).

Tabela 4.7 Emissões indirectas de N₂O

Emissões indirectas de N ₂ O	Valor médio de ciclo de vida (kg/ha)
Provenientes do NH ₃ (kg N ₂ O-N/ton.OP)	1,40
Provenientes dos Nitratos (kg N ₂ O-N/ton.OP)	2,30

Tabela 4.8 Total de emissões do balanço de N

Parâmetro	ha como kg N/ha	Emissões como kg emissões/ha
NH ₃	18,440	22,35
N ₂ O	7,718	12,18
NO	1,525	3,25
Nitratos	92,017	407,55

Emissões de fósforo (P) e Potássio (K)

As emissões de fósforo são mais simples de determinar que as emissões de N. Neste caso, só uma substância é emitida, i.e. o P como fosfato para o solo e a água. Segundo *Schmidt (2007)*, a acumulação de P nos solos é relativamente constante, e que as emissões relacionadas com o balanço de P são calculadas como uma fracção do P excedente no solo. O mesmo refere que 2,9% do P excedente é emitido para a água, o que corresponde a cerca de 0,71 kg PO₄-P/ha. Devido à erosão dos solos, também há emissões de P (0,5-1,3 kg P/ha.ano). Sendo assim, segundo *Schmidt (2007)*, as emissões anuais médias de P rondam os 1,61 kg/ha. Não há dados relativos às emissões de K.

4.2.1.2 Conversão de Terras: Implicações no Balanço de Carbono

A expansão das áreas de cultivo de palma implica directamente 3 impactes ambientais: Aquecimento global, erosão e redução da biodiversidade por fragmentação e destruição de habitat's naturais (Germer, 2006).

As emissões relativas à transformação das terras, que têm como base o balanço de carbono, são calculadas com base em:

- Alterações no teor de carbono acima do solo
- Alterações no teor de carbono no subsolo
- Emissões pela oxidação de matéria orgânica nos solos turfosos²
- Emissões pela queima de floresta (não considerada)

As emissões mais relevantes relativas à perda de carbono são as de CO₂, CH₄ e CO. Por falta de dados relativos às emissões de CH₄ e CO, apenas vão ser consideradas as emissões de CO₂. O ciclo de carbono, que determina as emissões de CO₂, depende para este caso, do balanço de carbono biogénico do ecossistema, devido à conversão das terras em plantações de palma. As emissões de CO₂ de origem biótica³ não são incluídas.

As emissões de carbono, e conseqüentemente o impacte de aquecimento global na plantação dependem do tipo de conversão das terras. É considerado neste trabalho que a conversão das terras não é feita com base em queimadas.

Os parâmetros que determinam as emissões de carbono biogénico aquando da conversão das terras são (Germer 2006):

1. A quantidade de biomassa, e conseqüentemente de carbono (C), presente nos solos antes e depois da conversão das terras. É dividida em dois grupos: Biomassa acima do solo (AGB) e biomassa abaixo do solo (BGB)
2. O teor de carbono (C) no subsolo, antes e depois da conversão das terras.

Carbono (C) nas plantações de palma

A fixação de carbono nas plantações de palma é definida em função do crescimento das palmas e da vegetação, ou seja, na biomassa presente nas plantações. Os valores apresentados resultam da fixação de carbono ao longo da vida de uma plantação de palma, ou seja, 20 anos

² Turfa – s.f. PETROLOGIA rocha sedimentar carbonizada, com elevado teor de humidade, combustível quando seca, habitualmente fibroso e rica em restos vegetais e que constitui a matéria-prima principal para a formação de carvões

³ Emissões de origem Biótica – Emissões de CO₂ de origem animal

(Pardo et al. 2006). O que define os valores da fixação de carbono são: AGB, BGB e a biomassa da vegetação de cobertura. Os dados sobre a biomassa presente nas plantações de palma contêm incertezas associadas à falta de métodos estandardizados. A quantidade de carbono presente numa plantação de palma depende de vários factores. Há vários valores publicados, com médias entre as 50 e 100 toneladas de biomassa acima do solo (AGB), num hectare de palmas. Segundo Germer (2006), o qual efectuou um estudo com base em inúmeras referências, a biomassa AGB e BGB apresenta em média um valor de $82,5 \pm 26$ ton/ha, e a biomassa da vegetação de cobertura apresenta em média um valor de 2,5 ton/ha.

Reijnders (2006) estimou que numa plantação de palma o valor de AGB é de 48 ton/ha. Schmidt (2007) pág. 212 dividiu o carbono presente nas plantações (Tabela 4.9), para cada uma das proveniências, dando um total de 82 ton/ha.

Tabela 4.9 Carbono presente numa plantação de palma na Malásia (Schmidt 2007, pág. 212)

Carbono	Ton/ha
C _{solo}	50
C _{biomassa}	26
C _{vegetação}	1,3
C _{biomassa de poda}	2,1
C _{RFV}	2,5
Total	81,9

Considerando que o teor de carbono presente na biomassa da palma é de 40,4% (Syahrinudin, 2005), e de 50% para a restante vegetação (IPCC, 2003, pág. 3.25), Germer (2006) calculou uma fixação média de 35.3 ± 11.0 ton C/ha. Como se pode ver na Tabela 4.9, Schmidt (2007), pág. 212 apresenta um valor de 32 ton C/ha na biomassa, que representam a fixação de carbono numa plantação de palma. Sendo assim, utiliza-se um valor médio de 34 ton C/ha, o que dá um valor de fixação de 125 ton CO₂/ha, para uma vida de 25 anos. Para a vida considerada de 20 anos dá um valor de fixação de 100 ton CO₂/ha.

Conversão das terras

O cálculo das emissões relativas à conversão de terras vai ser considerado para três realidades diferentes: Conversão de floresta tropical com solo mineral, com solo turfoso, e de savanas/pastagens em plantações de palma, com base em Germer (2006), Reijnders (2006), Schmidt (2007), Syahrinudin (2005), San José (1998) e IPCC (1997 e 2003).

O inventário do ciclo de vida da plantação e colheita está em função de 19 toneladas de RFF, que é a produtividade média por hectare de plantação nas plantações da *Manuelita Aceites*. O tempo de vida considerado em média, para uma plantação de palma na Colômbia, é de 20 anos.

Conversão floresta tropical (solo mineral) – plantação de palma

Os dados relativos à conversão das terras na Colômbia para plantações de palma referem que, antes de serem utilizadas como plantações de palma, a grande maioria das terras eram pastagens ou savanas. Apesar disso, achei interessante introduzir os dados relativos ao ciclo de carbono, no caso de uma conversão de floresta tropical para uma plantação de palma, uma vez que a Colômbia é um país tropical, e também com grandes áreas de floresta tropical. Como se vai poder reparar, os resultados relativos ao ciclo de carbono são muito diferentes para os dois tipos de conversão de terras considerados.

Segundo *IPCC (2003) pág. 3.25*, a fração de carbono (C) presente na biomassa de uma floresta tropical é de cerca de 50%. *Germer (2006)* estimou que, em média, numa floresta tropical da Malásia a biomassa presente acima dos solos (AGB) é em média 295 ± 152 toneladas e que abaixo do solo (BGB) é de 47 ± 26 toneladas, dando um total de 342 ± 178 toneladas de biomassa nos solos da floresta tropical. Utilizando os valores de *Germer (2006)*, o teor de carbono presente na biomassa é então de 171 ± 89 toneladas. Fazendo a conversão de C para CO₂ de multiplicando por 44/12 (*IPCC 2003 pág. 3.24*), resulta uma emissão de 627 ± 326 toneladas de CO₂ por hectare de plantação de palma. *Germer (2006)* considera um tempo de conversão total de 25 anos. Neste trabalho são considerados 20 anos (tempo de vida na plantação). Sendo assim, as emissões anuais de CO₂ por ano, relativas à perda da biomassa, seriam em média de $31,35 \pm 16,3$ toneladas.

Reijnders (2006) estimou que uma floresta tropical com solos minerais apresenta um teor de 235 tonC/ha. 50% desta biomassa é convertida em C emitindo 117,5 ton C/ha, e conseqüentemente 431 ton CO₂/ha. Para os 20 anos de vida de uma plantação de palma na Colômbia, o resultado seria 21,6 ton CO₂/ha.ano. No *IPCC (2003, pág. 3.157 e 3.43)* os valores de AGB e BGB, para a floresta tropical no Brasil, são respectivamente 174 e 57 ton C/ha, dando um total de 231 ton de biomassa por hectares. 50% desta biomassa é convertida em C emitindo 115,5 ton C/ha, ou seja, 424 ton CO₂/ha. Para os 20 anos de vida de uma plantação de palma na Colômbia, o resultado seria 21,2 ton CO₂/ha.ano.

Quando se faz o balanço de carbono relativo ao uso de terras, é necessário calcular as variações de carbono relativas não só à biomassa, mas também ao carbono presente no subsolo. Com a conversão das terras pode haver emissão ou fixação de carbono. Os stocks de carbono e os fluxos potenciais de GEE devem ser definidos acima de tudo pelo tipo de solos e, segundo o *IPCC*, com duas abordagens diferentes: emissões em solos minerais e em solos orgânicos. Quando se faz a conversão de uma floresta tropical em plantação de palma, há uma grande quantidade de carbono que é perdida através da decomposição. Utilizando a metodologia de *IPCC (1997)*:

$$SC_M = SC_N * \text{base factor} * \text{tillage factor} * \text{input factor}$$

SC_M – Quantidade de carbono depois da conversão das terras

SC_N – Quantidade de carbono na vegetação nativa

Base factor (factor base) – 0,7 para cultivo a longo termo e 0,5 para terras degradadas

Tillage factor (factor de lavoura) – Em sistemas não cultivados é 1,1

Input factor (factor de entrada) – 1,0 quando os resíduos das colheitas são retidos

Aplicando a Equação 3, para a conversão de floresta tropical em plantação de palma, *Germer (2006)* refere que, das 120 ± 60 ton C/ha presentes num solo mineral de uma floresta tropical, cerca de $40,8 \pm 20,4$ ton C/ha são perdidos para a atmosfera, provocando uma emissão de cerca de 150 ± 75 ton CO₂/ha.

No entanto, as emissões de carbono provenientes do subsolo dependem muito do tipo de solo da plantação de palma: Solos minerais ou orgânicos (turfosos⁴). Por isso, enquanto que para um solo mineral, as emissões de carbono provenientes do subsolo são de 150 ± 75 ton CO₂/ha (*Germer 2006*), para os subsolos orgânicos ou turfosos, pela sua constituição quase 100% orgânica, as emissões de carbono são mais elevadas, especialmente na presença de água. Segundo *Germer (2006)*, as emissões de CO₂ devidas à conversão de floresta tropical com solos orgânicos, em plantações de palma, são em média de 816 ± 393 ton CO₂/ha. Isto significa uma taxa de emissões de CO₂ cinco vezes maior, relativamente aos solos minerais. Segundo *IPCC (2003)*, p 3.79, as emissões de carbono podem chegar às 20 ton.C/ha.ano, para um tratamento e drenagem normais. Já *Reijnders (2006)* afirma que as emissões de carbono numa plantação de óleo de palma rondam as 10-15 ton.C/ha.ano para um solo orgânico turfoso. Escolhendo o valor de 10 ton.C/ha.ano, metade do valor utilizado por *IPCC*, porque o tratamento dos solos⁵ só efectuado à volta de 20 em 20 anos, e porque o nível de carbono vai decrescendo ao longo dos anos. 10 toneladas de C correspondem a cerca de 37 toneladas de CO₂ (*Schmidt 2007*), as quais dariam origem a cerca de 734 toneladas de CO₂ em 20 anos de vida de uma plantação de palma, valor semelhante ao obtido por *Germer (2006)*.

⁴ Turfa (*peat* em inglês) – Rocha sedimentar carbonizada, com elevado teor de humidade, combustível quando seca, habitualmente fibrosa e rica em restos vegetais, e que constitui a matéria-prima principal para a formação de carvões (Dicionário da língua portuguesa da Porto Editora).

⁵ Em solos turfosos, o lavar das terras acelera o processo químico que liberta o carbono.

Conversão de savana ou pastagem antropogénica (Llanos) – Plantação de palma

Apesar de não ter certezas relativamente à utilização das terras onde estão fixas as plantações da *Manuelita Aceites*, considera-se que estas foram implantadas em terreno baldio, ou em pastagens antropogénicas, às quais *Germer 2006* denomina de “Savana”. Segundo o *IPCC*, uma savana são formações de vegetação com uma predominante cobertura de erva. Na Colômbia, as savanas neotropicais predominantes na zona de estudo são os “Llanos de Orinoco”. São o maior ecossistema no norte da América do sul. São caracterizadas por vegetação alta dispersa ou pouco abundante, e por erva vertical.



