

**GABRIELA SILVA FERREIRA  
RAFAEL DO NASCIMENTO CARVAS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CICLO DE VIDA DO BODIESEL  
OBTIDO A PARTIR DO ÓLEO DE DENDÊ E ETANOL VERSUS  
DIESEL DE PETRÓLEO**

**SÃO PAULO  
2014**

**GABRIELA SILVA FERREIRA  
RAFAEL DO NASCIMENTO CARVAS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CICLO DE VIDA DO BIODIESEL  
OBTIDO A PARTIR DO ÓLEO DE DENDÊ E ETANOL VERSUS  
DIESEL DE PETRÓLEO**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Química da Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção de bacharelado  
em Engenharia Química.**

**Área de concentração:  
Engenharia Química**

**Orientador:  
Professor Dr. Gil Anderi da Silva**

**SÃO PAULO  
2014**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer em especial ao nosso professor orientador, professor Dr. Gil Anderi da Silva, por nos aceitar como alunos orientados, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos e por nos disponibilizar os materiais necessários para que esse trabalho de conclusão fosse possível.

Agradecemos também a todos os pesquisadores do grupo de Prevenção a Poluição do departamento de Engenharia Química por sempre nos receberem muito bem.

Gostaríamos de agradecer também a Engenheira química Patrícia Steudner pelas dicas e incentivos na área de análise de ciclo de vida.

Agradecemos aos nossos pais, Rosana, Regina, Rubens e Basílio pela base educacional que nos permitiu ingressar na universidade que hoje estamos concluindo.

Agradecemos um ao outro pela excelente parceria, pelos esforços e sacrifícios realizados que nos permitiram produzir um ótimo trabalho, trabalhamos muito bem em dupla.

Por fim, mas não menos importante, agradecemos aos nossos irmãos, Priscila e Rafael, e amigos pelo carinho e apoio durante todos esses anos.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo comparar ambientalmente a produção do Petrodiesel (diesel obtido a partir das frações de petróleo) com a produção do Biodiesel do dendê via rota etílica (transesterificação do óleo de dendê com etanol). Para isso foi utilizada a técnica de análise de ciclo de vida (ACV).

Para a definição do sistema foi adotada a abordagem “*Cradle to gate*”, assim foram consideradas as etapas de extração e transformação de recursos, não sendo consideradas as etapas de distribuição, uso e disposição final.

A etapa de análise de inventário foi toda retirada de referências bibliográficas, ou seja, apenas foram utilizados o que são chamados de dados secundários.

Para a avaliação de impacto foi utilizada a plataforma computacional SimaPro 7.3.3 e o método escolhido foi o ReCiPe midpoint, que possibilita a avaliação em todas suas etapas obrigatórias, além de todas as etapas opcionais. Comparativamente com o método ReCiPe endpoint, o método escolhido tem um menor desvio da realidade e disponibiliza mais categorias de impacto para uma análise individual mais detalhada.

Os resultados obtidos mostraram o biodiesel mais impactante na grande maioria das categorias analisadas e também no indicador global obtido a partir do método escolhido.

Estudos futuros devem ser realizados aumentando os limites do sistema a fim de englobar mais unidades de processo importantes, como uso e disposição final.

O petrodiesel é uma alternativa temporária, pois as reservas naturais de sua matéria-prima (o petróleo) estão se esgotando. Diante desse cenário é imprescindível avaliar novas alternativas, como o biodiesel, verificar onde esse processo impacta ambientalmente e trabalhar em sua otimização.

## ABSTRACT

This study aims to compare environmentally the Petrodiesel (obtained from crude oil fractions) and Biodiesel (from Palm oil and ethanol transesterification) productions. This study uses the life cycle assessment (LCA) technique.

The system was defined using the “Cradle to gate” approach. In other words, only the resources extraction and transformations stages were considered. Product distribution, use and final disposition weren’t considered.

In the Inventory analysis phase all data were obtained from the literature, what means that they weren’t obtained direct from an industry.

The software SimaPro 7.3.3 was used in the impact assessment and the ReCiPe midpoint method was selected for the analyses, since it has all the mandatory stages and the optional stages. Comparing with the ReCiPe endpoint method, the chosen method has the slightest deviation from reality and has more impact categories for a more detailed analysis.

The results showed that biodiesel has a worse environmental performance in almost all analyzed categories and even in the global indicator obtained with the chosen method.

Future studies should enlarge the system boundary also including important process units such as use and final disposition.

The petrodiesel is a temporary alternative, because its raw material (oil) natural reserves are exhausting. Given this scenario, it is indispensable that we evaluate new alternatives, such as biodiesel and verify where it environmentally mostly impact and optimize its production process.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Cubatão da década de 70. <sup>(2)</sup> .....	12
Figura 2. Ciclo de vida de um produto. <sup>(5)</sup> .....	16
Figura 3. Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida. <sup>(6)</sup> .....	16
Figura 4. Esquema representativo da iteratividade da definição do escopo. ....	17
Figura 5. Fronteiras do sistema de ACV. <sup>(7)</sup> .....	18
Figura 6. Avaliação de impacto ambiental. <sup>(4)</sup> .....	21
Figura 7. Principais frações do petróleo <sup>(9)</sup> .....	22
Figura 8. Reação do óleo de soja com etanol produzindo biodiesel .....	23
Figura 9. O fruto do dendê e os óleos de palma e palmiste. <sup>(3)</sup> .....	24
Figura 10. Características de óleos com potencial na produção de biodiesel. <sup>(15)</sup> ....	24
Figura 11. Extração do petróleo em plataforma marítima. <sup>(20)</sup> .....	27
Figura 12. Limites do sistema de petrodiesel para análise do ciclo de vida. ....	28
Figura 13. Limites do sistema do biodiesel.....	30
Figura 14. Cacho de dendê na árvore. <sup>(21)</sup> .....	30
Figura 15. Limites do subsistema do óleo de dendê. ....	31
Figura 16. Fluxograma referente a obtenção de energia elétrica. ....	32
Figura 17. Catálise heterogênea do ozônio de altas altitudes. <sup>(30)</sup> .....	55
Figura 18. Tendência das emissões de gases que provocam a depleção da camada de ozônio. <sup>(30)</sup> .....	55
Figura 19. Obra de Aleijadinho danificada por conta da chuva ácida. <sup>(31)</sup> .....	56
Figura 20. Maré vermelha, um exemplo de eutrofização. <sup>(32)</sup> .....	57
Figura 21. Possibilidades de uso de combustíveis fósseis a partir do preço mundial do barril. <sup>(30)</sup> .....	60
Figura 22. Gráfico comparativo da categoria de impacto "mudanças climáticas" .....	64
Figura 23. Gráfico comparativo da categoria de impacto "depleção da camada de ozônio" .....	65
Figura 24. Gráfico comparativo da categoria de impacto "Acidificação" .....	66
Figura 25. Gráfico comparativo da categoria de impacto "eutrofização" .....	67
Figura 26. Gráfico comparativo da categoria de impacto "Toxicidade" .....	68
Figura 27. Gráfico comparativo da categoria "Dano por ozônio e dano por particulado" .....	69

Figura 28. Gráfico comparativo da categoria "Transformação do solo" .....	70
Figura 29. Gráfico comparativo da categoria "Depleção da água" .....	71
Figura 30. Gráfico comparativo da categoria "Depleção de recursos minerais" .....	72
Figura 31. Gráfico comparativo da categoria "Depleção de combustíveis fósseis ....	73
Figura 32. Gráfico com os resultados ponderados. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo do escopo .....	27
Tabela 2. Inventário extração de 5760,96kg de petróleo.....	33
Tabela 3. Inventário transporte de 627,07kg de petróleo importado.....	34
Tabela 4. Inventário do refino de 5282,80kg de petróleo.....	35
Tabela 5. Inventário geração de 5921MJ de energia.....	36
Tabela 6. Produção de derivados de petróleo no Brasil em 2012 <sup>(19)</sup> .....	37
Tabela 7. Inventário da etapa agrícola de 12807,71kg de cachos de fruto.....	38
Tabela 8. Inventário para o transporte de 12807,71kg de cachos de fruto.....	39
Tabela 9. Inventário geração de energia térmica a partir da queima de petrodiesel, cascas e fibras para a produção de 2561,54kg de óleo de dendê.....	40
Tabela 10. Inventário extração de 2561,54kg de óleo de dendê.....	41
Tabela 11. Balanço de CO <sub>2</sub> no subsistema do óleo de dendê.....	42
Tabela 12. Alocação de produtos na produção de óleo de dendê.....	43
Tabela 13. Inventário produção de 1280,77kg de etanol anidro.....	44
Tabela 14. Inventário produção de 25,62kg de soda cáustica.....	47
Tabela 15. Inventário transporte (rodoviário + fluvial) de 2561,54kg de óleo de dendê.....	49
Tabela 16. Inventário transporte de 1280,77kg de etanol.....	49
Tabela 17. Inventário transporte de 25,62kg de soda cáustica.....	50
Tabela 18. Categorias de impacto, suas unidades e fatores de caracterização .....	53
Tabela 19. Impactos por categoria para 2331L de petrodiesel.....	60
Tabela 20. Resultados por categoria para cada unidade de processo do sistema petrodiesel.....	61
Tabela 21. Impactos por categoria para 2564,1L de biodiesel.....	62
Tabela 22. Resultados por categoria para cada unidade de processo de produção das matérias primas do biodiesel.....	62
Tabela 23. Resultados por categoria para cada unidade de processo do sistema biodiesel.....	63
Tabela 24. Fatores de normalização para cada categoria de impacto <sup>(30)</sup> .....	73
Tabela 25. Pesos para cada categoria de impacto.....	74
Tabela 26. Resultados normalizados e ponderados.....	75



## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS.....	8
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 Análise de Ciclo de Vida (ACV).....	15
2.1.1 História.....	15
2.1.2 Conceitos gerais e metodologia .....	15
2.1.2.1 Definição de objetivo e escopo .....	16
2.1.2.1.1 Unidade de processo.....	17
2.1.2.1.2 Função, unidade funcional e fluxo de referência.....	18
2.1.2.2 Análise de inventário.....	19
2.1.2.3 Avaliação de impacto.....	19
2.1.2.4 Interpretação .....	21
2.2 Petrodiesel.....	21
2.3 Biodiesel .....	23
2.3.1 Óleo de Dendê.....	23
2.3.2 Etanol .....	25
3. DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO .....	26
3.1 Definição de objetivo.....	26
3.2 Definição do escopo.....	26
3.2.1 Unidades de processo .....	27
3.2.1.1 Petrodiesel.....	27

3.2.1.2 Biodiesel .....	28
4. ANÁLISE DE INVENTÁRIO .....	33
4.1 Petrodiesel .....	33
4.1.1 Extração do petróleo .....	33
4.1.2 Transporte do petróleo importado .....	34
4.1.3 Refino do petróleo.....	35
4.1.4 Geração de energia elétrica .....	36
4.1.5 Alocação .....	37
4.2 Biodiesel .....	37
4.2.1 Óleo de dendê .....	38
4.2.1.1 Etapa Agrícola .....	38
4.2.1.2 Transporte de cachos .....	39
4.2.1.3 Geração de energia elétrica.....	40
4.2.1.4 Extração do óleo de dendê .....	41
4.2.1.5 Balanço de CO <sub>2</sub> .....	42
4.2.1.6 Alocação.....	42
4.2.2 Etanol .....	43
4.2.3 Soda cáustica .....	46
4.2.4 Transporte das matérias primas.....	48
4.2.4.1 Transporte óleo de dendê .....	48
4.2.4.2 Transporte etanol.....	49
4.2.4.3 Transporte soda.....	50
4.2.5 Produção do biodiesel.....	50
4.2.6 Alocação .....	52
5. AVALIAÇÃO DE IMPACTO .....	53
5.1 Método.....	53
5.2 Resultados .....	60

5.2.1	Petrodiesel .....	60
5.2.2	Biodiesel .....	61
6.	INTERPRETAÇÃO .....	64
6.1	Comparação .....	64
6.1.1	Mudanças climáticas .....	64
6.1.2	Depleção da Camada de Ozônio .....	65
6.1.3	Acidificação .....	65
6.1.4	Eutrofização .....	66
6.1.5	Toxicidade .....	68
6.1.6	Dano à saúde humana por particulados e ozônio .....	69
6.1.7	Radiação ionizante .....	70
6.1.8	Impactos no uso e do solo .....	70
6.1.9	Depleção da água .....	71
6.1.10	Depleção de recursos minerais .....	71
6.1.11	Depleção de combustíveis fósseis .....	72
6.2	Normalização e ponderação .....	73
7.	Conclusão .....	77
8.	REFERÊNCIAS .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial, ocorrida no final do século XVIII, foi observado um aumento significativo da produção mundial. Diante disso, foi necessário utilizar uma fonte de energia compatível com essa crescente demanda. A primeira fonte de energia largamente utilizada foi o carvão mineral. Esta fonte foi em muitas finalidades substituída pelo petróleo. A descoberta do petróleo e seus usos data do século XIX e a princípio achava-se que esta era uma fonte praticamente inesgotável. Esse pensamento levou a um uso indevido do recurso natural, prejudicando o próprio alicerce que este provinha ao homem.

Até a década de 1970, o progresso econômico e de produção era totalmente desvinculado da preocupação com o meio ambiente, considerava-se que os recursos naturais eram inesgotáveis, praticamente inexistiam estudos na área de disponibilidade temporal de recursos naturais. Além disso, existiam graves problemas de poluição que ameaçavam de forma geral a vida do homem na Terra.

<sup>(1)</sup> Um exemplo nacional desse tipo irresponsável de desenvolvimento é a cidade de Cubatão. Devido a sua localização favorável, próxima do porto de Santos, a cidade sofreu uma intensa industrialização que culminou com seu título de cidade mais poluída do mundo na década de 1980. A figura a seguir exemplifica bem esse modelo que não tinha nenhuma preocupação com os poluentes lançados na atmosfera.



Figura 1. Cubatão da década de 70. <sup>(2)</sup>

Nos últimos 30 anos observou-se uma mudança deste paradigma. Metas e normas de controle foram estabelecidas visando diminuir o nível de poluentes, o que causou uma necessidade maior de controle dos mesmos. Além disso, iniciou-se uma

fiscalização mais intensa pelos órgãos competentes. Quanto ao pensamento empresarial, observou-se uma maior participação das questões ambientais nas tomadas de decisão e o desenvolvimento de conceitos como produção mais limpa e desenvolvimento sustentável. <sup>(1)</sup> A cidade de Cubatão sofreu essas mudanças e hoje é modelo de gestão ambiental, tendo diminuído em 98% o nível de poluentes no ar. <sup>(2)</sup>

A civilização passou, portanto, a dar uma maior atenção à natureza, realizando conferências de caráter regional e mundial, criando instituições para cuidar do meio ambiente, desenvolvendo processos e novos produtos, além de ferramentas de gestão ambiental. <sup>(3)</sup>

O efeito estufa discutido de forma mais intensiva nos anos 2003 e 2004 foi diretamente relacionado com a queima de combustíveis fósseis que ocasionam um aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera. Esse fenômeno pode gerar mudanças climáticas, principalmente nas regiões polares, o que também acelera e intensifica o derretimento das geleiras, causando um aumento do nível dos oceanos e a perda de território em todo o globo. Diante de tamanhos problemas viu-se necessária a mudança da matriz energética, ou seja, a substituição, mesmo que em parte, do petróleo e seus derivados.

O Brasil é pioneiro nessa tecnologia, incluindo etanol e biodiesel na categoria de substitutos de frações do petróleo. O biodiesel pode ser originado de diversas fontes, entre elas girassol, soja, milho, mamona e dendê. A grande vantagem do biodiesel frente o petrodiesel diz respeito às emissões de gás carbônico. Analisando o ciclo de vida completo do biodiesel nota-se que uma parcela do gás carbônico lançado na atmosfera pelos automóveis que o usam como fonte combustível é certamente reaproveitada pela planta que produz o glicerídeo que formará o diesel. Além disso, o biodiesel tem emissão zero de óxidos de enxofre, possíveis formadores de chuva ácida e smog.

A reação de formação do biodiesel pode ser resumida em: um triglicerídeo, provindo de uma das fontes vegetais mencionadas no parágrafo anterior reage com três alcoóis (metanol ou etanol), para produzir glicerol, um triálcool e o biodiesel em si, o éster. Esta reação levanta alguns problemas estratégicos para a produção do biodiesel em larga escala:

Necessidade de grande espaço plantado, o que pode elevar o preço dos alimentos e desmatar áreas de preservação, especialmente em zonas tropicais de alta biodiversidade onde o clima é propício para o cultivo das plantas para produção dos triglicerídeos.

Existe um subproduto. O glicerol tem um excedente volumétrico muito grande já em termos atuais. É um composto versátil e que pode ser utilizado em diversas finalidades, mas o crescimento do uso de biodiesel não parece estar em alinhamento com o desenvolvimento e uso do glicerol.

Nota-se que o biodiesel no Brasil torna-se interessante economicamente por três motivos principais:

O Brasil é um país de extensão continental e clima favorável podendo conter grandes áreas cultiváveis.

Grande produção de um álcool em território nacional, o etanol.

Falta de frações mais leves no petróleo brasileiro extraído na Bacia de Campos, atualmente a maior produtora nacional. Isso significa que o petróleo brasileiro é pobre em frações como gasolina e diesel e, portanto tem que importar uma parcela para suprir o consumo interno. A perspectiva é que o pré-sal contenha também boas parcelas de frações leves de petróleo, mas sua produção em larga escala deve demorar e a preocupação ambiental é cada vez maior, viabilizando a continuação do projeto do biodiesel.

Analisando esse cenário, fica claro que o interesse na produção de biodiesel no Brasil é grande. São necessários diversos estudos para comprovar sua eficácia, incluindo seu desempenho ambiental. Motivado por esse contexto, esse trabalho propõe comparar o desempenho ambiental da produção de biodiesel utilizando óleo de dendê e etanol como matérias-primas com a da produção do diesel obtido a partir de uma das frações do petróleo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Análise de Ciclo de Vida (ACV)

#### 2.1.1 História

Foi durante a primeira crise do petróleo que apareceram os primeiros estudos envolvendo o que chamamos hoje de Análise de ciclo de vida. A crise despertou o mundo para a necessidade de utilizar melhor os recursos naturais, os estudos buscavam avaliar os processos produtivos e racionalizar o consumo de fontes energéticas esgotáveis.

O primeiro estudo é do ano de 1965, foi desenvolvido pelo *Midwest Reseach Institute* (MRI) para a Coca-Cola. O objetivo era comparar diferentes tipos de embalagem, determinando os índices de emissão para o meio ambiente e o desempenho com relação à preservação de recursos naturais.

Em 1991 foi desenvolvido o primeiro software para ACV, o *Ökibase I*, baseado em um estudo com um sistema de ponderação que resultou em um banco de dados referencial. <sup>(4)</sup>

Na década de 80, várias empresas passaram a utilizar os estudos de ACV como estratégia de marketing, realizando estudos tendenciosos que geravam resultados que lhe interessavam. Para acabar com esse problema, em 1998, foram elaboradas normas internacionais (da série ISO14040) a fim de padronizar os termos e os critérios utilizados em ACV.

#### 2.1.2 Conceitos gerais e metodologia

Todo produto, independente do tipo de material que ele seja feito, provoca um impacto no meio ambiente, através do processo produtivo, das matérias primas utilizadas, durante o uso ou disposição final. A Análise de Ciclo de Vida é uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e impactos associados a um produto, compreendendo o “ciclo inteiro” do produto, etapas que vão desde a retirada das matérias primas da natureza até a sua disposição final, como ilustrado na figura abaixo.



Figura 2. Ciclo de vida de um produto. <sup>(5)</sup>

Segundo a ISO 14040, um estudo de ACV apresenta quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impacto e Interpretação dos resultados. A figura abaixo apresenta um esquema da metodologia de um estudo de ACV.

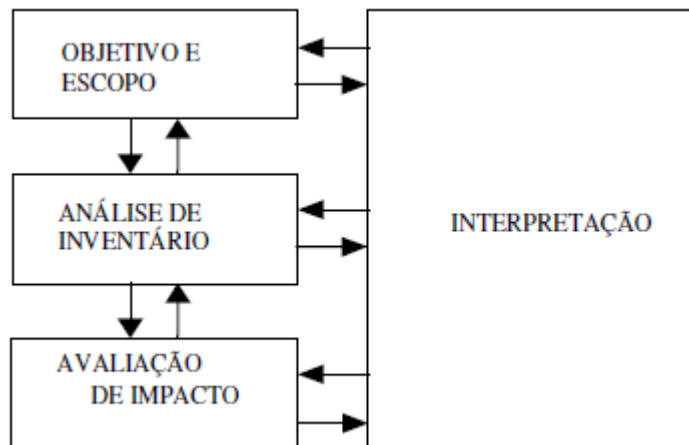


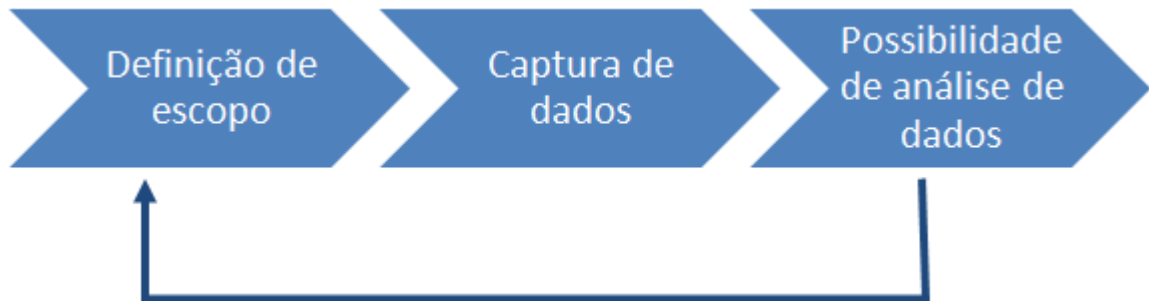
Figura 3. Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida. <sup>(6)</sup>

### 2.1.2.1 Definição de objetivo e escopo

A definição de objetivo deve ser claramente definida, uma boa tática é responder à pergunta: “o que exatamente quero saber e por quê?”. O objetivo pode ser tanto a simples análise do ciclo de vida de alguma substância para um fim comercial quanto a comparação entre duas alternativas para avaliação de menor



impacto ambiental. A definição do escopo é normalmente iterativa, uma vez que a obtenção de dados por meio do modelamento do sistema, definindo os limites aplicáveis, normalmente é mudado ao longo da análise. O motivo principal é a ausência de dados confiáveis, recursos ou tempo para análise. O fluxograma a seguir representa essa iteração:



**Figura 4. Esquema representativo da iteratividade da definição do escopo.**

A definição de escopo de escopo deve incluir primordialmente:

- As fontes de dados: dados proprietários, dados da literatura, dados estimados;
- A etapa de atualização dos estudos: limites aplicáveis, modelamento do sistema;
- Manipulação da informação: como os dados iniciais serão avaliados com relação à avaliação de impacto;
- Interpretação e aplicação dos resultados: onde os resultados poderão ser aplicados.
- Com relação a cada uma dessas etapas, cabe a definição anterior de objetivo, seja ela uma simples análise de ciclo de vida ou então uma comparação entre duas possibilidades.

#### 2.1.2.1.1 Unidade de processo

Unidades de processo são as atividades de uma operação ou um grupo de operações capazes de realizar uma transformação do produto. São caracterizadas por um fluxo de entrada e um fluxo de saída ligados em cadeia com outras unidades de processo, tudo isso representado em um fluxograma.

A elaboração do fluxograma deve ser iniciada pelos processos de manufatura do produto principal. A seguir, devem ser identificadas as etapas anteriores e posteriores, normalmente em processo iterativo. Devem ser então considerados os fluxos entre as unidades de processo, entre eles:

- Materiais;

- Energia;
- Distribuição e transporte;
- Produção e uso de combustíveis;
- Iluminação;
- Materiais auxiliares.