Figura 4.4 Savana colombiana (Llanos de Orinoco)(<http://en.wikipedia.org/wiki/Llanos>)

Germer (2006), *sec. 3.2* calculou através de vários estudos, que numa pastagem na Indonésia, a biomassa presente acima do solo era em média de $11,2 \pm 7,3$ ton/ha, e o factor de relação entre a biomassa no solo e acima do solo seria de 1,4. Sendo assim, a biomassa presente no solo, numa pastagem, seria em média de $15,5 \pm 10,1$ ton/ha, o que daria um total de $26,7 \pm 17,4$ toneladas de biomassa num hectare de pastagem ou savana. O mesmo *Germer (2006, sec. 4)* estimou que o teor de carbono (C) na biomassa das pastagem é de 43%, ou seja, $11,48 \pm 7,48$ ton C/ha. Fazendo a conversão para emissões de CO₂ dá 42,13 ton CO₂/ha, e dividindo pelos 20 anos de vida da plantação, dá uma emissão de 2,1 ton CO₂/ha.ano, na decomposição da biomassa.

Na Colômbia, *San José (1998)* estimou um valor de AGB nos “Llanos” de 6 a 8 toneladas. O mesmo aplicou um relação de BGB/AGB de 0,6, dando um valor de 3,6 a 4,8 toneladas, dando um valor médio de 11,2 toneladas de biomassa nos Llanos. Aplicando os 43% utilizados por *Germer (2006)*, *sec. 4*, obtém-se um valor médio de 4,8 ton C/ha, os quais podem equivaler a uma emissão de 18 toneladas de CO₂, no caso da limpeza das terras, para a conversão das mesmas em plantações de palma.

Ao contrário da conversão de floresta tropical em plantação de palma, se for uma conversão de pastagem em plantação de palma, vão ocorrer fixação de carbono no solo. *Germer (2006)*, *sec. 6*, afirma que nesta conversão há uma fixação de $13,2 \pm 6,6$ ton C/ha, ou

seja, de 48,4 ton CO₂/ha para o tempo de vida da plantação, dando cerca de 2,4 ton CO₂/ha.ano.

Resultados

Os resultados do balanço de carbono relativo à conversão das terras nativas em plantações de palma dependem da biomassa e do teor de carbono nas terras, antes e depois da conversão.

Tabela 4.10 Balanço de Carbono relativo na conversão de terras para a vida das plantações de palma (20 anos), em ton.CO₂-eq/ha

Terras convertidas	Limpeza das terras	Alterações de carbono no solo	Fixação nas plantações de palma	Balanço
Pastagem, Savana	42,13	-48	-129	-134,87
Floresta tropical, solos minerais	627	150	-129	648
Floresta tropical, solos turfosos	627	816	-129	1314

Tabela 4.11 Balanço anual de carbono relativo na conversão de terras, em ton.CO₂-eq/ha

Terras convertidas	Limpeza das terras	Alterações de carbono no solo	Fixação nas plantações de palma	Balanço
Pastagem, Savana	2,107	-2,40	-6,45	-6,74
Floresta tropical, solos minerais	31,350	7,50	-6,45	32,40
Floresta tropical, solos turfosos	31,350	40,80	-6,45	65,70

4.2.2 Planta extractora

O diagrama de fluxos para o subsistema da planta extractora está representado na Figura 4.5, onde estão patentes as fronteiras do subsistema, todas as unidades processuais, e a produtividade referente à unidade funcional: **1 tonelada de óleo de palma**.

Nesta fase, o fruto da palma vai sofrer uma série de processos para a obtenção de óleo de palma clarificado, o óleo de palmiste e a torta de palmiste. Esta empresa processa cerca de 32 [ton.RFF/h] com uma intensidade de 22 h/dia, 24,5 dias por mês, num ano. Vão ser englobados nesta fase 2 processos produtivos: produção de óleo de palma e produção das amêndoas de palma, que tem como produtos o óleo de palmiste⁶ e a torta de palmiste⁷.

⁶ Óleo de palmiste – Óleo de amêndoa de palma

⁷ Torta de palmiste – Torta de amêndoa de palma

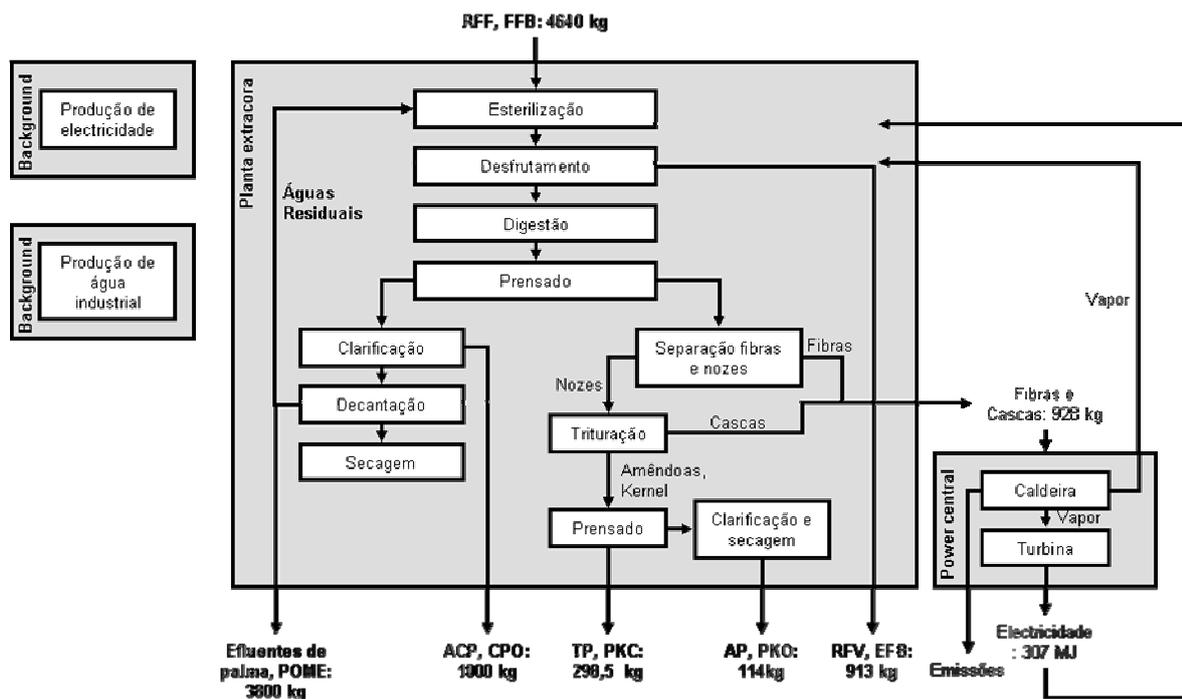


Figura 4.5 Fluxos da planta extractora

Como se pode ver no Figura 4.5, os processos de produção de óleo de palma e palmisteria (produção de óleo e torta de palmiste), estão incluídos no mesmo sistema, ou seja, apresentam as mesmas fronteiras. Isto acontece porque as emissões relativas à planta extractora são comuns aos 2 processos, ou seja, a grande maioria das emissões são provenientes da queima de fibras e cascas na caldeira.

As entradas na planta extractora são: RFF, água e energia eléctrica. *Pardo et al. (2006)* calculou um consumo de 668,4 MJ/ton.OP, sendo que cerca de 54% da energia eléctrica consumida é produzida internamente, através do aproveitamento de resíduos num sistema caldeira/turbina. *Wambeck (2005)* apontou para um consumo médio, na Colômbia, de 467 MJ/ton.OP. Como se pode ver na Tabela 4.12, cerca de 77,1% da energia eléctrica da Colômbia deriva de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural).

Tabela 4.12 Partilha das diferentes tecnologias para a energia eléctrica na Colômbia (*Plan E. N., 2006*)

Tecnologia	Colômbia
Petróleo	48,90%
Carvão	10,30%
Gás Natural	17,90%
Vento	0,00%
Biomassa	13,10%
Hídrica	9,90%
Nuclear	0,00%

A água industrial que entra na planta extractora é encaminhada para vários processos unitários. Como também é utilizada sob a forma de vapor, as perdas por evaporação são elevadas. Foi feita uma estimativa média das perdas por evaporação, sabendo o valor médio de entrada de água e o valor de água que se mistura com os efluentes. Na Colômbia os valores de consumos de água industrial nas plantas extractoras, está entre 730 e 1050 litros/ton.RFF, com uma média de 899 litros/ton.RFF (*Wambeck, 2005*).

Os co-produtos ou resíduos internos da planta extractora são: **Efluentes, RFV, Fibras, Cascas e cinzas**. Os RFV voltam às plantações de palma, servindo como abono orgânico. As fibras e as cascas são encaminhadas para a caldeira, onde vão ser utilizadas como combustível para a produção de vapor. Os efluentes da planta extractora são encaminhados para o tratamento de efluentes, onde são transformados, com fins energéticos e ecológicos. São um resíduo interno com uma elevada importância energética e ambiental para o sistema, não só pelo seu teor químico mas também pela elevada quantidade produzida, como se pode comprovar na

Tabela 4.15. Deste modo, o sistema de tratamento de efluentes é tratado separadamente da planta extractora, de modo a poder avaliar com mais precisão a sua importância no processo. Os efluentes são uma mistura de biomassa de palma (cerca de 40% das entradas de RFF) (*Pardo et al. 2006*), com água que é introduzida no processo.

As Fibras e Cascas são utilizadas como combustíveis de queima em caldeiras a vapor. *Pardo et al. (2006)* não faz qualquer referência à venda destes co-produtos, e considera-se o seu consumo integral como combustível na caldeira. No entanto, por vezes há um excesso de cascas que não são utilizadas na caldeira e são vendidas. As propriedades energéticas destes co-produtos estão presentes na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Propriedades energéticas dos co-produtos (*Pardo Richard 2007*)

Produto	HHV [MJ/kg]
Fibras	18,60
Cascas	20,80
EFB (50% mistura)	8,16

O vapor é produzido na caldeira e consumido internamente, ou libertado para a atmosfera. Não há qualquer variação possível a registar para este co-produto. A energia térmica presente no vapor é aproveitada por uma turbina para produzir energia eléctrica (cerca de 54% das necessidades do sistema)

Os RFV são utilizados como fertilizantes orgânicos nas plantações de palma. De qualquer modo, também podem ser utilizados como combustível nas caldeiras. Segundo *Pardo (2007)* apresentam um HHV de 8,16 MJ/kg (Tabela 4.13).

Da planta extractora saem um produto e dois co-produtos, que são também as saídas do sistema produtivo:

- **Produto:** Óleo de palma
- **Co-Produtos:** Óleo de Palmiste (AP ou PKO) e Torta de Palmiste e (TP ou PKC)

A diferença entre o óleo de palma e o óleo de palmiste reside no teor de ácidos gordos⁸.

Tabela 4.14 Emissões na caldeira, em função da massa de combustíveis (fibras+cascas) (Schmidt 2007)

Emissões	Emissões (kg/kg combustível Caldeira)
CO2	1,19E+00
SO2	1,70E-05
NO2	1,70E-05
NO2	3,34E-03
CO	5,09E-03

Tabela 4.15 Inventário para o ciclo de vida do óleo de palma na Planta extractora

Unidades	Entradas	Proveniência	Valor	Referências
Energia[MJ]	Electricidade	Rede eléctrica Nacional	307,464	Pardo et al. (2006)
Massa [kg]	FFB, RFF	Plantação	4651,16	
Volume [l]	Água Industrial	Rede de água	4181,40	
Área [m ²]	Building halls	Prod. Edifícios	2,54E-02	Schmidt (2007)
Volume [m ³]	Building, multi story	Prod. Edifícios	4,70E-02	Schmidt (2007)
kg	Maquinaria	Prod. Maquinaria	5,53	Schmidt (2007)
Unidades	Re-utilização			
Energia[MJ]	Electricidade	Turbina, Planta extractora	360,94	Pardo et al. (2006)
	Fibras e cascas	Planta extractora	930,23	
	Vapor	Caldeira, Planta extractora	3558,14	
	Saídas	Destino	Valor	Referências
Re-utilização				
	EFB, RFV	Plantação	930,23	Pardo et al. (2006)
	POME (Efluentes)	Sist. Trat. Efluentes	4181,40	Pardo et al. (2006)
	Fibras de palma	Caldeira, Planta extractora	651,16	Pardo et al. (2006)
	Cascas	Caldeira, Planta extractora	279,07	Pardo et al. (2006)
	Cinzas	Plantação	223,26	Weeraratne (2007)
	Vapor	Planta extractora	3558,14	Pardo et al. (2006)
Produtos				
Massa [kg]	Óleo de Palma	Biodiesel, cosméticos, alimentares, lubrificantes, etc.	1000	Pardo et al. (2006)
	Óleo Palmiste	Biodiesel, cosméticos, alimentares, lubrificantes, etc.	116,28	
	Torta de Palmiste	Rações animais	279,07	
Emissões				
	SO ₂	Ar	0,19	Weeraratne (2007)
	CO ₂	Ar	1106,98	Weeraratne (2007)
	NO ₂	Ar	1,86	Weeraratne (2007)
	NO	Ar	3,11	Schmidt (2007)
	CO	Ar	4,74	Schmidt (2007)
	Partículas	Ar	0,37	Weeraratne (2007)
	Vapor de água	Ar	1395,35	Pardo et al. (2006)

⁸ Os principais ácidos gordos do ACP são os *palmitic*, *oleic*, *linoleic* e *stearic*. Em contraste os principais ácidos gordos de palma kernel do petróleo *lauric*, *myristic*, *oleic* e *palmitic* (composição muito semelhante à do óleo de coco (*cocos nucifera*)).

4.2.3 Tratamento de Efluentes

O diagrama de fluxos do tratamento de efluentes está representado na Figura 4.6, onde estão patentes as fronteiras do subsistema, as unidades processuais e a produtividade em função da unidade funcional: **1 tonelada de efluentes**. Na Tabela 4.17 estão presentes os resultados de inventário relativos ao tratamento de efluentes.

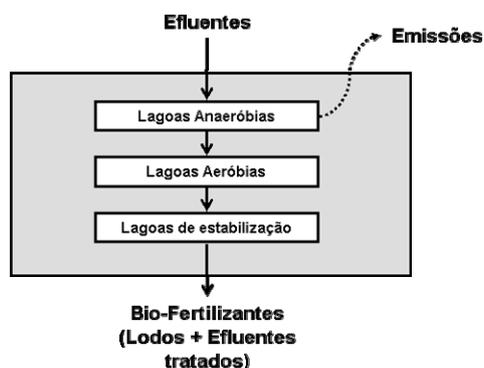


Figura 4.6 Fluxos no tratamento de efluentes

A quantidade de efluentes, em função dos RFF processados, varia entre os 0,55 e 1,2 ($m^3/ton.RFF$), dando uma média de 0,82 ($m^3/ton.RFF$) (Wambeck 2005). Considerando a densidade dos efluentes de $1\text{ kg}/m^3$, são produzidos cerca de 3800 kg de efluentes por tonelada de óleo de palma (Wambeck 2005).

As proveniências dos efluentes são: (Wambeck 2005)

- 55% provenientes da clarificação do óleo de palma
- 15% provenientes dos condensados da esterilização
- 8% provenientes da palmisteria
- 12% provenientes da caldeira
- 10% provenientes de outros e limpeza

Na Tabela 4.16 estão expostas as características consideradas para os efluentes.

Tabela 4.16 Características dos efluentes em função de 1 tonelada de POME

Componentes efluentes	Unidades	Quantidades	Referências
Sólidos dissolvidos		39,6	Pardo, Richard (2007)
N		0,95	Schmidt, Jannick (2007)
P		0,15	Schmidt, Jannick (2007)
K		1,96	Schmidt, Jannick (2007)
BOD (3 dias, 30°C)	(kg/ton.efl.)	40	Pardo, Richard (2007)
COD (3 dias, 30°C)		60	Pardo, Richard (2007)
Cu		0,0009	Schmidt, Jannick (2007)
Zn		0,0023	Schmidt, Jannick (2007)

É necessária energia eléctrica para o funcionamento das bombas, mas não há dados relativos a essa questão. Com a utilização do tratamento aeróbio, para a Manuelita Aceites, foi

registado o aproveitamento de um co-produto: **Lodos orgânicos** ou **efluentes tratados**, que são aproveitados como fertilizantes orgânicos, nas plantações de palma. O tratamento aeróbio implica emissões. As principais emissões provenientes do tratamento de efluentes são:

- ✓ Metano (CH₄)
- ✓ Dióxido de carbono (CO₂)
- ✓ Amoníaco (NH₃)
- ✓ Nitrogénio (N₂)
- ✓ Óxido Nitroso (N₂O)
- ✓ Sulfeto de hidrogénio (H₂S)

A quantidade de emissões de N₂, N₂O e NH₃ depende do valor da remoção de Nitrogénio (N) depois do tratamento. Não foram encontrados dados sobre a remoção de nitrogénio no tratamento anaeróbio para a Manuelita Aceites. Desse modo, foi considerado o valor usado por Schmidt (2007, pág. 163) de 0,05 kg de N por tonelada de efluentes. Segundo IPCC (2000, p 4.43), 0,1% desse valor removido provocam emissões de N₂O e aplica-se o mesmo valor para N₂, ou seja, 0,0005 kg de N₂O e N₂ por tonelada de efluentes. Também estima que o valor de NH₃ emitido é igual ao valor de N removido durante o tratamento menos o valor das emissões de N₂O e N₂, dando origem à emissão de 0,049 kg de NH₃ por tonelada de efluentes. Para calcular o valor das emissões do Metano (CH₄), do dióxido de carbono (CO₂) e do Sulfeto de hidrogénio (H₂S), foi necessário saber qual o valor de biogás libertado. O biogás presente no POME é de 28 (m³/ton.POME) (Pardo et al. 2006). O CH₄ provém da mistura de biogás, produto da decomposição de matéria orgânica presente no POME. Segundo Pardo et al. (2006), o Biogás do POME, para a Manuelita Aceites, apresenta uma mistura de cerca de 60% de CH₄, e o restante de CO₂. Para uma percentagem de 60% de CH₄, sabendo que a densidade do CH₄ é de 0,717 kg/m³, e assumindo que a densidade

Para o CO₂ acontece o mesmo. Sabendo que o CO₂ corresponde a 40% do biogás (Pardo, 2007), e que a densidade do CO₂ é de 1,9769 kg/m³ (<http://www.uigi.com>), então há uma emissão de 22,14 kg de CO₂ biogénico por tonelada de efluentes. do POME é de 1 (kg/m³), tem-se uma emissão de 12 kg de CH₄ por tonelada de efluentes.

Segundo Schmidt (2007, p.164), a percentagem de H₂S no biogás pode ir até aos 2%. Sabendo que a densidade do H₂S é de 1,363 kg/m³, retirada do site http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_sulfide, a emissão de H₂S é igual a 2% da quantidade de biogás libertado no tratamento, dando 0,763 kg de H₂S por tonelada de efluentes.

Tabela 4.17 Inventário de ciclo de vida do tratamento de efluentes, em função de 1 tonelada de efluentes

Unidades	Entradas	Proveniência	Valor	Referências
<i>Massa [kg]</i>	POME (Efluentes)	Planta extractora	1000,00	Pardo et al. (2006)
	Saídas	Destino	Valor	Referências
	Re-utilização			
	Bio-Efluentes	Plantação	1000,00	Wambeck (2005)
	Emissões			
	Metano (CH ₄)	Ar	1,20E+01	Pardo et al. (2006)
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Ar	22,14	Pardo et al. (2006)
	Sulfeto de hidrogénio (H ₂ S)	Ar	7,63E-01	Schmidt (2007)
	Amoníaco (NH ₃)	Ar	4,90E-02	Schmidt (2007)
	Óxido Nitroso (N ₂ O)	Ar	5,00E-04	Schmidt (2007)
Nitrogénio (N ₂)	Ar	5,00E-04	Schmidt (2007)	

4.3 Alocação de massa e Expansão de sistema

O produto em estudo é 1 tonelada de óleo de palma, no entanto é co-produzido com o óleo de palmiste e a torta de palmiste. Como referido em 3.2, segundo as normas *ISO 14043 (2007)*, para resolver a questão da multi-funcionalidade do processo é necessário recorrer a uma alocação ou a uma expansão de sistema. Para o sistema principal é usada a alocação de massa, e usa-se a expansão de sistema como cenário alternativo.

Segundo *Pardo et al. (2006)*, a produção de 1 tonelada de óleo de palma implica a produção de 0,298 toneladas de torta de palmiste e de 0,116 toneladas de óleo de palmiste. Efectuando a alocação de massa, obtêm-se os coeficientes de alocação de 71%, 21% e 8%, respectivamente.

Expansão de sistema

Usando expansão de sistema, sabe-se que para 1 tonelada de palma as saídas da planta extractora são: 116 kg de óleo de palmiste e 279 kg de torta de palmiste. O autor atribui um valor nutritivo (FU) de torta de palmiste de 0.791 FU/kg. No mercado global, o óleo de palmiste pode substituir a produção de 116 kg de óleo de coco (*Schmidt, 2004, pág. 9*), por apresentara mesma funcionalidade e propriedades semelhantes. Os 116 kg de óleo de côco são co-produzidos com 70 kg de torta de côco, os quais devem ser contabilizados. A torta de côco é utilizada para produzir rações de animais. O valor energético nutritivo da torta de coco é de 1.03 FU/kg (*Schmidt, 2004, pág. 9*). No entanto, não foram encontrados dados sobre a torta de côco na base de dados do Ecoinvent, e foi necessário encontrar uma solução alternativa para a não inclusão da torta de côco na expansão de sistema. Considerou-se nula a expansão de

sistema da torta de côco, aumentando o valor de FU disponível de 149 para 221 FU's, como se pode constatar na Figura 4.7. O valor energético excedente do balanço entre a torta de palmiste e a torta de coco será aproveitado (ver Tabela 4.18 e Tabela 4.19), para aumentar o domínio da expansão de sistema nos sistemas produtivos da soja e da colza.

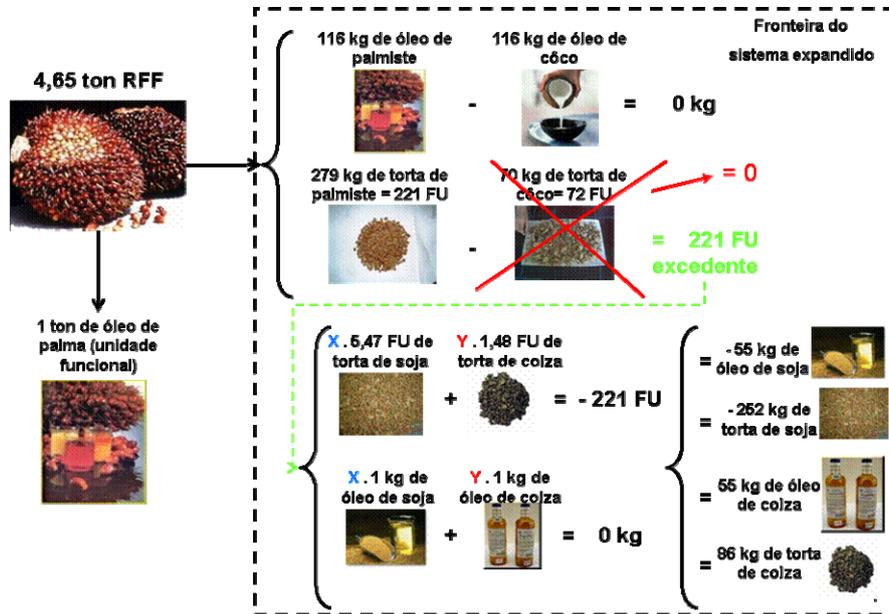


Figura 4.7 Expansão de sistema para a produção de 1 tonelada de óleo de palma

Como no caso da torta de colza, a torta de soja é considerada como o fornecedor mais sensível proteínas de rações para animais. Então, o valor energético dependente do balanço entre a torta de palmiste e a torta de côco vai afectar proteínas de soja presentes na torta de soja. Mas como a torta de soja é co-produzida com óleo de soja, é necessário efectuar um balanço entre a soja e a colza, para determinar o valor de óleo de soja afectado, entrando também a colza na expansão de sistema do óleo de palma, como se pode ver na Equação 4.

Equação 4 balanço de massa e energia entre a colza e a soja

$$\begin{cases} x \cdot \text{óleosoja} + y \cdot \text{óleocolza} = 0 \\ x \cdot \text{tortasoja} + y \cdot \text{tortacolza} = -221FU \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 1 \cdot \text{óleosoja} + 1 \cdot \text{óleocolza} = 0 \\ 5,47 \cdot \text{tortasoja} + 1,48 \cdot \text{tortacolza} = -221FU \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} x = -0,055 \\ y = 0,055 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{óleosoja} = 1000 \cdot (-0,037) = -55kg \\ \text{óleocolza} = 1000 \cdot 0,037 = 55kg \\ \text{tortasoja} = 5470 \cdot (-0,055)[FU] \div 1,2[FU / kg] = -252kg \\ \text{tortacolza} = 1480 \cdot 0,055[FU] \div 0,954[FU / kg] = 85kg \end{cases}$$

Tabela 4.18 Resultados do balanço de massa e energia entre a palma e o côco.

Produto	Massa (kg)	Valor energético (FU)
Óleo de palmiste	116,28	-
Óleo de côco	-116,28	-
Torta de palmiste	279,07	220,744186
Torta de côco	0,000	0
Balanço VN (FU) T _{palmiste} com T _{côco}	-	220,744186

Tabela 4.19 Resultados do balanço de massa e energia entre a colza e a soja.