Alguns desses fluxos são desprezíveis com relação ao fluxo principal. Dependem também do nível de detalhamento utilizado na análise, definido no escopo do projeto. Porém, pela experiência que se tem de outras ACVs, as etapas de transporte e embalagem devem sempre constar nos fluxos das unidades de processo.

A determinação das fronteiras do sistema é fundamental para que os objetivos da ACV possam ser alcançados e o estudo possa ser eficiente. Existem casos de aplicações parciais de ACV (não contemplam o ciclo de vida completo do produto, mas são suficientes para os objetivos de um determinado estudo). As variações da ACV parcial são apresentadas na tabela abaixo.<sup>(7)</sup>

<b>Técnicas</b>	<b>Abordagem</b>
<i>Cradle-to-gate</i>	Eliminação de etapas posteriores: todos os processos após a manufatura do produto são excluídos.
<i>Gate-to-grave</i>	Eliminação de etapas anteriores: todos os processos anteriores à manufatura do produto são excluídos.
<i>Gate-to-gate</i>	Somente o estágio de fabricação é considerado.

**Figura 5. Fronteiras do sistema de ACV.<sup>(7)</sup>**

#### 2.1.2.1.2 Função, unidade funcional e fluxo de referência

Função relaciona-se a performance do produto a ser analisado na ACV. Ela pode ser por exemplo, no caso de um motor elétrico de ventilador, a capacidade de movimentar as pás do mesmo.

No estudo é necessário quantificar essa performance, para o caso do ventilador, a unidade funcional adotada poderia ser 1000 giros das pás, por exemplo.

Finalmente, é necessário calcular um fluxo de referência, relacionado com as necessidades do ventilador para realizar sua performance. Nesse caso, um bom

fluxo de referência seria a quantidade em kWh que ele necessita para realizar 1000 giros das pás.

#### 2.1.2.2 Análise de inventário

A análise de inventário costuma ser uma etapa que demanda muito tempo nas ACVs. Por isso, a adoção de uma estratégia, minimizando perdas de tempo se faz necessária.

- 1) Essa estratégia tem início em uma primeira análise superficial, com uma grosseira coleta de dados, muitas vezes apenas estimados.
- 1') Concomitantemente, se faz necessária a preparação da coleta de dados, isso se faz por meio de contato com empresas ou pessoas que poderiam potencialmente ajudar nessas questões. Além claro, dos bancos de dados hoje disponíveis e em permanente atualização/ampliação.
- 2) Coleta de dados. Recebimento das informações requisitadas e efetiva consulta aos bancos de dados, trabalhos semelhantes. Dados proprietários são sempre mais confiáveis, mas demoram muito mais tempo para serem perfilados.
- 3) Refinamento dos limites do sistema: com base nos dados obtidos, torna-se por vezes necessário reavaliar o escopo, principalmente os limites do sistema, evidenciando o caráter iterativo da definição de escopo.
- 4) Determinação dos procedimentos de cálculos: fase também dependente dos dados colhidos. Escolha do método de análise.
- 5) Procedimentos de alocação: essa etapa pode tornar-se bastante complexa. A alocação deve-se a cogeração de produtos pelas unidades funcionais. É preciso alocar os fluxos para cada um dos produtos obtidos, sem ignorar seu impacto.

A seguir cabe uma etapa de validação dos dados. A obtenção de dados de trabalhos anteriores ou de bancos de dados pode estar desatualizada e portanto requer verificação. Também é válido comparar os dados com a estimativa inicial obtida logo no início a partir da estratégia adotada.

#### 2.1.2.3 Avaliação de impacto

O resultado da etapa anterior é uma tabela com os dados de entrada e saída para o sistema do produto em estudo. Para facilitar a interpretação desses dados de

naturezas diferentes, na etapa de avaliação de impacto, os resultados do inventário são transformados em impactos ambientais potenciais.<sup>(8)</sup>

A escolha dos impactos que serão avaliados, a metodologia e o nível de detalhe dependem do objetivo e escopo. Segundo a norma ISO 14042 a avaliação de impacto ambiental é composta por três etapas obrigatórias (Seleção e definição das categorias, Classificação e Caracterização) e três etapas opcionais (Normatização, Agrupamento e Valoração)<sup>(4)</sup>. Essas fases são apresentadas a seguir:

- Seleção e definição das categorias: Identificação dos grandes focos de preocupação ambiental e escolha de categorias de impactos ambientais, como aquecimento global, toxicidade, utilização da terra, etc.
- Classificação: Distribuição dos resultados do inventário nas categorias selecionadas. Um aspecto ambiental pode ser classificado em uma ou mais categorias de impacto.
- Caracterização: Aspectos ambientais atribuídos a uma mesma categoria são convertidos a uma mesma unidade através de fatores de equivalência.
- Normatização: Para facilitar a comparação, pode-se normalizar os dados ambientais em relação a uma referência.
- Agrupamento: Reorganização das categorias, ordenadas por tipo ou importância.
- Valoração: Conversão a um único indicador através da atribuição de pesos.

A figura a seguir ilustra os elementos que podem estar presentes na Avaliação de Impacto.

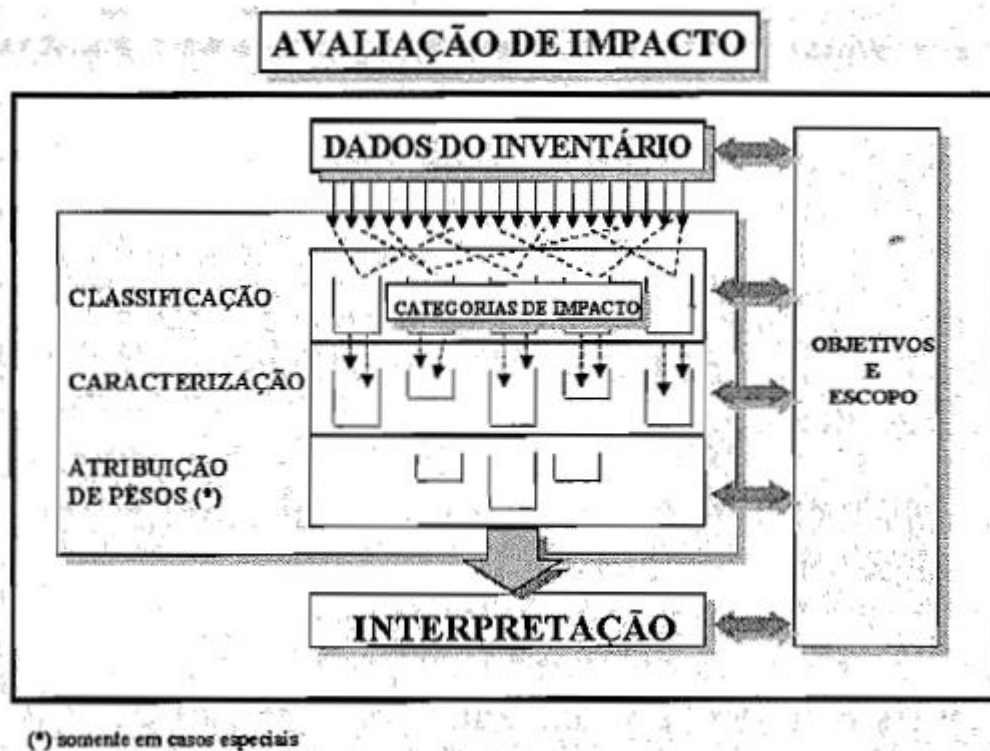


Figura 6. Avaliação de impacto ambiental. <sup>(4)</sup>

#### 2.1.2.4 Interpretação

A interpretação é a última fase da ACV e a mais importante. O objetivo desta fase é analisar os resultados, obter conclusões, identificar as limitações do estudo e fornecer recomendações para estudos futuros.

Esta etapa poderá influenciar as etapas anteriores do estudo, através de uma revisão iterativa do escopo, assim como a qualidade dos dados coletados de acordo com o objetivo.

A interpretação pode ser dividida em três etapas: <sup>(4)</sup>

- Identificação: Estruturação das informações, identificação das questões ambientais mais significativas e determinação das emissões ambientais do sistema.
- Avaliação: Verificação da integridade, sensibilidade e consistência dos resultados.
- Conclusão: Conclusões, recomendações e relatórios.

#### 2.2 Petrodiesel

O petrodiesel é uma fração do petróleo obtida a partir da destilação fracionária e serve primordialmente como combustível para motores à combustão. O motor de combustão a diesel foi o primeiro da trajetória de sucesso desse tipo de motor que até hoje é um grande protagonista de diversas indústrias, entre elas a automobilística.

A destilação do petróleo é realizada em uma refinaria. Nela, o petróleo cru sofre os processos químicos de limpeza e processamento necessários para a separação de suas frações. As principais frações são indicadas na figura a seguir:

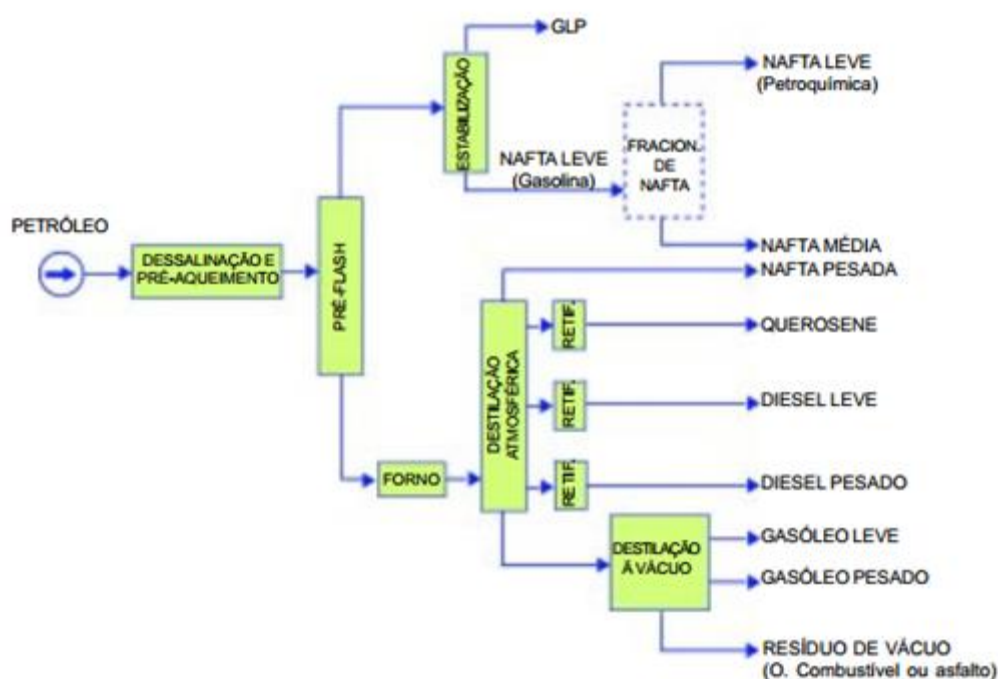


Figura 7. Principais frações do petróleo<sup>(9)</sup>

O óleo diesel é obtido nesse processo entre as temperaturas de 163-357°C, aproximadamente. Sua composição varia entre 9 e 25 carbonos (CAS No. 68334-30-5)<sup>(10)</sup>.

No Brasil, o óleo diesel é o combustível mais utilizado, predominantemente no setor de transportes que responde por 80% do valor total consumido no país deste combustível<sup>(11)</sup>. Isso se justifica pela maior representatividade do transporte rodoviário nacional frente qualquer outro modal<sup>(12)</sup>, devido ao baixo custo de implantação e flexibilidade em relação a fracionamento de carga.

Sabe-se que entre as desvantagens do transporte rodoviário, tem-se a poluição causada pelos motores. Muitos estudos já foram realizados comparando-se

as emissões de gases poluentes entre diesel e seus substitutos, como biodiesel de soja, biodiesel de dendê, biodiesel de mamona, etc. Contudo, carecem os estudos comparativos da produção de tais substitutos frente a produção do petrodiesel, analisando todo o ciclo de vida do produto e não só o uso final.