Produto	Valor energético (FU)	Massa (kg)
Óleo de colza	-	55,32435741
Óleo de soja	-	-55,32435741
Torta de colza	81,88004896	85,82814356
Torta de soja	-302,624235	-252,1868625

4.4 Cenários Alternativos

Nesta dissertação vão ser considerados alguns cenários alternativos, os quais servem de comparação com o sistema principal, uma vez a introdução dos mesmos altera os resultados finais. Os cenários alternativos considerados são:

- No sistema principal é considerado, para a conversão de terras que, as terras eram savanas, anteriormente às plantações de palma. Nesta dissertação apresentam-se dois cenários alternativos para o tipo de terras anteriores às plantações de palma: Floresta tropical com solos minerais e; Floresta tropical com solos turfosos. É estudada a influência destes cenários no balanço de carbono (ver Tabela 4.11).
- A libertação do metano para a atmosfera produz consequências 21 vezes superiores às do CO₂ (Yeoh, 2004), no que diz respeito à categoria de impacte ambiental “aquecimento global”. Segundo Pardo et al. (2006), o tratamento aeróbio dos produz biogás (60% CH₄ + 40% CO₂). Yeoh (2004) afirma que cerca de 92% do metano (CH₄) pode ser aproveitado através de biodigestores anaeróbios, sendo depois utilizado para a produção de energia eléctrica, a qual pode ser usada dentro ou fora do sistema produtivo. Sendo assim, para a libertação de 12 kg de CO₂ por tonelada de efluentes, o aproveitamento de 92% das emissões de metano implica a libertação de apenas 0,96 kg de metano por tonelada de efluentes. Além das vantagens ambientais deste processo, também haveria uma grande contribuição de créditos de carbono deste processo, no ciclo de vida do óleo de palma.
- Multifuncionalidade: Uso de expansão de sistema em vez de alocação de massa. A expansão de sistema é frequentemente um processo complexo e algo subjectivo,

razão pela qual o tratamento da multifuncionalidade foi efectuado com base na alocação de massa (ver Tabela 4.18 e Tabela 4.19).

4.5 Hipóteses simplificadoras e limitações do estudo

Por falta de dados relativos a questões de inventário, foi necessário recorrer a hipóteses simplificadoras de estudo, impondo algumas limitações no estudo.

Foram omissos do inventário, na fase de plantação e colheita, os dados relativos à produção de sementes de palma, dos pesticidas e fungicidas utilizados, do trabalho humano, e da energia solar. Também não estão presentes os dados relativos à construção dos edifícios e da maquinaria do processo, à manutenção e eliminação dos mesmos. Não foi inserido no simapro 7.0 o valor da ração de côco (coconut meal), uma vez que não se encontra na base de dados do *Ecoinvent*. A conversão de terras provoca também alterações no teor de N na biomassa presente acima dos solos, e também no subsolo. Isto provoca emissões de N_2O , NO, N_2 e nitratos. No entanto estas não são calculadas neste trabalho. São considerados os dados do balanço de carbono relativos à transformação de terras do tipo floresta tropical com solo turfoso em plantação de palma, mas não é apresentado o método de cálculo, o qual é semelhante aos apresentados para a savana e para a floresta tropical com solo mineral. Os fertilizantes podem conter contaminantes de metais pesados, os quais são emitidos para o solo. Não há dados que comprovem a existência de metais pesados no óleo de palma. Há metais pesados que vão continuar no processo até estes se precipitarem nos lodos excedentes do tratamento de efluentes. O mesmo acontece com a torta de palmiste. Este vai ser usado como ração para animais, sendo depositado por estes na terra, como uma emissão para o solo (*Schmidt 2007*).

Os dados omitidos do subsistema da planta extractora são: Ciclos de vida de lubrificantes, ferramentas, computadores, papel, material consumível de escritório, etc., que não foram considerados no inventário de ciclo de vida. Não são dados valores de vapor perdido na caldeira, nem da energia presente na massa de vapor que é dada.

No tratamento de efluentes não são incluídos os dados do ciclo de vida das estruturas de base para o tratamento de efluentes da produção de óleo de palma, bem como de materiais usados como bombas. São usados alguns químicos no tratamento de efluentes de óleo de palma, mas não há informações sobre eles. É possível que haja emissões de nitratos, mas não foram encontrados dados de inventário para emissões de nitratos nesta fase.

5 RESULTADOS: AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA DE CICLO DE VIDA

Neste capítulo apresentam-se os resultados da avaliação ambiental (ACV) e energética (AECV) do ciclo de vida do óleo de palma. Os resultados de ACV quantificam os impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida, e ajudam a identificar possíveis melhorias e opções de sustentabilidade. Os resultados ambientais são apresentados por intermédio do programa informático Simapro 7.0, com os métodos CML 2000 e Eco-Indicador 99.

Os resultados de AECV são apresentados sob a forma de indicadores de eficiência energética, na secção 5.3.

5.1 Sistema principal

Os resultados ambientais de ciclo de vida para o sistema principal estão apresentados na Figura 5.1. Usando o método CML 2000, verifica-se que a grande maioria dos impactos ambientais são provocados na fase da plantação (a verde). Os impactos associados à planta extractora (a vermelho), e do tratamento de efluentes (a cinzento) também são relevantes, e por isso, devem ser contabilizados.

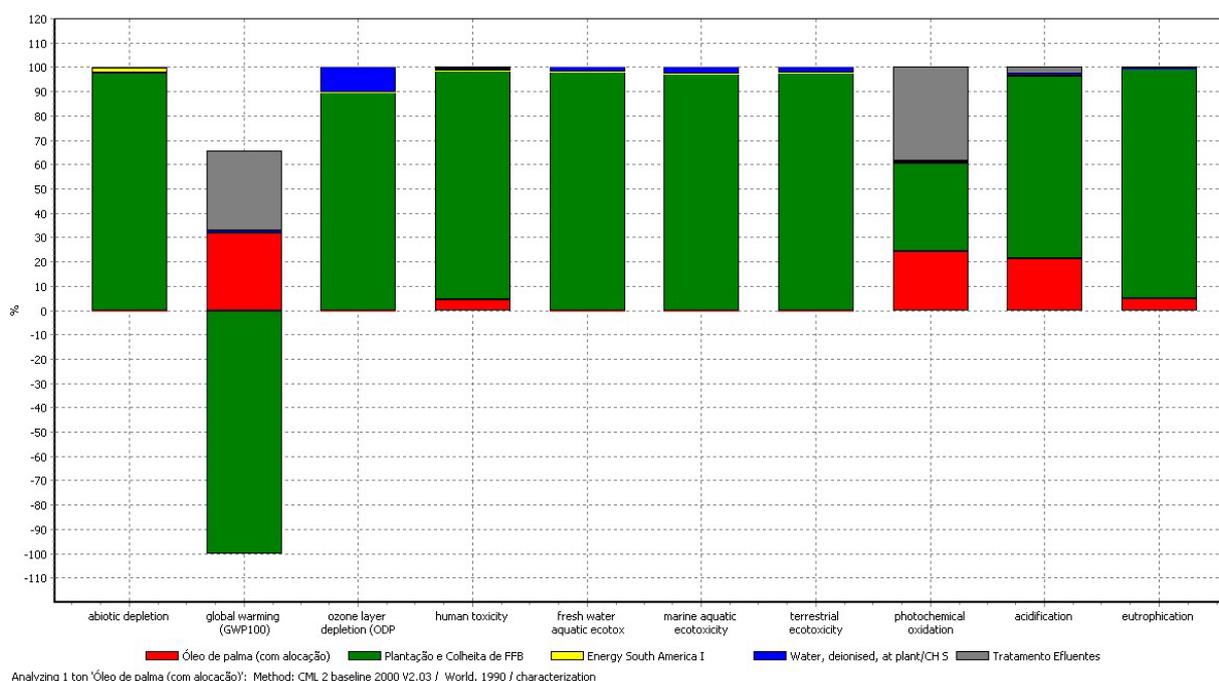


Figura 5.1 Caracterização dos resultados de ACV do sistema principal. Método: CML 2000.

Na Figura 5.2 é apresentada a normalização dos resultados, onde o CML 2000 aponta como impactes mais relevantes: eutrofização; ecotoxicidade marinha; aquecimento global; depleção abiótica; e acidificação.

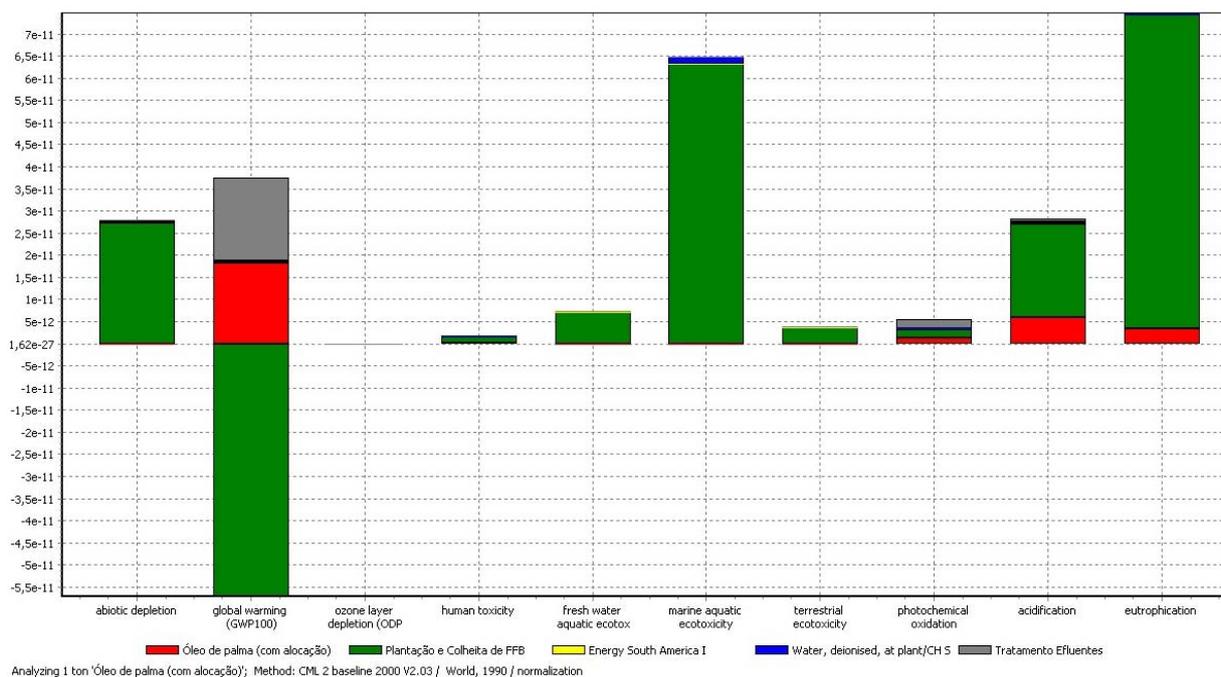


Figura 5.2 Normalização da ACV do sistema principal do óleo de palma. Método: CML 2000.

Os valores elevados de eutrofização devem-se maioritariamente às emissões de nitratos, óxidos de nitrogénio e fósforo, relativas ao uso de fertilizantes sintéticos na plantação. A ecotoxicidade marinha e a depleção abiótica apresentam valores normalizados elevados devido aos efeitos indirectos da produção de combustíveis fósseis, os quais são usados na plantação (~915 litros de diesel/ hectare.ano).

O único impacte ambiental que tem valor negativo é o aquecimento global (-851,89 kg CO₂-eq). Este valor é devido à fixação anual de 21,812 toneladas de CO₂ por hectare de palma. No Apêndice 4 pode-se ver os elementos mais importantes que “combatem” a fixação de CO₂, dos quais se destacam a emissão de metano (CH₄) no tratamento de efluentes, de CO₂ na queima de fibras e cascas na caldeira, de CO₂ fóssil relativo ao uso de combustíveis fósseis para transportes, e de Óxido Nitroso (N₂O) libertado pelo uso de fertilizantes sintéticos. Os valores relativos a estas emissões são convertidos em CO₂ equivalente. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1, onde se podem ver as diferentes contribuições por etapa, para cada um dos impactes ambientais.

Tabela 5.1 Resultados de ACV do sistema principal

Categoria de Impacte	Unidade	Total	Plantação e Colheita	Planta extractora	Tratamento Efluentes	Energy South America I	Water, deionised, at plant/CH S
abiotic depletion	kg Sb eq	4,36	4,25	0,00	0,00	0,09	0,02
global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	-851,89	-2481,01	791,10	819,83	15,33	2,86
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
human toxicity	kg 1,4-DB eq	97,88	92,04	4,25	0,51	0,04	1,04
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	14,91	14,60	0,00	0,00	0,00	0,31
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	48474,35	47128,90	0,00	0,00	0,00	1345,45
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,98	0,95	0,00	0,00	0,00	0,02
photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	0,55	0,20	0,13	0,21	0,00	0,00
acidification	kg SO ₂ eq	8,98	6,72	1,93	0,23	0,09	0,01
eutrophication	kg PO ₄ eq	9,79	9,28	0,46	0,05	0,00	0,00

No Apêndice 8 vê-se os resultados de ACV usando o método Eco-Indicador 99. Este dá grande relevância à depleção de combustíveis fósseis relativa ao uso dos mesmos para transportes na plantação, e ao impacte de “respiratory inorganics”, que tem como principais causas as emissões relativas à queima de combustíveis fósseis, e a queima de fibras e cascas na caldeira.

Comparação entre Colômbia e Malásia

Jungbluth et al. (2007) efectuaram um estudo de ciclo de vida do óleo de palma na Malásia, ao qual corresponde um processo semelhante ao estudado nesta dissertação, obtendo os resultados presentes na Tabela 5.2, que podem ser comparados com os do sistema principal da Colômbia.

Tabela 5.2 Comparação da ACV do óleo de palma na Colômbia e na Malásia. Método: CML 2000

Categoria de Impacte	Unidade	Óleo de palma (Sist. principal)	Palm oil, at oil mill/MY S
abiotic depletion	kg Sb eq	4,36	2,94
global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	-851,89	-1065,08
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,000017	0,000046
human toxicity	kg 1,4-DB eq	97,88	786,96
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	14,91	2242,12
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	48474,35	58844,10
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,98	978,80
photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	0,55	4,51
acidification	kg SO ₂ eq	8,98	7,20
eutrophication	kg PO ₄ eq	9,79	4,03

Com estes resultados verifica-se que, para os impactes considerados como mais relevantes na normalização (ver Figura 5.2), ou seja, eutrofização, eco-toxicidade marinha, depleção abiótica, aquecimento global e acidificação, apresentam na sua maioria valores semelhantes. À excepção dos valores da eutrofização, que variam cerca de 60% de um cenário para o outro, todos os outros valores sofrem variações na ordem dos 15-30%.

5.2 Cenários alternativos

Nesta secção estão presentes os resultados da imposição dos cenários alternativos no sistema principal (aproveitamento de metano, balanço de carbono relativo à transformação das terras, e uso de expansão de sistema).

O aproveitamento de 92% do metano através de biodigestores evita a emissão deste poderoso GEE. Na Tabela 5.3 verifica-se que o aproveitamento do CH₄ aumenta o valor da fixação de CO₂-eq para o dobro, ou seja, é um valor significativo e a tomar em conta.

Tabela 5.3 Implicações do aproveitamento de metano (CH₄) no aquecimento global, em função de 1 tonelada de óleo de palma

Categoria de Impacte	Unidades	Óleo de palma (Sistema principal)	Aproveitamento de CH ₄
global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	-851,89	-1605,28

O tipo de conversão de terras tem uma importância ainda mais elevada no impacto de aquecimento global que o CH₄, uma vez para diferentes tipos de conversão obtêm-se valores de CO₂-eq muito diferentes, como se pode constatar na Tabela 5.4. O único tipo de conversão de terras que apresenta um valor negativo de CO₂-eq (fixação de CO₂) é o da conversão de uma savana ou pastagem em plantação de palma, uma vez que o valor do carbono presente nos solos e na biomassa é superior para a plantação de palma, relativamente ao de uma savana.

Tabela 5.4 Alterações do aquecimento global resultantes da aplicação do ciclo de carbono na conversão das terras, em função de 1 tonelada de óleo de palma

Categoria de Impacte	Unidade	Óleo de palma (Sist. principal)	Floresta Tropical solo mineral	Floresta Tropical solo turfoso	Savana
global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	-851,89	4828,72	10680,98	-2019,95

Ao tratar-se da conversão de uma floresta tropical em plantação de palma, o cenário alterna-se completamente, uma vez que o carbono presente na floresta tropical é superior ao presente na plantação de palma, tanto para uma floresta tropical com solo mineral como, de um modo mais acentuado, para um floresta tropical com solo turfoso. Deste modo o CO₂-eq apresenta um valor positivo, ou seja, há emissão de CO₂, e aumento do impacto de aquecimento global.

Expansão de sistema

A aplicação de expansão de sistema em vez de alocação de massa (usada no sistema principal e em todos os outros cenários) altera de um modo considerável os resultados de ACV, como se pode comprovar na Figura 5.3 e Tabela 5.5.

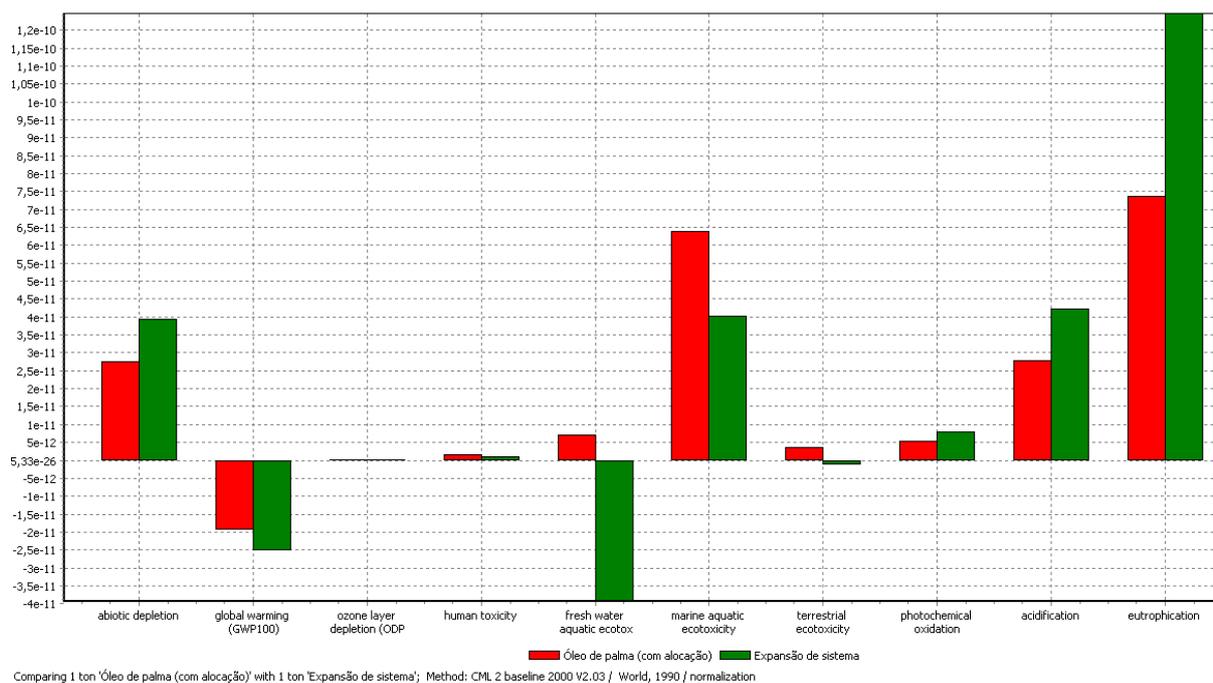


Figura 5.3 Comparação do ACV do óleo de palma com alocação (sistema principal) e com expansão de sistema. Método: CML 2000

Nos cálculos relativos à expansão de sistema, presentes na secção 4.3, verifica-se que a aplicação de sistema evita a produção de côco e soja, mas aumenta a produção de colza. Este aumento da produção de colza, juntamente com a não divisão dos impactes ambientais pelos três produtos que saem do sistema principal (alocação) explicam o aumento do valor de alguns impactes ambientais.

Tabela 5.5 Resultados de ACV do óleo de palma com alocação (sistema principal) e com expansão de sistema. Método: CML 2000

Categoria de Impacte	Unidade	Óleo de palma (com alocação)	Expansão de sistema
abiotic depletion	kg Sb eq	4,36	6,23
global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-851,89	-1107,48
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,000017	0,000028
human toxicity	kg 1,4-DB eq	97,88	67,20
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	14,91	-81,46
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	48474,35	30403,89
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,98	-0,32
photochemical oxidation	kg C2H4	0,55	0,83
acidification	kg SO2 eq	8,98	13,69
eutrophication	kg PO4--- eq	9,79	16,56

A diminuição dos valores de alguns impactes ambientais como o aquecimento global ou a ecotoxicidade aquática resultam do evitar da produção de côco e soja, e dos impactes associados aos seus ciclos de vida, que alteram neste caso positivamente o balanço global destes impactes.

5.3 Indicadores de Eficiência Energética

A Tabela 5.7 demonstra os resultados dos indicadores de eficiência energética para o modelo considerado como principal. Os dados de inventário necessários para o cálculo de indicadores de eficiência energética estão presentes na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Balanço energético de ciclo de vida

	Produto	PCI (MJ/kg)	Valor energético (MJ)	Referências
Entradas	N	78,1	2677	Pardo et al. (2006)
	Fosfato (P ₂ O ₅)	17,4	256	
	K ₂ O	13,7	838	
	MgO	7,1	87	
	Diesel	45	10083	
	Gasolina	42	314	
	E.Elect.Fóssil	-	237	
	Total energia entrada		14491	
Saídas	Óleo de Palma	39,69	39690	
	Óleo de Palmiste	38,2	4442	
	Torta de Palmiste	22,2	6195	
	Total energia saída		50327	

O resultado do balanço entre as saídas do sistema do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia apresenta um valor de 3,47. Rosélis (2006) obteve resultados, para sistemas produtivos na Colômbia e no Brasil, entre 4 e 6. Isto deve-se aos valores elevados do diesel usado na plantação (915 litros/ha.ano, que corresponde a 69,38% das entradas energéticas no sistema produtivo).

Tabela 5.7 Resultados para os indicadores de energia do ciclo de vida do óleo de palma

Indicadores de eficiência energética	Resultados
Eficácia de utilização de energia fóssil, euef	347,30%
Requisito energético, E_{req}	0,29
Eficiência global de ciclo de vida, η	77,64%
Eficiência de renovabilidade energética, ERenEf	71,21%

Os indicadores de eficiência energética foram calculados para o sistema de ciclo de vida do óleo de palma, ou seja, são contabilizadas as contribuições energéticas dos três produtos (óleo de palma, óleo de palmiste e torta de palmiste).

6 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi efectuado um estudo ambiental e energético do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia, que teve como base os dados de ICV. Na ACV foram identificados os principais impactes associados ao processo e as causas dos mesmos. Os resultados de AECV são apresentados em termos de renovabilidade e eficiência energética. Pretende-se que os resultados sirvam como ferramenta de melhoria do processo, de comparação com outros processos, e de base para estudos relacionados com o óleo de palma, como o ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma.

Com base no ICV e no método CML 2000 conclui-se que os impactes ambientais mais relevantes no ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia são: eutrofização; ecotoxicidade marinha; aquecimento global; depleção abiótica; e acidificação. Foi identificada como principal causa da “eutrofização” o uso de fertilizantes sintéticos na plantação, enquanto que os impactes “ecotoxicidade marinha” e “depleção abiótica” são provocados maioritariamente pela produção e utilização de combustíveis fósseis. O uso de fertilizantes e a queima de fibras e cascas na caldeira são muito relevantes para o aumento da “acidificação”. O impacte “aquecimento global” é calculado com base no CO₂ equivalente. O resultado para o sistema principal foi a fixação de 851,89 kg CO_{2-eq} por tonelada de óleo de palma. Este valor é o resultado do balanço de CO_{2-eq} dos três subsistemas considerados: Plantação (-2481,01 kg CO_{2-eq}; planta extractora (791,10 kg CO_{2-eq}); e tratamento de efluentes (819,83 kg CO_{2-eq}).

Foi efectuada uma análise de sensibilidade do sistema principal à implementação dos cenários alternativos. Verificou-se no tratamento de efluentes que, se houver aproveitamento do metano por intermédio de biodigestores, diminui-se as emissões de GEE's e aumenta-se a fixação global do CO_{2-eq} para 1605,28 kg. Foi também estudado, como cenário alternativo, o balanço de carbono relativo à transformação de terras em plantações de palma. Foram considerados três cenários para terras precedentes às plantações de palma: Savana; Floresta tropical com solo mineral; e Floresta tropical com solo turfoso. Os resultados do impacte “aquecimento global” seriam respectivamente: -2019 kg CO_{2-eq}, 4828,72 kg CO_{2-eq} e 10680,98 kg CO_{2-eq}.