### 2.3 Biodiesel

De acordo com o ministério de minas e energia Brasileiro, o biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou pela transesterificação <sup>(13)</sup>, sendo este último o processo preferencialmente usado.

No processo de transesterificação, o óleo extraído da fonte renovável reage com um álcool sob determinadas condições produzindo os ésteres que serão queimados para produção de energia e glicerol como subproduto. No Brasil, o óleo mais usado é o óleo de soja e o álcool o etanol, conforme mostra a figura a seguir:

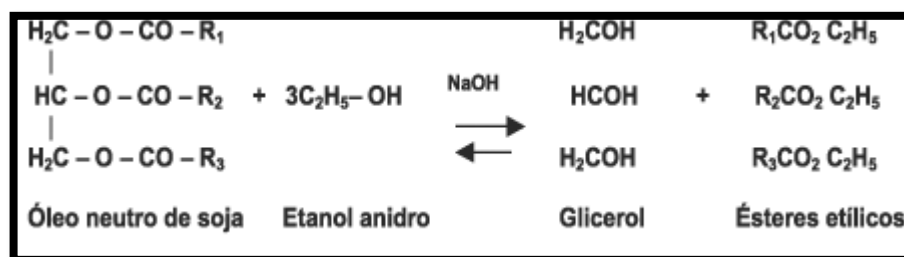


Figura 8. Reação do óleo de soja com etanol produzindo biodiesel

Para o caso em estudo, o óleo utilizado será o óleo de dendê e o álcool será o etanol anidro.

#### 2.3.1 Óleo de Dendê

O óleo de dendê é produzido a partir de uma planta originária da costa ocidental da África que foi trazida ao Brasil em meados do século XVII e rapidamente adaptou-se ao clima tropical úmido das regiões norte e nordeste. Dos frutos do dendê pode-se extrair dois tipos de óleos, o óleo de dendê ou de palma, extraído da polpa do dendê e o óleo de palmiste obtido da amêndoa, conforme a figura a seguir<sup>(3)</sup>.

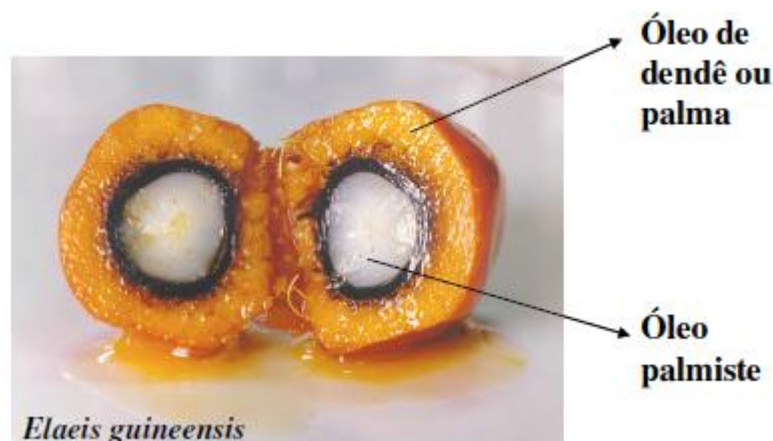


Figura 9. O fruto do dendê e os óleos de palma e palmiste. <sup>(3)</sup>

O mercado mundial de produção de óleo de dendê vem crescendo expressivamente <sup>(14)</sup>, ocupando o segundo lugar em volume comercializado no mercado internacional, perdendo apenas para o óleo de soja. O Brasil, apesar da grande disponibilidade de terras favoráveis para o cultivo (cerca de 70 milhões de hectares potenciais), tem uma participação pequena no mercado (com aproximadamente 55 mil hectares de cultivo).

O óleo de dendê se destaca entre os demais óleos com potenciais em produção de biodiesel. A tabela a seguir apresenta as principais características desses óleos.

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

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

Figura 10. Características de óleos com potencial na produção de biodiesel. <sup>(15)</sup>



Nota-se que o óleo de dendê além de apresentar período de colheita durante todo o ano, apresenta um grande rendimento por hectare, justificando a escolha do óleo de dendê no presente estudo.

### 2.3.2 Etanol

O etanol é um álcool incolor, solúvel em água e pode ser produzido a partir de cana de açúcar, milho, beterraba, matérias primas que possam fazer a fermentação do açúcar ou amido produzindo o etanol. Vale ressaltar que o Brasil utiliza a cana de açúcar e esta produção é mais barata do que a produção a partir da beterraba ou milho. O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos.

No Brasil, o etanol foi desenvolvido com o intuito de substituir a gasolina nos automóveis após a alta dos preços na década de 1980 incentivado pelo Pró-álcool (Programa Nacional do Álcool). Sua produção foi desacelerada na segunda metade da década de 1990, mas ganhou novamente força com a invenção do carro FLEX que trabalha tanto com gasolina quanto com álcool. Dessa forma, desenvolveu-se um mercado interno competitivo, com larga distribuição pelo território.

O álcool mais utilizado para a produção de biodiesel no momento é o metanol, a transterificação etílica é mais complexa do que a metílica, porém ambos os ésteres obtidos tem propriedades similares como combustível. <sup>(3)</sup>

Justifica-se a escolha da utilização do etanol no presente estudo por ser um álcool menos tóxico que o metanol e de fonte renovável. Além disso, deve-se ressaltar o fato de o Brasil ser um grande produtor de etanol mundial e já possuir um mercado consolidado.

### 3. DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

#### 3.1 Definição de objetivo

O objetivo deste estudo de ACV é comparar ambientalmente a produção do Petrodiesel (diesel obtido a partir das frações de petróleo) com a produção do Biodiesel do dendê via rota etílica (transesterificação do óleo de dendê com etanol).

Os resultados do estudo fornecerão informações para a tomada de decisão na consolidação do biodiesel no Brasil. Estes resultados serão importantes para transportadoras que tenham consciência ambiental, uma vez que com os resultados elas poderão escolher o combustível ambientalmente mais amigável que será utilizado em seus caminhões.

Outros interessados serão os distribuidores de combustível que poderão utilizar os resultados como uma estratégia de marketing de vendas, informando que certo produto apresenta menor impacto ambiental durante a sua produção.

Os inventários obtidos poderão também ser utilizados em outros estudos de ACV que utilizem o diesel, o etanol, o óleo de dendê ou o biodiesel em seu sistema.

#### 3.2 Definição do escopo

Para a definição do sistema foi adotada a abordagem “*Cradle to gate*”, ou seja, foram consideradas as etapas de extração e transformação de recursos, não sendo consideradas as etapas de distribuição, uso e disposição final.

Sabe-se que o diesel/biodiesel apresentam diversas funções, para fins comparativos é necessário escolher a mesma função para os dois produtos. A função escolhida foi “rodar o caminhão” e a unidade funcional foi definida como 10.000km. Considerando o desempenho do diesel para o caminhão Scania G410 igual a 4,29km/L<sup>(16)</sup> e considerando que o desempenho do biodiesel é 10% menor que a do diesel<sup>(17)</sup> (3,9km/L), pode-se calcular a quantidade de combustível que será necessária para atender a unidade funcional escolhida. Assim, o fluxo de referência é 2331L de diesel e 2564,1L de biodiesel.

**Tabela 1. Resumo do escopo**

Combustível	Diesel	Biodiesel
Função	Rodar caminhão	
Unidade funcional	10.000km	
Desempenho	4,29km/L	3,9 km/L
Fluxo de referência	2331L	2564,1L

### 3.2.1 Unidades de processo

#### 3.2.1.1 Petrodiesel

O Petrodiesel pode ser dividido em 4 unidades de processo de interesse para a análise do ciclo de vida:

- Extração do petróleo nacional e importado;
- Transporte do petróleo importado para território nacional;
- Refino do petróleo total;
- Geração de energia elétrica para realização do refino do petróleo.

A extração do petróleo compreende a etapa de obtenção do petróleo em suas reservas naturais, sejam elas nacionais ou internacionais. Em números absolutos o Brasil já é autosuficiente em extração de petróleo, uma vez que produz maior quantidade de barris do que seu consumo efetivo, isso de acordo com o Balanço Energético Nacional <sup>(18)</sup>. Contudo, o petróleo Brasileiro tem um grau API que o caracteriza como de médio a pesado (inclusive as novas reservas do pré-sal) <sup>(19)</sup> e dessa forma não é possível obter algumas frações leves na quantidade demandada pelo mercado nacional. Isso é solucionado pela importação de petróleo estrangeiro, mais leve que o nosso e portanto com maiores frações de compostos leves, entre eles gasolina e diesel. Ainda de acordo com o Balanço energético nacional<sup>(18)</sup>, 11,87% do petróleo para fim de obtenção de diesel é importado. Esse dado será usado em nosso inventário em uma etapa posterior da análise.



**Figura 11. Extração do petróleo em plataforma marítima.** <sup>(20)</sup>

O transporte de petróleo estrangeiro compreende a etapa na qual todo o petróleo importado para fim de obtenção de diesel muda de espaço geográfico por meio do transporte em via marítima. A distância média utilizada na análise foi de 13.300 km, uma combinação ponderada das distâncias médias entre Brasil e África e Brasil e Oriente Médio, principais fornecedores do petróleo leve Brasileiro<sup>(19)</sup>.

O refino do petróleo compreende as separações de suas frações por meio de destilação fracionada. Essa etapa ainda tem um grande consumo de energia que deve ser avaliado individualmente, apesar dos esforços em utilizar a própria matéria-prima (petróleo e suas frações) para obtenção da energia demandada.

Geração de energia elétrica para realização da destilação fracionada: unidade que tem como saída a energia elétrica demandada na separação de petróleo. No Brasil, grande parte da energia elétrica é obtida a partir de hidrelétricas e portanto tem um perfil único no mundo. Dessa forma, a geração de energia foi avaliada como uma etapa individual.

A seguir é apresentado o fluxograma com as unidades de processo para o petrodiesel, onde as caixas de texto significam as unidades de processo e as setas os fluxos de material/energia:

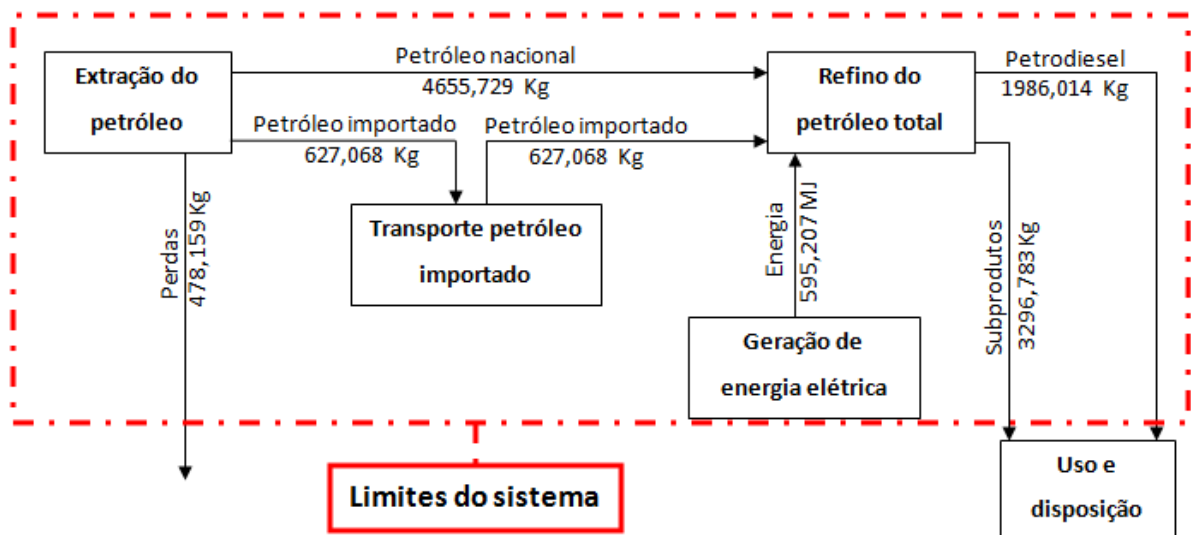


Figura 12. Limites do sistema de petrodiesel para análise do ciclo de vida.