O resultado do balanço entre as saídas e as entradas energéticas do sistema do ciclo de vida do óleo de palma na Colômbia apresenta um valor de 3,47, o qual é inferior a todos os resultados obtidos por *Rosélis (2006)*, onde este valor está entre 4 a 6. Isto deve-se aos valores elevados do diesel usado na plantação (915 litros/ha.ano, que corresponde a 69,38% das entradas energéticas no sistema produtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdull Latif Ahmad (2003), “Water recycling from palm oil mill ,effluent (POME) using membrane technology” University Sains Malaysia, Seri Ampangan, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia.
- Abdullah L.C. (March 2007), “Particulate matter dispersion and haze occurrence potential studies at a local palm oil mill”, Department of Agricultural Engineering and Biology, Faculty of Engineering, University Putra Malaysia, Serdang, 43400 Selangor D. E., Malaysia.
- Acevedo Helmer (2006), “Producción de Aceite de Palma y sus derivados”, Facultad de Ingenieria, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá D.C.
- Ahmad A.L. (2006), S. Sumathi, Hameed B.H., “Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC”, School of Chemical Engineering, Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia, 14300 Nibong Tebal, Seberang Perai Selatan, Pulau Pinang, Malaysia.
- Amberger A. (2006), International Fertilizer Industry Association, International Potash Institute - “Soil fertility and plant nutrition in the tropics and sub-tropics”.
- Avendaño Tatiana Roa (2007), “El biodiesel de la palma aceitera en Colombia”.
- Bellarby Jessica (January 2008), GREENPEACE-University of Aberdeen, “Cool farming, Climate impacts of agriculture and mitigation potencial”.
- Claver, F. (1993) Clarificación Horizontal, Conferencia apresentada no curso: “Algunos Aspectos del Procesamiento de Aceite de Palma”, Bucaramanga-Colombia.
- Conil Philippe (1996), “La utilizacion de los sistemas U.A.S.B. para el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales domesticas: un sistema innovador para reducir los costos de inversion y operacion en los países tropicales” Red Internacional BIOTEC, Colombia.
- Chun Yang Yin et al. (2008), “An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler”, Faculty of Chemical Engineering, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor, Malaysia
- Ecopetrol (2006), Fuel Oil grado N° 2D: “Especificações técnicas dos combustíveis à venda na Colômbia”. Disponível em www.icp.ecopetrol.com.co, Colômbia.
- European Commission (November 2000), “Bioenergy for Europe: which ones fits best? – A comparative analysis for the community, Final Report”.
- Expedito José de Sá Parente (2003), “Biodiesel Uma Aventura Tecnológica num país engraçado”, 27-31.
- FAO, IFA (2001), International Fertilizer Industry Association Food And Agriculture Organization of the United Nation, “Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land”, Rome.
- Fedepalma (2006), “La agroindustria de la palma de aceite en Colombia”, Oficina de Comunicaciones de Fedepalma, Bogotá D. C., Colombia.

- Ferrão Paulo (1998), “Introdução à gestão ambiental: a avaliação de ciclo de vida dos produtos”, Instituto Superior Técnico, edição: IST Press, ISBN 972-8469-05-5, Lisboa, Portugal
- Freire Fausto (2005), “A Ecologia Industrial e a Avaliação do Ciclo de Vida”, Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Pólo II, Portugal.
- Freire Fausto (2006), “Formas de Energia e Indicadores de Eficiência Energética”, acetatos das aulas de gestão energética e ambiental”, Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Pólo II, Portugal.
- Germer J. (November 2006), Sauerborn J., “Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance”, Institute of Plant Production and Agroecology in the Tropics and Subtropics, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany.
- Gauch Marcel (2007), “Life cycle assessment tools/methodologies for GHG calculations in the RSB working group”, TSL Technology and Society Lab @ EMPA, IEA Bioenergy, Dubrovnik.
- Gro Harlem Brundtland (1987), “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future”, publicado pela Oxford University Press.
- IFA (2007) - International Fertilizer Industry Association, “Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects” First edition, IFA, Paris, France.
- IPCC, (1997), “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories—Workbook (Volume 2)”. J. Houghton et al., Available at: <http://www.ipcc.ch>, Accessed on, 12.12.2000.
- IPCC (2000), “Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories”, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva.
- IPCC (2002), “Climate change and biodiversity”, Technical paper V, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva.
- IPCC (2003), “Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry”. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva
- ISO 14043 (2007)* (1998), “Environmental management. LCA. Goal and scope definition and inventory analysis”.
- H-Kittikun (2000), A., P.Prasertsan, G. Srisuwan and A. Krause, “Environmental Management for Palm Oil Mill”.
- Janulis, P. (2003), “Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle”.
- Jungbluth, N., Chudacoff, M., Dauriat, A., Dinkel, F., Doka, G., Faist Emmenegger, M., Gnansounou, E., Kljun, N., Schleiss, K., Spielmann, M., Stettler, C., Sutter, J. (2007): “Life Cycle Inventories of Bioenergy. Ecoinvent report No. 17”, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Kløverpris J. (2007), Wenzel H, Nielsen PH: “Life Cycle Inventory Modelling of Land Use Induced by Crop Consumption. Part 1: Conceptual Analysis and Methodological Proposal”. *Int J LCA* 13 (1) 13–21.

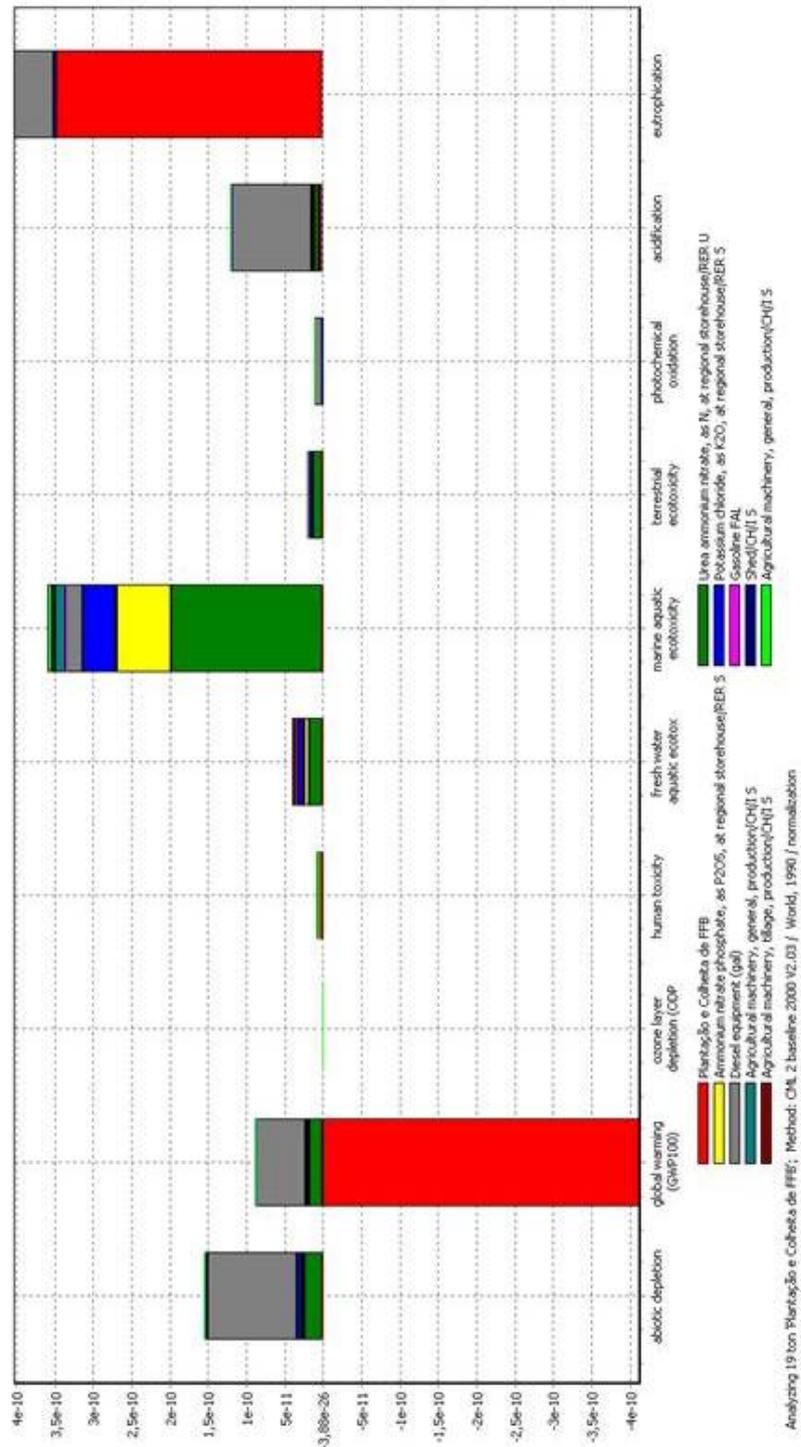
- Lasco R.D. (October 2002): “Forest carbon budgets in Southeast Asia following harvesting and land cover change”. *Science in China (Series C)*, Vol. 45 Supp.
- Malça J, Freire F. (2004), “Life cycle energy analysis for bioethanol: allocation methods and implications for energy efficiency and renewability”. In: *Energy-Efficient, Cost-Effective, and Environmentally-Sustainable Systems and Processes*. Rivero, R., Monroy, L., Pulido, R., and Tsatsaronis, G., Editors, Instituto Mexicano del Petróleo, México.
- Manuelita Aceites (2006), “Descripción general del proceso e instalaciones de Manuelita Aceites S.A.”, Disponível em www.aceitesmanuelita.com, Colômbia.
- Marques Miguel António (2006), “Avaliação ambiental de ciclo de vida comparando o éster metílico de colza com o diesel fóssil”, FCTUC.
- Michelsen O. (2007): “Assessment of Land Use Impact on Biodiversity. Proposal of a new methodology exemplified with forestry operations in Norway”. *Int J LCA* 13 (1) 22–31.
- Milà i Canals, Llorenç, “Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA”, Centre for Environmental Strategy, University of Surrey (D3), GU2 7XH Guildford (Surrey), UK, *Int J LCA* 12 (1) 5 – 15, (2007)
- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território (03-05-2000), Decreto-Lei n.º 69/2000, Capítulo I, Artigo 2.º, alíneas i) e j).
- Mohd Fadhil (2006), “Biodegradable Plastics Production from Palm Oil Mill Effluent (POME)”, Delft University of Technology, Department of Biotechnology, Environmental Biotechnology group University Technology of Malaysia, Department of Environmental Engineering.
- Pardo Richard (2006), Acevedo Helmer, Freire Fausto, “Inventario del Ciclo de Vida del Aceite de Palma de una planta en los Llanos Orientales Colombianos”, Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía y Protección del Medio Ambiente Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Dpto. Ing. Mecánica.
- Plan Energético Nacional 2006-2025, “Contexto y Estrategias. Unidad de Planeación Minero Energética” – UPME, Colombia.
- Reid J. Lifset (2006), “Industrial Ecology and Life Cycle Assessment, School of Forestry & Environmental Studies”, Yale University, 205 Prospect Street, New Haven, CT 06511-2189, USA.
- Reijnders, L. (2006), “Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases”, ECDO, University of Amsterdam, Nieuwe Achtergracht 166, NL-1018 WV Amsterdam, The Netherlands.
- Reinhardt Guido (2007), Nils Rettenmaier, Nils Rettenmaier, Sven Gärtner, ifeu_institut für Energie-und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Chapter 2 and 4), Andreas Pastowski, Wuppertal Institut für klima, Umwelt, Energie GmbH (Chapter 3): “Rain Forest for Biodiesel?, Ecological effects of using palm oil as a source of energy”, Germany.

- Rohaya M H; Nasrin (2005), A B; Choo, Y M; Ma, A N and N Ravi, "A commercial scale implementation of rolek™ palm nut cracker techno economic production of shell-free kernel".
- Rosélis Ester da Costa (2006), ELECTRO Eduardo Silva Lora, "The Energy Balance in the production of Palm Oil Biodiesel - Two case studies: Brazil and Colombia".
- San Jose J.J., Bracho R. and Nikonova N. (1998), "Comparison of water transfer as a component of the energy balance in a cultivated grass (*Brachiaria decumbens* stapf.) field and a savanna during the wet season of the Orinoco Llanos", *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 65-79.
- Santos Ana Claudina, (Setembro de 2005), "Bioetanol: alternativa aos combustíveis fósseis nos transportes?"; FCTUC, Coimbra, Portugal.
- Schmidt Jannick, (June 2007), "Life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil", Ph.D. thesis, Part 3, Department of Development and Planning Aalborg University, Denmark.
- Schmidt Jannick (November, 2004), "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.
- Schuchardt Frank¹ (2002), D. Darnoko², Purboyo Guritno², "Composting of empty oil palm fruit bunch (EFB) with simultaneous evaporation oil waste water (POME)", 1-Federal Agricultural Research Centre (FAL) Institute of Technology and Biosystems Engineering, Braunschweig, Germany, 2- Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI) Medan, Indonesia,
- Sheehan J. (1998), Camobreco V., Duffield J., Grabiski M., Shapouri H., "Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus", U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development – U.S. Department of Agriculture's Office of Energy.
- Subhash Bhatia (2006), "Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant" School of Chemical Engineering, Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia, Seri Ampangan, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia.
- Sumathi S, et al. (2007), "Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia". *Renew Sustain Energy Rev* doi:10.1016/j.rser.2007.06.006
- Syahrinudin (2005). The potential of oil palm and forest plantations for carbon sequestration on degraded land in Indonesia. P. L. G. Vlek, M. Denich, C. Martius, C. Rodgers and N. V. D. Giesen, *Ecology and Development Series*, 28. Cuvillier Verlag, Göttingen, Germany.
- Tailliez B. (2005), "Scientific Research for Sustainable Palm Oil Production", CIRAD, France.
- Teoh Cheng Hai (2002), *The palm oil industry in Malaysia*.
- Wambeck, N (2005), "Sinopsis del Proceso de la Palma de Aceite", 1ª ed. en español, LEGIS, Library CENIPALMA, Bogotá.

- Wanna Choorit (2007), "Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent", Biotechnology Program School of Agricultural Technology Walailak University Tasala, Nakhonsithammarat 80160 Thailand.
- Weeraratne J. (2006),, Surif S., Sumiani Y. "APPLICATION OF INDUSTRIAL ECOLOGY SYSTEM BY APPLYING LIFE CYCLE ANALYSIS: A CASE STUDY IN A PALM OIL MILL", School of Environmental and Natural Resource Sciences, University Kebangsaan Malaysia, 43600,UKM, Bangi,Selangor, Malaysia.
- Wood B. J (1991), Corley R.H, "The Energy Balance of Oil Palm Cultivation" (Referencia de artículo publicado en Memorias del PORIM: Palm Oil Resarch Institute of Malaysia), Proceedings Porim Internacional Palm Oil Conference. Vol. 1, pag 130-142..
- Wu, T.Y. (2007), "Palm oil mill effluent (POME) treatment and bioresources recovery using ultrafiltration membrane: Effect of pressure on membrane fouling", Department of Chemical and Process Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Malaysia.
- WWF, (February 2008), "Deforestation, Forest degradation, Biodiversity loss and CO2 emissions in Riau", Sumatra, Indonesia.
- Yeoh B.G. (January 2004), "A Technical and Economic Analysis of Heat andPower Generation from Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent", SIRIM Environment and Bioprocess Technology Centre, Malaysia.
- Yusof B and Weng C K (2004), The Oil Palm and its Sustainability. Journal of Palm Oil Research, Vol. 16, No. 1, June 2004, p 1-10. Malay-sian Palm Oil Board, Kajang, Malaysia
- Yusoff S (2006), Renewable energy from palm oil – innovation on effective utilization of waste. Journal of Cleaner Production 14 (2006), pp. 87-93. Elsevier
- Yusoff S and S B Hansen (2007), "Feasibility Study of Performing an Life Cycle Assessment on Crude Palm Oil Production in Malaysia". International Journal of Life Cycle Assessment 12 (1) 50-58 (2007), Ecomed Publishers, Landsberg

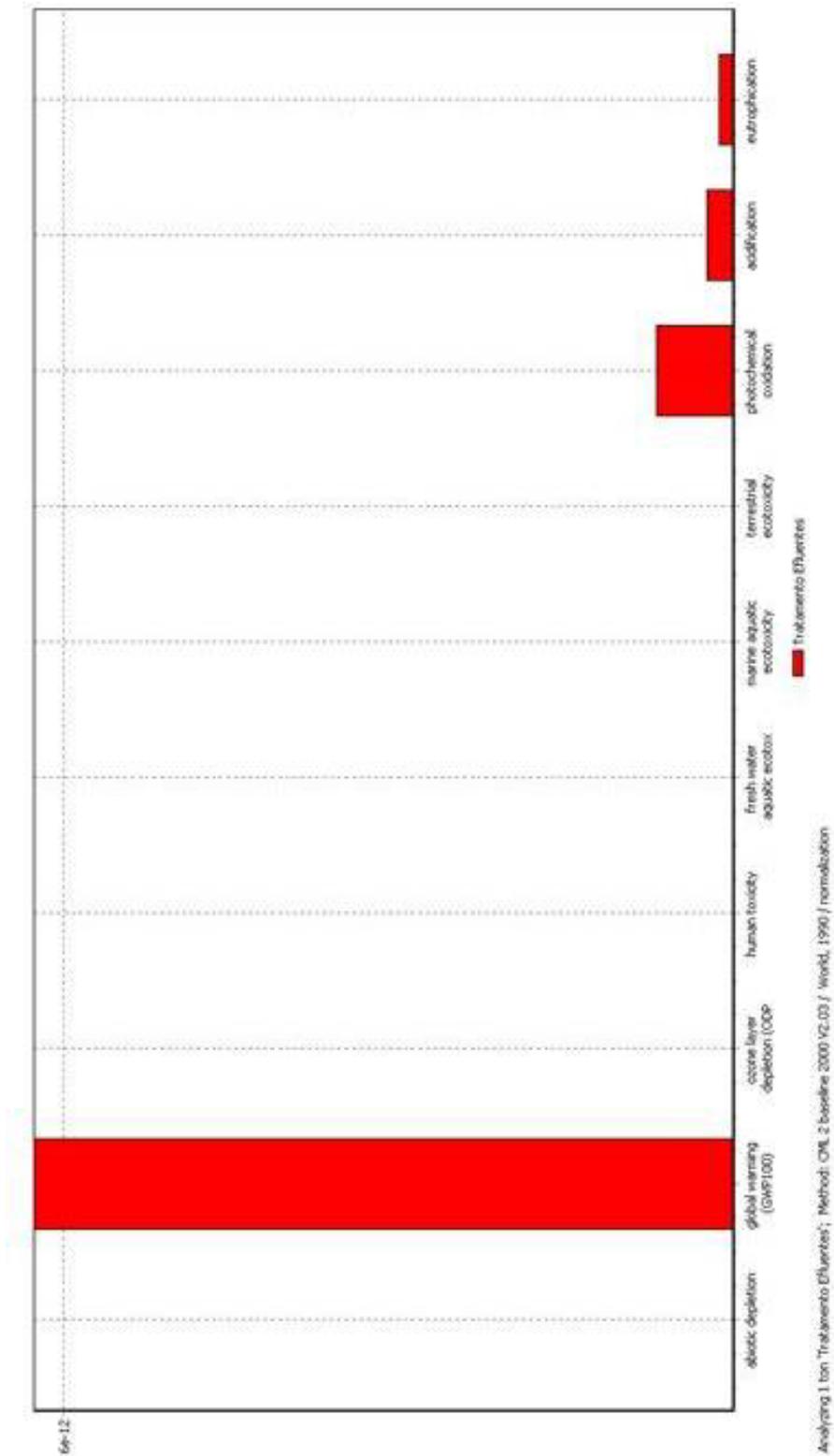
Apêndice 1 Plantação e colheita

Figura A.1 Resultados normalização: CML 2000. Unidade funcional: 19 toneladas de RFF



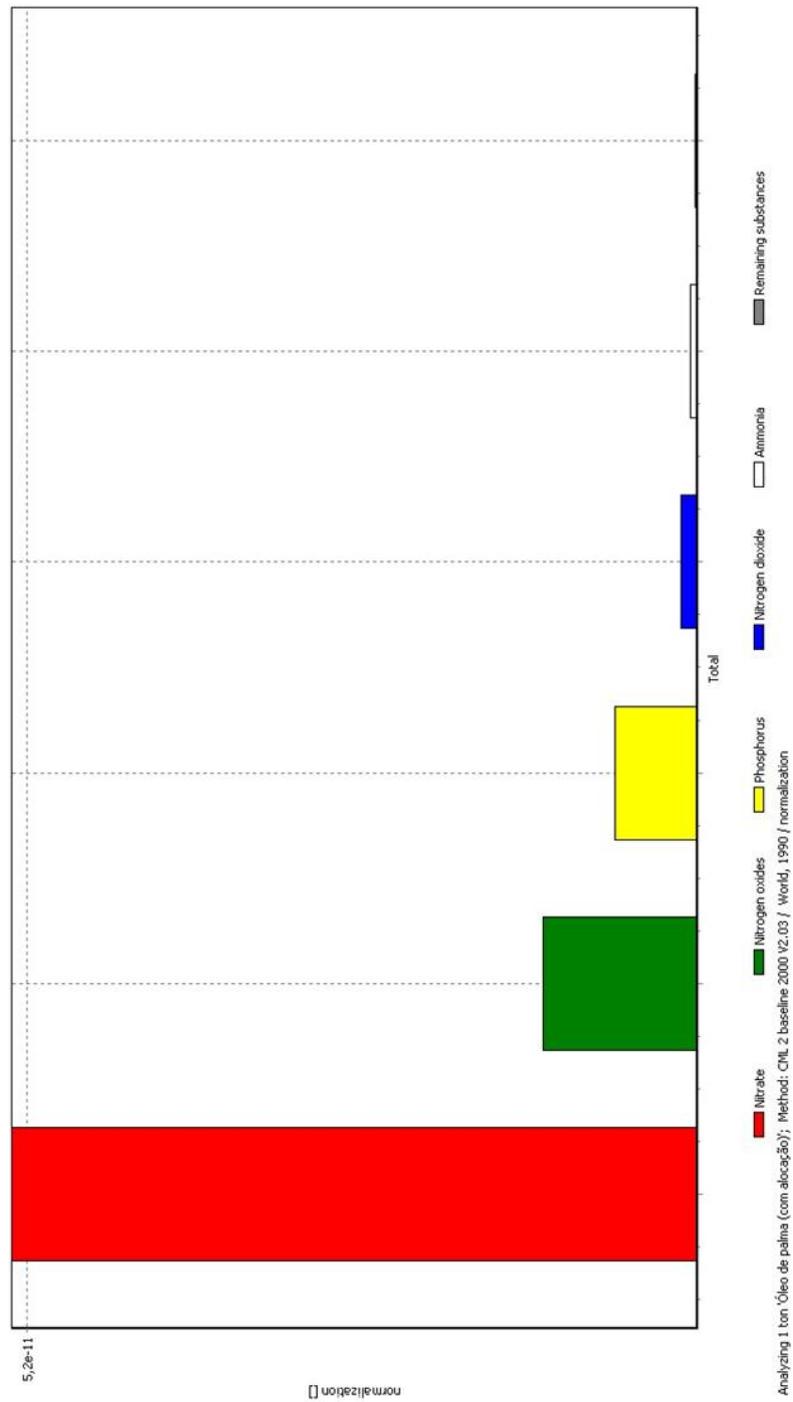
Apêndice 2 Tratamento de Efluentes

Figura A.2 Resultados normalização: CML 2000. Unidade funcional: 1 tonelada de efluentes



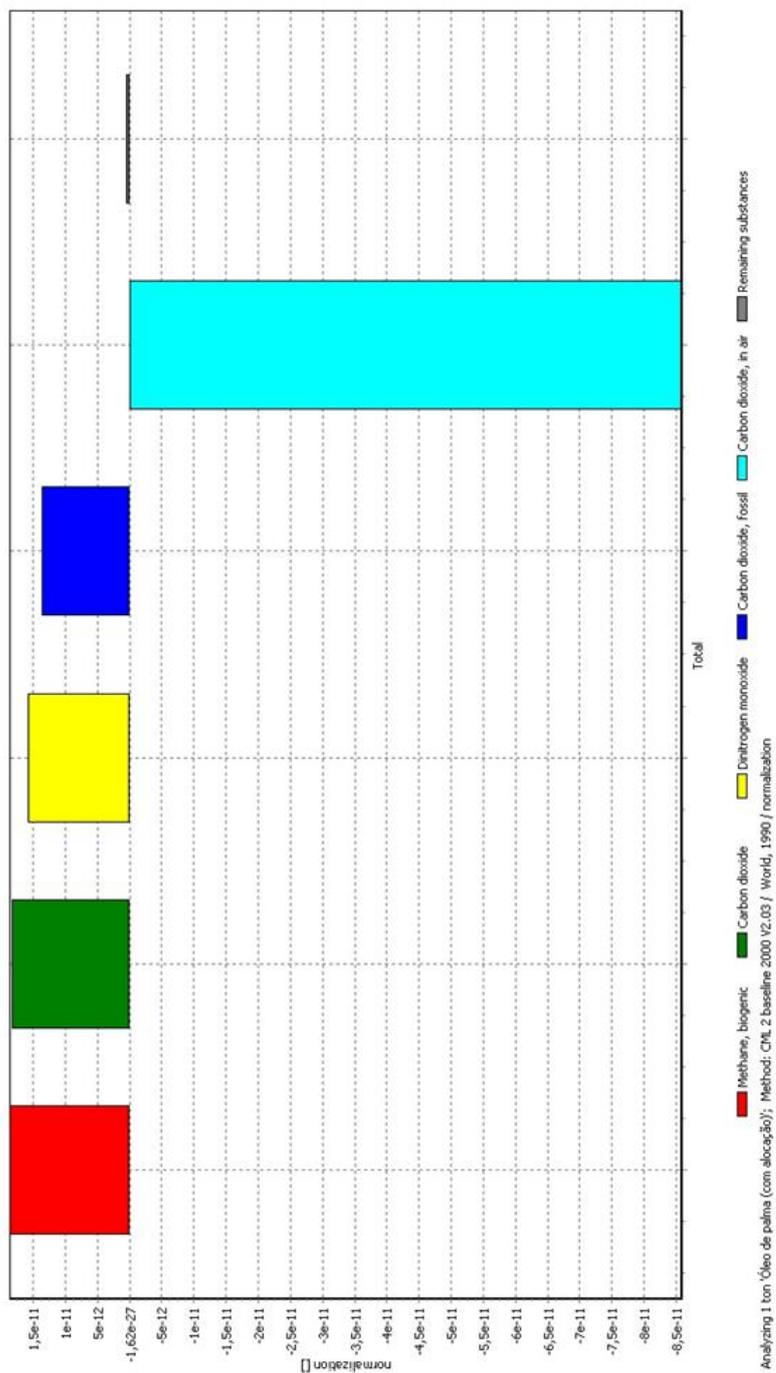
Apêndice 3 Eutrofização

Figura A.3 Resultados eutrofização para o sistema principal: CML 2000. Unidade funcional: 1 tonelada óleo de palma