### 3.2.1.2 Biodiesel

Ao realizar a divisão da produção do biodiesel em suas unidades de processo, teremos que algumas vezes dividir as suas unidades de processo em

outras unidades menores, referentes à obtenção de algumas das matérias-primas para sua produção: óleo de dendê, etanol e NaOH (catalisador).

As unidades de processo do biodiesel são:

- Reação de obtenção do Biodiesel;
- Energia usada na reação;
- Processo de obtenção de óleo de dendê;
- Transporte do óleo de dendê para a planta de biodiesel;
- Processo de obtenção de etanol;
- Transporte do etanol para a planta de biodiesel;
- Processo de obtenção de NaOH;
- Transporte de NaOH para a planta de biodiesel.

A unidade de processo reação de obtenção do Biodiesel compreende a reação de transesterificação que resulta na produção de biodiesel a partir de óleo de dendê e etanol na presença de catalisador (NaOH). Nota-se que nessa etapa ocorre também a produção de um subproduto em grande quantidade, o glicerol.

A energia usada na reação relaciona-se à queima de materiais combustíveis e obtenção de energia elétrica (no Brasil predominantemente a partir de hidrelétricas) responsável por suprir a demanda energética da reação de transesterificação.

O processo de obtenção de óleo de dendê deve englobar todas as etapas desde a etapa agrícola (plantio até a colheita de frutos) até a extração do óleo dos frutos.

Transporte do óleo de dendê para planta de produção de biodiesel: etapa importante, pois o pólo geográfico de plantio de dendê e os polos de geração e consumo de biodiesel não se encontram na mesma região do país.

O processo de obtenção de etanol a exemplo do processo de obtenção de dendê parte desde a etapa agrícola até a obtenção do etanol final, grau GL, passando por toda a etapa de fermentação e destilação.

Transporte do etanol para a planta de biodiesel: a área geográfica de plantio de cana-de-açúcar e obtenção do etanol é semelhante à area de processo do biodiesel, mas a etapa de transporte deve ser sempre considerada nas análises de ciclo de vida por se tratar de etapa com saídas chave para a obtenção de resultados confiáveis.

O processo de obtenção da soda cáustica deve englobar desde a etapa de obtenção do sal (NaCl) até o processamento final para NaOH.

Transporte de soda cáustica: etapa importante devido ao grande impacto nas estatísticas finais e análise de resultados.

A seguir é apresentado o sistema de biodiesel que será analisado:

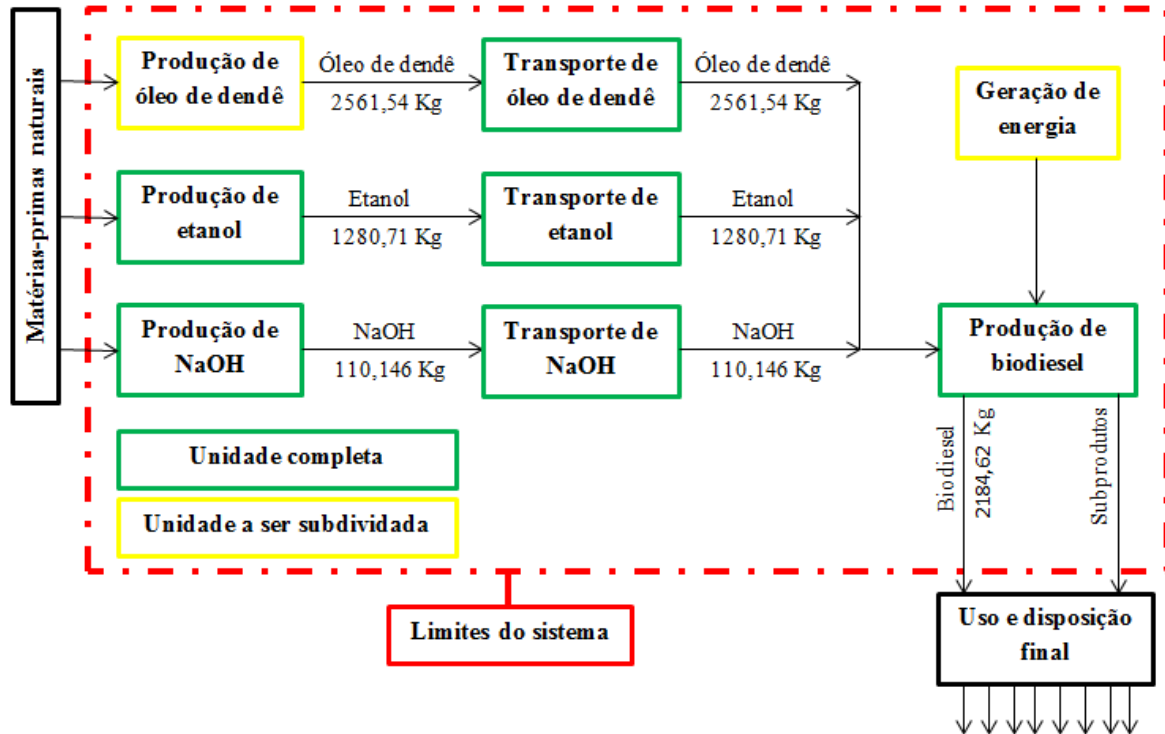


Figura 13. Limites do sistema do biodiesel.

A produção do dendê foi dividida em quatro subunidades de processo:

- Etapa agrícola: referente a etapa de plantio das árvores até colheita dos cachos de frutos;



Figura 14. Cacho de dendê na árvore.<sup>(21)</sup>

- Transporte de cachos: unidade referente ao transporte dos cachos obtidos na etapa agrícola para a planta de produção de óleo de dendê
- Etapa de produção do óleo dendê: engloba todas as transformações físicas e químicas que vão desde os cachos de dendê até a produção final de óleo de dendê, entre elas destacam-se a moagem dos frutos e remoção das cascas.
- Etapa de produção de energia elétrica: referente à obtenção de energia elétrica a ser usada na produção de óleo de dendê.

A seguir é apresentado o fluxograma para produção do óleo de dendê:

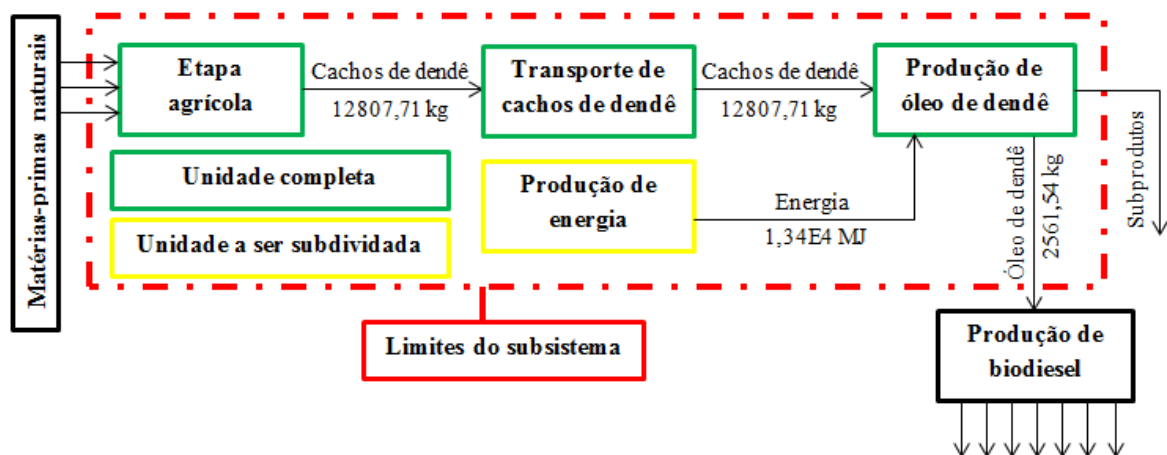


Figura 15. Limites do subsistema do óleo de dendê.

A fim de se completar o sistema de produção do dendê basta subdividir a unidade de processo de produção de energia. Essa subdivisão é necessária, pois a produção de energia nessa etapa tem duas fontes: óleo diesel convencional e a queima das cascas e fibras (que não são aproveitados para a produção de óleo). Segundo Vianna<sup>(3)</sup>, a queima das fibras e cascas é suficiente para a obtenção total da energia necessária ao sistema, contudo, existe a necessidade de uma descarga inicial de energia, a fim das fibras e cascas entrarem em combustão. Para nosso sistema, cerca de 7,58kg de diesel devem ser queimados para obter essa combustão inicial.

A seguir é apresentado o fluxograma das unidades de processo referentes à obtenção de energia elétrica para a produção de óleo de dendê:

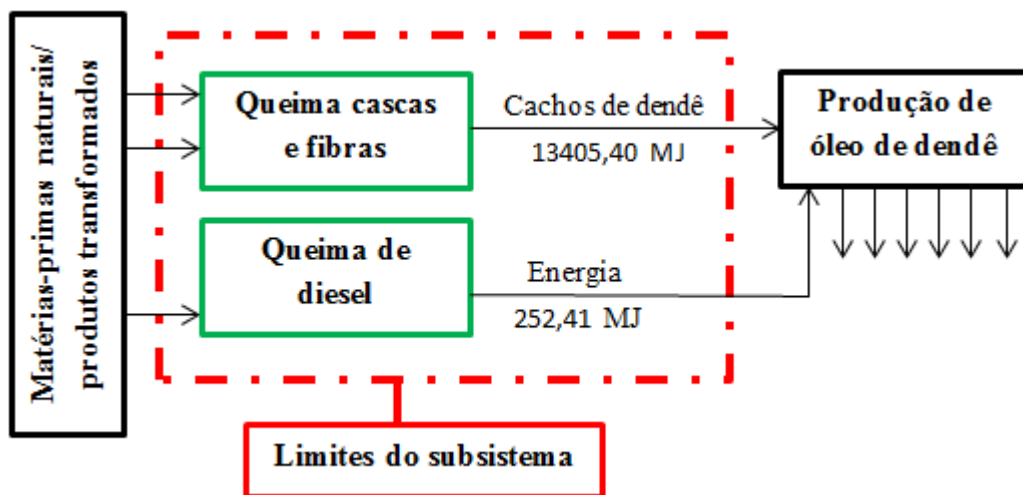


Figura 16. Fluxograma referente a obtenção de energia elétrica.



## 4. ANÁLISE DE INVENTÁRIO

### 4.1 Petrodiesel

De acordo com sistema definido na seção anterior, foi necessário obter dados para cada uma das unidades de processo definidas para o petrodiesel.

#### 4.1.1 Extração do petróleo

Para compor o inventário da extração (em terra e mar) do petróleo foi utilizada a base de dados do software GABI 4<sup>(22)</sup>. Segundo essa base de dados, 0,083% do petróleo extraído é perdido no transporte até a refinaria. Sabendo que para produzir 1kg de petrodiesel é necessário cerca de 2,66kg de petróleo<sup>(3)</sup> e considerando a densidade do petrodiesel igual a 0,852kg/L<sup>(3)</sup> pode-se calcular a quantidade total de petrodiesel que respeita o fluxo de referência definido. Assim, para produzir 2331L de petrodiesel (que equivalem a 1986,01kg) é necessário 5760,96kg de petróleo, sendo que apenas 5282,80 kg chegam à refinaria.

O inventário para esses 5760,96kg de petróleo extraídos é apresentado a seguir.