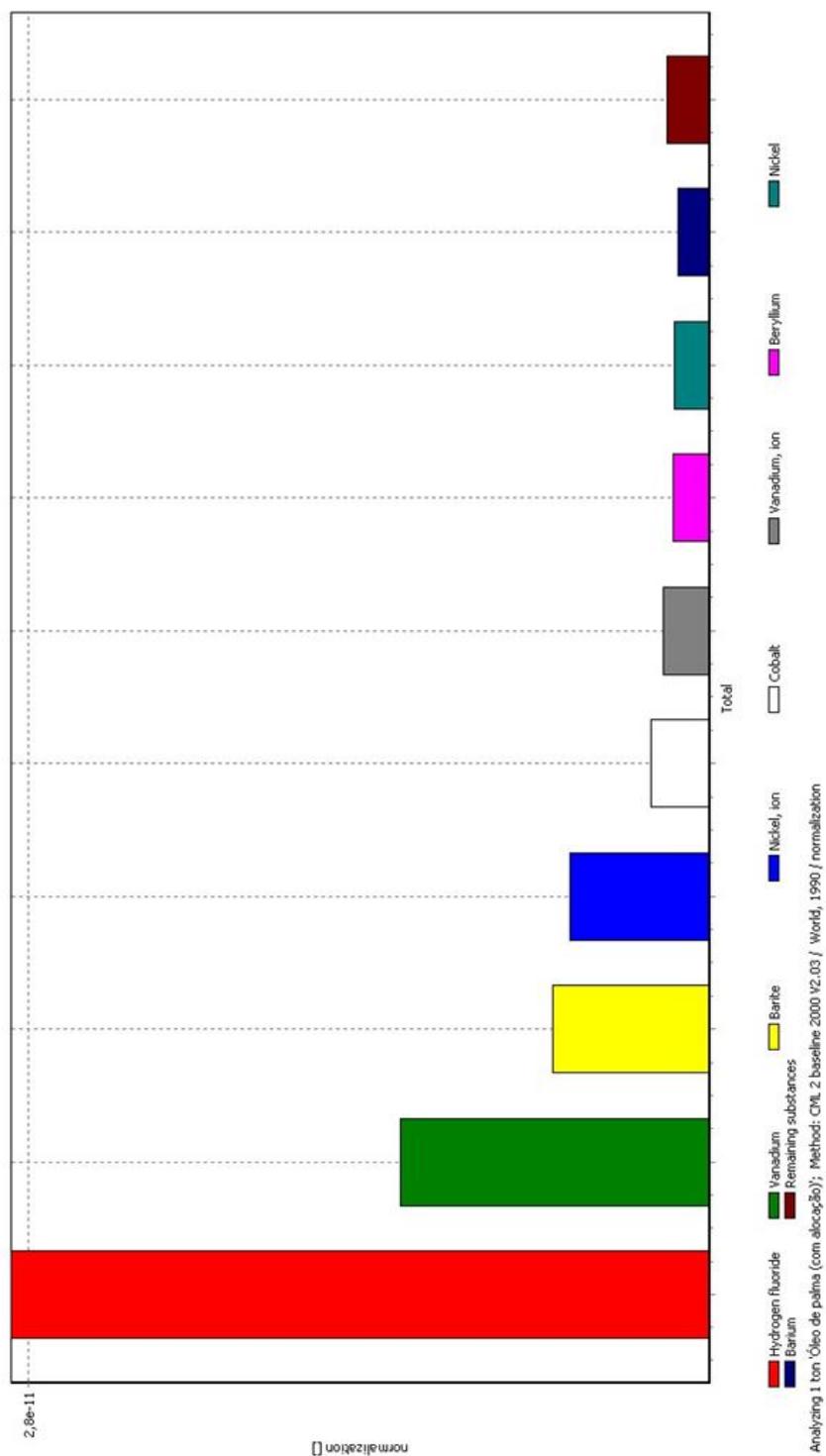
Apêndice 4 Aquecimento Global

Figura A.4 Resultados aquecimento global para o sistema principal: CML 2000. Unidade funcional: 1 tonelada óleo de palma



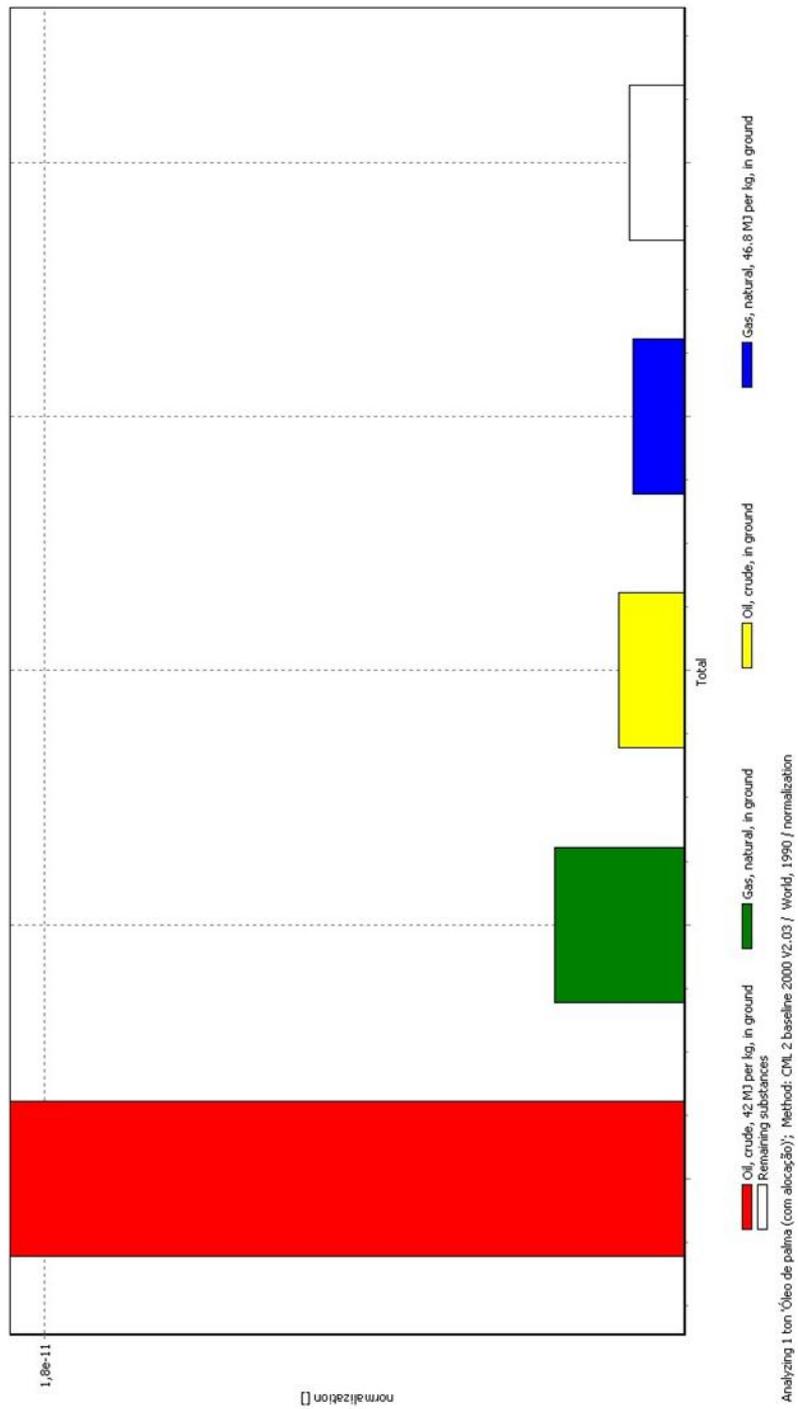
Apêndice 5 Ecotoxicidade de Recursos Marinhos

Figura A.5 Resultados ecotoxicidade de recursos marinhos para o sistema principal: CML 2000. Unidade funcional: 1 tonelada óleo de palma



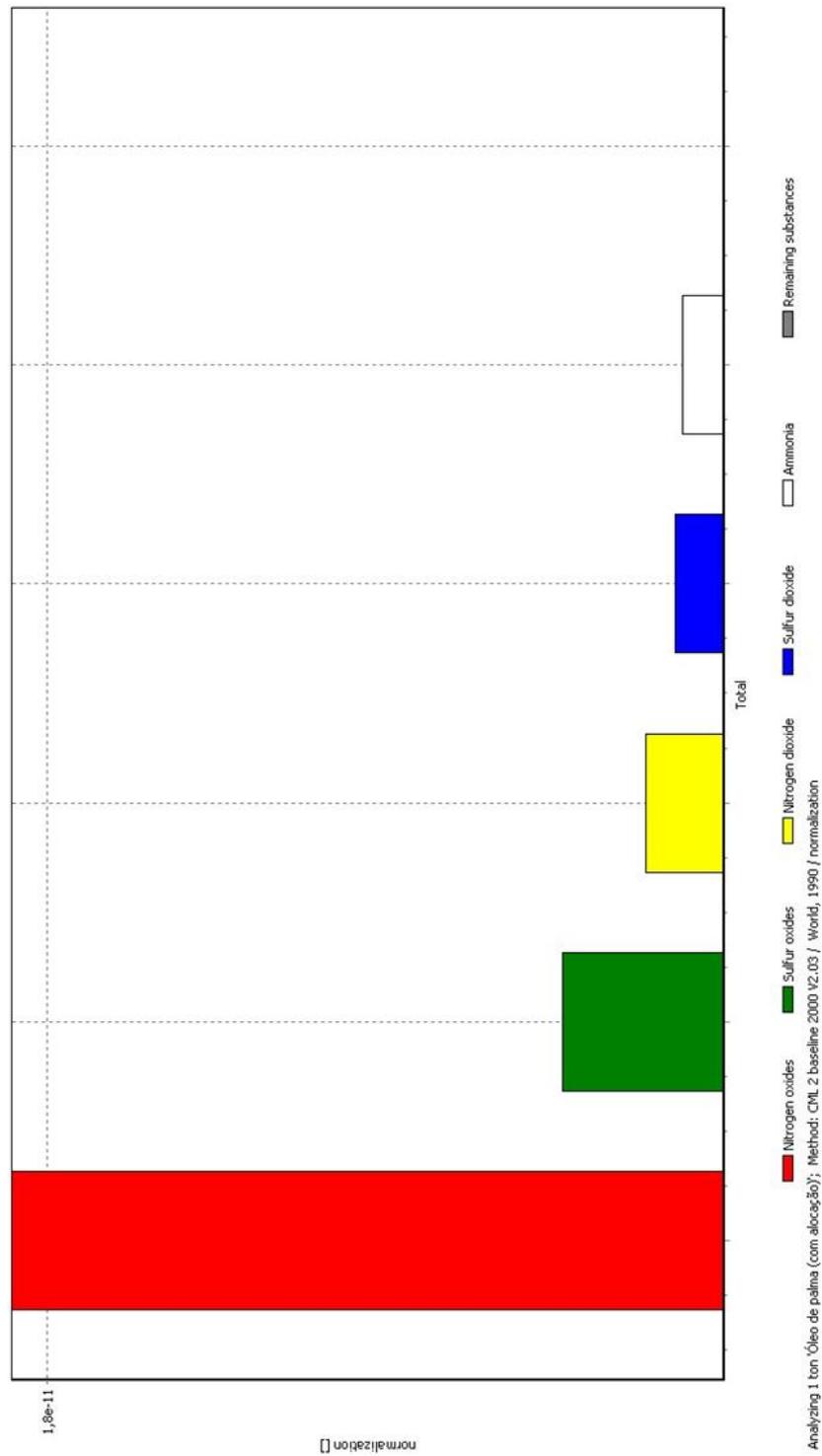
Apêndice 6 Depleção Abiótica

Figura A.6 Resultados depleção abiótica para o sistema principal: CML 2000. Unidade funcional: 1 tonelada óleo de palma



Apêndice 7 Acidificação

Figura A.7 Resultados acidificação para o sistema principal: CML 2000. Unidade funcional: 1 tonelada óleo de palma



Apêndice 8 Sistema principal normalizado. Método: Eco-Indicador 99

Figura A.8 Sistema principal: Eco-Indicador 99. Unidade funcional: 1 tonelada óleo de palma