**Tabela 2. Inventário extração de 5760,96kg de petróleo.**

ENTRADAS	
Petróleo (kg)	5,76E+03
Carvão (kg)	2,46E-01
Gás natural (kg)	2,24E+02
Energia (MJ)	1,71E+00
Combustíveis renováveis (kg)	1,71E+00
Urânio (kg)	6,01E-05
Água (kg)	1,19E+03
SAÍDAS	
Energia (MJ)	4,91E+00
Efluentes líquidos	
DBO (kg)	1,77E-01
DQO (kg)	1,09E+00
Metais pesados não especificados (kg)	2,45E-05
Hidrocarbonetos (kg)	1,03E-02
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,70E-04
Água Residual (kg)	1,65E-02
Óleo não especificados (kg)	4,36E-02
Sólidos Suspensos (kg)	5,61E-01

<b>Emissões atmosféricas</b>	
CO <sub>2</sub> (kg)	8,59E+02
CO (kg)	1,70E+00
Vapor d'Água (kg)	1,21E+00
CH <sub>4</sub> (kg)	1,37E+01
Material particulado (kg)	6,40E-01
<b>Resíduos sólidos</b>	
Resíduos não especificados (kg)	1,84E-06

#### 4.1.2 Transporte do petróleo importado

Para a unidade de processo do transporte do petróleo importado foram utilizados os dados de Vianna<sup>(3)</sup> onde considerou-se um navio com capacidade média de 88.750t retornando vazio à origem.

Como apresentado na 3.2.1.1, 11,87% do petróleo utilizado no Brasil é importado e a distância média percorrida pelo navio foi considerada cerca de 13.300km<sup>(19)</sup>. Assim, são importados 627,07kg de petróleo dos 5282,90kg refinados. A tabela abaixo apresenta o inventário para o transporte destes 627,07kg de petróleo.

**Tabela 3. Inventário transporte de 627,07kg de petróleo importado.**

<b>ENTRADAS</b>	
Petróleo (kg)	6,84E+04
Energia (MJ)	1,70E+02
Gás natural (kg)	4,36E+00
Água (kg)	2,06E-03
<b>SAÍDAS</b>	
<b>Efluentes líquidos</b>	
DBO(kg)	3,15E-05
Cl <sup>-</sup> (kg)	6,22E-04
DQO (kg)	1,56E-04
Petróleo (kg)	3,04E-03
Hidrocarbonetos (kg)	1,24E-03
Sólidos Dissolvidos Totais (kg)	6,66E-02
Sólidos Suspensos Totais (kg)	3,15E-05
H <sub>2</sub> (kg)	1,87E-03
Íons metálicos (kg)	3,12E-04
Óleo não especificado (kg)	3,62E-04
<b>Emissões atmosféricas</b>	
Aldeídos (kg)	2,10E-04
NH <sub>3</sub> (kg)	1,05E-04
CO (kg)	5,91E-01
CO <sub>2</sub> (kg)	2,06E+02

Hidrocarbonetos (kg)	4,77E-01
Material particulado (kg)	2,07E-02
Metais (kg)	6,22E-04
N <sub>2</sub> O (kg)	2,52E-04
NO <sub>x</sub> (kg)	3,82E+00
SO <sub>2</sub> (kg)	3,10E+00
SO <sub>x</sub> (kg)	5,60E-03
COVNM (kg)	1,08E-02
<b>Resíduos sólidos</b>	
Resíduos Minerais (kg)	8,69E-02
Resíduos Sólidos Oleosos (kg)	8,61E-01
Resíduos não Inertes (kg)	8,21E-03

#### 4.1.3 Refino do petróleo

No que se refere ao subsistema do refino do petróleo foram utilizados os dados de Vianna<sup>(3)</sup> que considerou as rotas de refino utilizadas pela REPLAN (maior refinaria brasileira em capacidade<sup>(19)</sup>). A refinaria necessita de cerca de 0,11MJ<sup>(3)</sup> de energia elétrica por kg de petróleo refinado, assim para os 5282,80kg de petróleo refinado será necessária uma entrada de 5921MJ. O inventário para o refino de 5282,80kg de petróleo é encontrado na tabela 4.

**Tabela 4. Inventário do refino de 5282,80kg de petróleo.**

<b>ENTRADAS</b>	
Petróleo (kg)	5,28E+03
Energia (MJ)	5,95E+02
<b>SAÍDAS</b>	
<b>Efluentes líquidos</b>	
Na (kg)	8,62E-02
Cl <sup>-</sup> (kg)	1,29E-01
Óleo não especificado (kg)	3,76E-02
<b>Emissões atmosféricas</b>	
CO <sub>2</sub> (kg)	4,39E+01
CH <sub>4</sub> (kg)	2,01E-01
NO <sub>3</sub> (kg)	3,09E-02
CO (kg)	1,39E-01
COVNM (kg)	5,05E+00
Material particulado (kg)	5,36E-02
SO <sub>x</sub> (kg)	2,58E-02
Metil carptano (kg)	5,28E-05
Hidrocarbonetos (kg)	1,05E-04
H <sub>2</sub> S (kg)	1,11E-03

#### 4.1.4 Geração de energia elétrica

Conforme dito na seção anterior, é necessária uma entrada de 5921MJ de energia elétrica na etapa do refino de petróleo. Os dados da produção de energia no Brasil foram retirados de Vianna<sup>(3)</sup>. A tabela 5 apresenta o inventário para a geração de 5921MJ necessários para o refino de 5282,80kg de petróleo no Brasil.

**Tabela 5. Inventário geração de 5921MJ de energia.**

<b>ENTRADAS</b>	
Energia (MJ)	9,37E+02
Reservas bióticas (kg)	2,91E+00
Carvão (kg)	7,62E+00
Gás natural (kg)	4,53E-01
Petróleo (kg)	7,19E-01
Água (kg)	6,92E+04
Materiais secundários (kg)	5,36E-01
Urânio (kg)	1,07E-04
<b>SAÍDAS</b>	
<b>Efluentes Líquidos</b>	
Ácidos (kg)	1,01E-07
DBO (kg)	4,17E-05
DQO (kg)	1,07E-04
Cl <sup>-</sup> (kg)	1,75E-06
Metais pesados não especificados (kg)	1,07E-07
Hidrocarbonetos (kg)	1,78E-05
Metais (kg)	5,95E-06
Compostos de nitrogênio (kg)	2,69E-06
Óleos e Graxas (kg)	8,36E-05
Compostos de enxofre (kg)	2,69E-07
Sólidos Dissolvidos Totais (kg)	2,98E-05
Sólidos Suspensos Totais (kg)	5,95E-05
Radioatividade Água (kBq)	8,92E+00
<b>Emissões atmosféricas</b>	
CH <sub>4</sub> (kg)	3,27E-02
CO (kg)	8,86E-02
CO <sub>2</sub> (kg)	1,06E+01
Vapor d'Água (kg)	1,37E+02
Hidrocarbonetos (kg)	4,46E-04
Metais (kg)	5,95E-09
NH <sub>3</sub> (kg)	3,56E-10
COVNM (kg)	4,33E-03
NO <sub>x</sub> (kg)	3,43E-01
N <sub>2</sub> O (kg)	6,54E-03
Material particulado (kg)	4,02E-02
SO <sub>2</sub> (kg)	6,94E-02

Radioatividade ar (kBq)	5,82E+00
<b>Resíduos Sólidos</b>	
Resíduos no Solo (kg)	7,93E+00
Resíduos Processuais (kg)	6,38E+00

#### 4.1.5 Alocação

Deve-se ressaltar que o petrodiesel não é o único produto obtido no refino do petróleo e assim será necessário ratear os aspectos ambientais entre todos os produtos para encontrar os dados relativos ao petrodiesel.

A tabela abaixo apresenta a produção brasileira de derivados de petróleo (em m<sup>3</sup>) no ano de 2012 segundo a ANP<sup>(19)</sup>.

**Tabela 6. Produção de derivados de petróleo no Brasil em 2012<sup>(19)</sup>.**

Derivados	Volume produzido (m <sup>3</sup> )
Gasolina Automotiva	2,71E+07
Gasolina de aviação	7,76E+04
GLP	1,04E+07
Óleo combustível	1,37E+07
<b>Óleo diesel</b>	<b>4,55E+07</b>
QAV	5,42E+06
Querosene iluminante	2,39E+04
Outros energéticos	3,86E+05
Asfalto	2,57E+06
Coque	4,45E+06
Nafta	6,44E+06
Óleo lubrificante	6,08E+05
Parafina	1,23E+05
Solvente	2,90E+05
Outros não energéticos	3,19E+06
<b>Total</b>	<b>1,20E+08</b>

A partir do volume obtido para cada derivado e considerando também o poder calorífico de cada um deles<sup>(3)</sup> obteve-se uma porcentagem de alocação de 39,56% de petrodiesel.

Assim, o inventário consolidado para 2331L de petrodiesel é a soma dos inventários obtidos para a extração, transporte de importado, refino do petróleo e geração de energia elétrica multiplicados por 0,39.

#### 4.2 Biodiesel

Sabe-se que para a produção de 2564,1L de biodiesel, é necessário 2561,54Kg de óleo de dendê, 1280,77kg de etanol e 25,62kg de catalisador (soda cáustica)<sup>(23)</sup>. Iniciaremos a análise de inventário através do subsistema do óleo de dendê.

#### 4.2.1 Óleo de dendê

##### 4.2.1.1 Etapa Agrícola

Os dados para a elaboração deste inventário foram obtidos de Vianna<sup>(3)</sup> que baseou-se em dados primários através de entrevistas realizadas com o grupo Agropalma.

Sabendo que para a produção de 30kg de óleo de dendê são necessários 150kg de cachos e uma área de 3,7m<sup>2</sup>, pode-se calcular esses valores para o fluxo de referência estabelecido. Assim, para a produção de 2561,54kg de óleo de dendê será necessário 12807,71kg de cachos de frutos e uma área de 315,92 m<sup>2</sup>.

Deve-se ressaltar que foram empregados os defensivos que são utilizados pelo grupo Agropalma (acefato, carbaryl, glifosato) e que admitiu-se que da entrada total de defensivos, 5% sai como emissão atmosférica, 20% como efluente líquido e o restante como emissão para o solo.

A tabela abaixo apresenta os dados de entrada e saída para a etapa agrícola da produção de óleo de dendê.

**Tabela 7. Inventário da etapa agrícola de 12807,71kg de cachos de fruto.**

ENTRADAS	
N (kg)	1,54E+01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	2,38E+01
KCl (kg)	3,74E+02
Mg (kg)	3,27E+01
Mn (kg)	4,06E-01
Zn (kg)	1,10E+00
B (kg)	2,60E-01
Glifosato (kg)	7,38E+00
Carbaryl (kg)	2,95E+00
Acefato (kg)	1,51E-03
<i>Pueraria javanica</i> (kg)	1,58E-01
Água (kg)	1,04E+06
SAÍDAS	
Efluentes Líquidos	

N (kg)	1,54E+00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	2,38E+00
Glifosato (kg)	1,48E+00
Carbaryl (kg)	5,91E-01
Acefato (kg)	3,02E-04
<b>Emissões atmosféricas</b>	
CO <sub>2</sub> (kg)	1,88E+00
N <sub>2</sub> O (kg)	1,43E+00
Acefato (kg)	7,56E-05
Glifosato (kg)	3,69E-01
Carbaryl (kg)	1,48E-01
<b>Resíduos sólidos</b>	
Acefato (kg)	1,14E-03
Glifosato (kg)	5,53E+00
Carbaryl (kg)	2,22E+00

#### 4.2.1.2 Transporte de cachos

Ainda segundo o grupo Agropalma<sup>(3)</sup>, sabendo que a indústria fica a 29km de distância de onde é feito o plantio, deve-se considerar o transporte dos cachos de frutos colhidos para a indústria.

Para compor o inventário do transporte foi utilizados o banco de dados da empresa Pre Consultants<sup>(24)</sup>. Considerando caminhão a diesel e o retorno vazio até a origem. O inventário do transporte dos 12807,71Kg de cachos colhidos dos dendezeiros é apresentado a seguir.

**Tabela 8. Inventário para o transporte de 12807,71kg de cachos de fruto.**

<b>ENTRADAS</b>	
Diesel (kg)	1,53E+01
<b>SAÍDAS</b>	
<b>Emissões atmosféricas</b>	
CO <sub>2</sub> (kg)	4,94E+01
CO (kg)	3,05E-01
SO <sub>2</sub> (kg)	4,09E-02
NO <sub>x</sub> (kg)	1,01E+00
N <sub>2</sub> O (kg)	1,26E-03
Material particulado (kg)	1,94E-02
COVNM (kg)	1,86E-01
CH <sub>4</sub> (kg)	3,35E-02

Deve-se acrescentar a esse inventário a produção dos 15,3kg de diesel. Assim, basta considerar o inventário consolidado obtido para o petrodiesel na seção

4.1.5 multiplicando os valores encontrados por 0,0077 fator que corrige a quantidade de petrodiesel produzida.

#### 4.2.1.3 Geração de energia elétrica

A indústria de extração de óleo de dendê é auto suficiente em energia, utilizando a energia das fibras e cascas do fruto resultantes do processo. Sabe-se que as fibras e cascas são queimadas em caldeira gerando vapor que é utilizado no processo. O vapor excedente é utilizado na geração de energia elétrica.

Considerando um rendimento de 60% na combustão das cascas e fibras e um rendimento de cerca de 80% nos turbo-geradores de energia elétrica tem-se em um rendimento total de 50%, ou seja, 263.000kcal por tonelada de cacho processado<sup>(3)</sup>. Lembrando que para processar uma tonelada de cacho é necessário cerca de 12.900kcal de energia, tem-se um excedente da ordem de 250.000kcal por tonelada de cacho processado<sup>(3)</sup>. Assim, há um excedente de 13.405MJ na produção de 2561,54kg de óleo de dendê (fluxo de referência).

Para compor esse inventário serão considerados os aspectos ambientais relacionados à queima da biomassa. Porém, vale ressaltar que na queima da biomassa (fibras e cascas), a emissão de CO<sub>2</sub> não será considerada uma vez que esta será absorvida pela plantação de dendê<sup>(3)</sup>.

Entretanto, deve-se lembrar que como dito na seção 3.2.1.2, para iniciar a produção do óleo é necessário produzir energia pela queima de combustível fóssil, sendo consumido cerca de 3kg de diesel por tonelada de óleo produzido<sup>(3)</sup>. Assim, para o fluxo de referência definido será necessária a queima de cerca de 7,58kg de petrodiesel.

Conclui-se que para a formação deste inventário, deve-se considerar a queima da biomassa e a queima do diesel. Os dados relativos às emissões da queima de diesel foram retirados do banco de dados da Pre Consultants<sup>(25)</sup>, já os da queima de biomassa foram retirados de Yussouf<sup>(26)</sup>. A tabela abaixo apresenta a soma de todas essas emissões durante a queima de diesel e biomassa para a produção de 2561,54kg de óleo de dendê.

**Tabela 9. Inventário geração de energia térmica a partir da queima de petrodiesel, cascas e fibras para a produção de 2561,54kg de óleo de dendê.**

---

#### ENTRADAS

---



Cascas + fibras (kg)	1,53E+03
Diesel (kg)	7,58E+00
<b>SAÍDAS</b>	
Energia (MJ)	1,34E+04
<b>Emissões atmosféricas</b>	
COVNM (kg)	1,28E-01
CO (kg)	1,44E+01
Material particulado (kg)	3,55E+00
NO <sub>x</sub> (kg)	1,64E+00
SO <sub>x</sub> (kg)	1,78E-01
CO <sub>2</sub> (kg)	2,57E+01
NO <sub>2</sub> (kg)	4,93E-02
Hidrocarbonetos (kg)	2,27E-03

A saída de CO<sub>2</sub> é relativa apenas à queima de petrodiesel, uma vez que a emissão de CO<sub>2</sub> na queima de biomassa é considerada retornável (absorvida pela planta).

Novamente deve-se acrescentar a esse inventário a produção dos 7,58kg de petrodiesel utilizados. Neste caso, o fator que corrige a quantidade de petrodiesel produzida é de 0,0038 (9,8L divididos por 2331L).

#### 4.2.1.4 Extração do óleo de dendê

A etapa de extração do óleo é um processo físico, assim as entradas resumem-se em água e energia. Os dados para esse inventário foram retirados de Vianna<sup>(3)</sup> e as informações também são relativas ao grupo Agropalma.

Os resíduos sólidos conhecidos como borras não foram considerados na saída, pois estes são utilizados como adubo na etapa agrícola. A tabela 10 apresenta os dados de entrada e saída para a etapa de extração 2561,54kg de óleo de dendê necessários no fluxo de referência escolhido.

**Tabela 10. Inventário extração de 2561,54kg de óleo de dendê.**

<b>ENTRADAS</b>	
Cachos de frutos (kg)	1,28E+04
Água (kg)	3,33E+03
<b>SAÍDAS</b>	
Energia (MJ)	1,34E+04
<b>Emissões atmosféricas</b>	
Vapor (kg)	1,28E+03

Efluentes líquidos	
DBO (kg)	5,40E+01
DQO (kg)	8,15E+01
Sólidos em suspensão (kg)	3,71E+01
Sólidos totais (kg)	1,52E+02
Sólidos sedimentares (kg)	3,30E+01
Compostos de nitrogênio (kg)	6,40E+00
Matéria graxa (kg)	1,48E+01

#### 4.2.1.5 Balanço de CO<sub>2</sub>

Segundo Silva<sup>(27)</sup>, na plantação de dendê há um sequestro de carbono de 41,43t por hectare, ao longo dos 27 anos de vida útil da planta. Assim, lembrando que a área necessária para a produção dos 2561,54kg de óleo de dendê é de 315,92 m<sup>2</sup>, tem-se um sequestro de carbono de cerca de 1308,8kg de carbono que equivalem a 4747kg de CO<sub>2</sub><sup>(3)</sup>.

Assim, antes da consolidação do inventário para o óleo de dendê é necessário fazer um balanço de CO<sub>2</sub>. Para isso, deve-se somar as emissões de CO<sub>2</sub> de todas as etapas e subtrair o CO<sub>2</sub> sequestrado, segundo a equação:

$$\text{Total CO}_2 \text{ para o ambiente} = \sum \text{Emissões de CO}_2 - \text{CO}_2 \text{ Sequestrado}$$

Sabe-se que na produção de 30kg de óleo de dendê, 19kg de CO<sub>2</sub> são emitidos durante a queima das cascas e fibras<sup>(3)</sup>, ou seja, para o fluxo de referência, para a produção de 2561,54kg de óleo de dendê são emitidos cerca de 1622kg de CO<sub>2</sub>. Assim, pode-se fazer o balanço a seguir:

**Tabela 11. Balanço de CO<sub>2</sub> no subsistema do óleo de dendê.**

ETAPAS	Etapa agrícola	Transporte de cachos	Queima diesel	Produção diesel total	Queima cascas e fibras	TOTAL
<b>Emissão</b>	1,9 kg	49,4 kg	25,7 kg	5,1 kg	1622,3 kg	1704,4 kg
<b>Sequestro</b>	-4747,1 kg	-	-	-	-	-4747,1 kg
<b>Total CO<sub>2</sub></b>	-4745,2 kg	49,4 kg	25,7 kg	5,1 kg	1622,3 kg	<b>-3042,7 kg</b>

Conclui-se que para o subsistema óleo de dendê há um sequestro de 3042,7 kg de CO<sub>2</sub> que será considerado com um sinal negativo no inventário consolidado do óleo de dendê.

#### 4.2.1.6 Alocação

Como visto na revisão bibliográfica, o óleo de dendê não é o único produto obtido do fruto de dendê. Além do óleo de dendê são obtidos também o óleo de palmiste e a torta de palmiste<sup>(3)</sup>. Assim, é necessário alocar os aspectos ambientais entre os três produtos para obter os aspectos apenas para o óleo de dendê.

O critério escolhido para a colação dos produtos foi o preço. Sabendo que ao produzir 2561,54kg de óleo de dendê também são produzidos 192,1kg de óleo de palmiste e 448,3kg de torta de palmiste<sup>(3)</sup>. A tabela a seguir apresenta os preços de mercados segundo o ISAE<sup>(14)</sup>.

**Tabela 12. Alocação de produtos na produção de óleo de dendê.**

	Óleo de dendê	Óleo de Palmiste	Torta de Palmiste
<b>Preço (R\$/kg)<sup>(14)</sup></b>	1,5	1,3	0,5
<b>Produção (kg)</b>	2561,54	192,1	448,3
<b>Receita (R\$)</b>	3842,31	249,73	224,15
<b>Alocação</b>	89%	6%	5%

Conclui-se que para a consolidação do inventário de 2561,54kg de óleo de dendê basta somar os inventários da etapa agrícola, transporte de cachos (acrescentando a produção do diesel utilizado a partir do inventário completo do petrodiesel), geração de energia (acrescentando a produção do diesel) e da extração do óleo de dendê e multiplicar por um fator de alocação igual a 0,89. Vale ressaltar que o valor encontrado na seção anterior para o balanço de gás carbônico deve ser considerado como saída de CO<sub>2</sub>.

#### 4.2.2 Etanol

Como visto da revisão bibliográfica, apenas o etanol anidro (ausência de água) tem sido apontado como eficiente na produção do biodiesel. Assim, os dados deste inventário consideram este tipo de etanol<sup>(3)</sup>.

Admitiu-se que cerca de 5% da entrada de defensivos sai como emissão atmosférica, 25% como efluente líquido e 75% como emissão para o solo.

A cana-de-açúcar sequestra cerca de 16.300kg de carbono por hectare<sup>(3)</sup>, admitindo-se uma eficiência na combustão de 90%, tem-se que 1280,77kg de etanol liberam aproximadamente 2202,9kg de CO<sub>2</sub><sup>(3)</sup>. As quantidades de CO<sub>2</sub> de origem fóssil lançadas para a atmosfera neste subsistema somam cerca de 8,54kg, ou seja,

há um sequestro final de 2194,4kg de CO<sub>2</sub> que será representado no inventário com o sinal negativo.

Os subprodutos da produção de etanol são o óleo fúsel e o bagaço excedente. Pode-se dizer que estes não apresentam alto valor agregado e assim decidiu-se por não alocar os aspectos ambientais entre os produtos, ou seja, considerou-se 100% para o etanol.

A tabela abaixo apresenta o inventário<sup>(3)</sup> consolidado para a produção de 1280,77kg de etanol anidro.

**Tabela 13. Inventário produção de 1280,77kg de etanol anidro.**

<b>ENTRADAS</b>	
Água (kg)	1,87E+08
Ametrina (kg)	1,84E-01
CaCO <sub>3</sub> (kg)	2,01E+02
Carbofuran (kg)	3,72E+00
Clorpirifos (kg)	1,18E-01
Comazona (kg)	7,86E-02
Diuron (kg)	1,96E-01
Fipronil (kg)	1,44E-03
Glifosato (kg)	2,07E-01
Ciclo hexano (kg)	9,73E-01
Hexazinone (kg)	7,86E-02
Isoflutoler (kg)	2,62E-02
K <sub>2</sub> O (kg)	4,83E+01
Metribuzin (kg)	9,14E-02
N (kg)	3,36E+01
Mg (kg)	7,89E-02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	1,06E+01
Polímero de decantação (kg)	1,96E-03
Quartenário de amônia (kg)	1,96E-03
Sulfentrazone (kg)	1,02E-02
Tebuthiuron (kg)	5,24E-02
Energia (MJ)	8,53E-03
Reservas bióticas (kg)	1,94E-05
Carvão (kg)	5,23E-05
Gás natural (kg)	1,55E-03
Petróleo (kg)	9,56E-01
Materiais secundários (kg)	3,57E-06
Urânio (kg)	1,11E-09
Combustíveis renováveis (kg)	1,14E-05
<b>SAÍDAS</b>	
Energia (MJ)	3,25E-05
<b>Emissões atmosféricas</b>	
CO (kg)	6,50E-01

Material particulado (kg)	1,82E+00
NO <sub>x</sub> (kg)	1,53E+00
CO <sub>2</sub> (kg)	-2,19E+03
CH <sub>4</sub> (kg)	6,80E-03
N <sub>2</sub> O (kg)	2,18E-01
COVNM (kg)	1,07E-01
SO <sub>x</sub> (kg)	2,30E-04
CO <sub>2</sub> -eq (kg)	3,50E-01
Metil carptano (kg)	3,52E-10
H <sub>2</sub> S (kg)	7,37E-09
NH <sub>3</sub> (kg)	1,42E-09
Hidrocarbonetos (kg)	1,78E-04
Ametrina (kg)	9,22E-03
Carbofuran (kg)	1,86E-01
Clorpirifos (kg)	5,89E-03
Comazona (kg)	3,93E-03
Diuron (kg)	9,82E-03
Fipronil (kg)	7,22E-05
Glifosato (kg)	1,04E-02
Hexazinone (kg)	3,93E-03
Isoflutoler (kg)	1,31E-03
Metribuzin (kg)	4,57E-03
Sulfentrazone (kg)	5,13E-04
Tebuthiuron (kg)	2,62E-03
Aldeídos (kg)	2,83E-09
Radioatividade para o ar (kBq)	3,87E-05
Metais (kg)	8,38E-09
<b>Efluentes líquidos</b>	
N (kg)	3,36E+00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg)	1,06E+00
Água residual (kg)	1,10E-07
Quartenário de amônia (kg)	1,96E-03
Polímero de decantação (kg)	1,96E-03
Glifosato (kg)	4,15E-02
Diuron (kg)	3,93E-02
Tebuthiuron (kg)	1,05E-02
Hexazinone (kg)	1,57E-02
Ametrina (kg)	3,67E-02
Metribuzin (kg)	1,83E-02
Comazona (kg)	1,57E-02
Sulfentrazone (kg)	2,05E-03
Fipronil (kg)	2,89E-04
Isoflutoler (kg)	5,24E-03
Carbofuran (kg)	7,45E-01
Clorpirifos (kg)	2,36E-02
Metais pesados não especificados (kg)	1,63E-10
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,14E-09
Óleo não especificado (kg)	5,46E-07

Ácidos (kg)	6,71E-13
DBO (kg)	1,18E-06
DQO (kg)	7,25E-06
Na (kg)	5,74E-07
Cl <sup>-</sup> (kg)	8,62E-07
Hidrocarbonetos (kg)	8,51E-08
Metais (kg)	3,96E-11
Compostos de nitrogênio (kg)	1,78E-11
Óleos e graxas (kg)	5,57E-10
Compostos de enxofre (kg)	1,78E-12
Sólidos dissolvidos totais (kg)	8,97E-07
Sólidos suspensos totais (kg)	3,74E-06
Radioatividade para a água (kBq)	5,93E-05
Petróleo (kg)	4,08E-08
H <sub>2</sub> S (kg)	2,51E-08
Íons metálicos (kg)	4,19E-09
<b>Resíduos sólidos</b>	
Ametrina (kg)	1,37E-01
Carbofuran (kg)	2,79E+00
Clorpirifos (kg)	8,88E-02
Comazona (kg)	5,89E-02
Diuron (kg)	1,48E-01
Fipronil (kg)	1,08E-03
Glifosato (kg)	1,55E-01
Hexazinone (kg)	5,89E-02
Isoflutoler (kg)	1,96E-02
Metribuzin (kg)	6,86E-02
Sulfentrazone (kg)	7,70E-03
Tebuthiuron (kg)	3,94E-02
Resíduos não inertes (kg)	1,35E+00
Etanol (kg)	1,28E+00
Escória (kg)	1,70E-02
Resíduos no solo (kg)	5,28E-05
Resíduos processuais (kg)	4,24E-05
Resíduos não especificados (kg)	1,22E-11
Resíduos sólidos oleosos (kg)	1,16E-05
Resíduos minerais (kg)	1,17E-06

#### 4.2.3 Soda cáustica

Como dito anteriormente, a reação entre o óleo de dendê e o etanol para a formação de biodiesel (transesterificação) necessita de catalisador. O catalisador escolhido foi a soda cáustica e para produzir 2564,1L de biodiesel é preciso 25,62kg de NaOH.

Os dados para a elaboração deste inventário foram obtidos de Vianna<sup>(3)</sup>. Considerou-se a produção da soda pelo processo de diafragma e como neste

processo a soda não é o único produto, sendo obtidos também hidrogênio e cloro, fez-se necessário alocar os aspectos ambientais entre todos os produtos.

O critério de alocação adotado foi a massa, distribuindo-se, portanto em 46,5% para o cloro, 52,2% para a soda e 1,3% para o hidrogênio. A tabela a seguir apresenta os dados de entrada e saída para a produção de 25,62 kg de NaOH.

**Tabela 14. Inventário produção de 25,62kg de soda cáustica.**

<b>ENTRADAS</b>	
Energia (MJ)	1,37E+02
Água (kg)	1,67E+04
Sal-gema (kg)	2,39E+01
Carvão (kg)	1,85E+00
Materiais secundários (kg)	1,29E-01
Gás natural (kg)	6,24E+00
Petróleo (kg)	3,78E+03
Reservas bióticas (kg)	7,00E-01
Urânio (kg)	2,74E-05
Combustíveis renováveis (kg)	4,34E-02
<b>SAÍDAS</b>	
Energia (MJ)	1,29E-01
<b>Emissões atmosféricas</b>	
CO <sub>2</sub> (kg)	4,95E+02
SO <sub>x</sub> (kg)	2,15E+00
NO <sub>2</sub> (kg)	8,36E-01
CO (kg)	1,73E-01
Material particulado (kg)	3,01E-01
Hidrocarbonetos (kg)	7,03E-02
NH <sub>3</sub> (kg)	5,58E-06
Metais (kg)	3,30E-05
N <sub>2</sub> O (kg)	1,60E-03
NO <sub>x</sub> (kg)	3,01E-01
SO <sub>2</sub> (kg)	2,07E-01
Vapor de Água (kg)	3,31E+01
CH <sub>4</sub> (kg)	3,73E-01
COVNM (kg)	1,40E-01
Radioatividade para o ar (kBq)	1,40E+00
CFC (kg)	2,02E-04
Cl <sub>2</sub> (kg)	1,55E-05
H <sub>2</sub> (kg)	1,20E-02
Metil carptano (kg)	1,39E-06
H <sub>2</sub> S (kg)	2,91E-05
Tetraclorometano (kg)	7,15E-05
Aldeídos (kg)	1,12E-05
<b>Efluentes Líquidos</b>	
DBO (kg)	4,66E-03

DQO (kg)	2,87E-02
Hidrocarbonetos (kg)	3,41E-04
Metais (kg)	2,79E-06
Óleo não especificado (kg)	2,16E-03
Óleos e graxas (kg)	2,02E-05
Sólidos suspensos totais (kg)	1,48E-02
Sólidos dissolvidos totais (kg)	5,10E-03
Ácidos (kg)	2,44E-08
Compostos de enxofre (kg)	6,47E-08
Compostos de nitrogênio (kg)	6,47E-07
Radioatividade para a Água (kBq)	2,16E+00
Fe (kg)	4,20E-04
Efluentes líquidos não especificados (kg)	1,05E-03
Asbestos (kg)	3,10E-04
Br (kg)	9,05E-05
Organoclorados extraíveis (kg)	9,56E-06
Metais pesados não especificados (kg)	7,46E-07
Na (kg)	2,27E-03
Cl <sub>2</sub> (kg)	3,42E-03
Água residual (kg)	4,35E-04
Petróleo (kg)	1,61E-04
H <sub>2</sub> (kg)	9,90E-05
Íons metálicos (kg)	1,66E-05
<b>Resíduos sólidos</b>	
Resíduos processuais (kg)	1,54E+00
Resíduos no solo (kg)	1,92E+00
Asbestos (kg)	1,87E-03
Resíduos não inertes (kg)	5,84E+02
Resíduos não especificados (kg)	4,84E-08
Resíduos Sólidos oleosos (kg)	4,85E+00
Resíduos minerais (kg)	4,62E-03
Escória (kg)	6,58E-06

#### 4.2.4 Transporte das matérias primas

##### 4.2.4.1 Transporte óleo de dendê

Segundo o grupo Agropalma, o óleo de dendê é transportado meio rodoviário (até os portos) e depois por meio fluvial até a cidade de Belém onde fica a usina. A distância média percorrida pelos caminhões até os portos é de 24,5km e a distância média percorrida pelas balsas até Belém é de aproximadamente 91km<sup>(3)</sup>.

Para obter os aspectos ambientais relacionais aos dois tipos de transporte foram utilizadas duas bases de dados: Pré Consultants<sup>(24)</sup> para o transporte rodoviário e o Pré Consultants<sup>(28)</sup> para o transporte fluvial e foi considerado o retorno do caminhão/balsa vazio até a origem.



Os resultados obtidos para o transporte de 2561,54kg de óleo de dendê até a indústria produtora de biodiesel é apresentado na tabela abaixo.

**Tabela 15. Inventário transporte (rodoviário + fluvial) de 2561,54kg de óleo de dendê.**

ENTRADAS	
Diesel (kg)	3,86E+00
SAÍDAS	
Emissões atmosféricas	
SO <sub>2</sub> (kg)	1,99E-02
CO <sub>2</sub> (kg)	1,23E+01
CO (kg)	6,22E-02
NO <sub>x</sub> (kg)	2,48E-01
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (kg)	9,31E-03
Material particulado (kg)	3,23E-03
N <sub>2</sub> O (kg)	1,80E-04
CH <sub>4</sub> (kg)	4,77E-03
COVNM (kg)	2,66E-02

Como há o consumo de diesel no transporte, faz-se necessário considerar a produção do diesel utilizado. Considerou-se o inventário encontrado para o petrodiesel, para corrigir os dados para a produção de 3,86kg de petrodiesel basta multiplicar os dados por 0,0019.

#### 4.2.4.2 Transporte etanol

O etanol é transportado até a indústria de produção de biodiesel através do transporte rodoviário. Considerou-se uma distância de aproxima de 390km<sup>(3)</sup> e caminhões de 28t com retorno vazio até a origem. Os dados foram obtidos na base de dados Pré Consultants<sup>(24)</sup> como na seção anterior. O inventário para o transporte de 1280,77kg de etanol é apresentado na tabela 16.

**Tabela 16. Inventário transporte de 1280,77kg de etanol.**

ENTRADAS	
Diesel (kg)	2,05E+01
SAÍDAS	
Emissões atmosféricas	
CO <sub>2</sub> (kg)	6,64E+01
CO (kg)	4,10E-01
SO <sub>2</sub> (kg)	5,50E-02
NO <sub>x</sub> (kg)	1,35E+00

N <sub>2</sub> O (kg)	1,70E-03
Material particulado (kg)	2,60E-02
COVNM (kg)	2,50E-01
CH <sub>4</sub> (kg)	4,50E-02

Novamente é necessário considerar a produção dos 20,5kg de diesel utilizados, para isso basta multiplicar os dados do inventário encontrado para o petrodiesel por 0,0103.

#### 4.2.4.3 Transporte soda

Assim como o etanol, a soda é transportada apenas por transporte rodoviário. A distância percorrida no entanto é de 2173km<sup>(3)</sup>. Os dados foram obtidos na base de dados Pré Consultants<sup>(24)</sup>, considerando caminhão de 28t com retorno vazio até a origem. Abaixo apresenta-se o inventário para o transporte de 25,62kg de soda cáustica até a indústria de produção de biodiesel.

**Tabela 17. Inventário transporte de 25,62kg de soda cáustica.**

ENTRADAS	
Diesel (kg)	2,28E+00
SAÍDAS	
Emissões atmosféricas	
CO <sub>2</sub> (kg)	7,40E+00
CO (kg)	4,57E-02
SO <sub>2</sub> (kg)	6,12E-03
NO <sub>x</sub> (kg)	1,50E-01
N <sub>2</sub> O (kg)	1,90E-04
Material particulado (kg)	2,89E-03
COVNM (kg)	2,78E-02
CH <sub>4</sub> (kg)	5,01E-03

Para considerar a produção de 2,28kg de petrodiesel, basta multiplicar os dados encontrados no inventário consolidado da seção 4.1.5 por 0,00115.

#### 4.2.5 Produção do biodiesel

Este subsistema inclui três etapas: tratamento do óleo, transesterificação e recuperação do etanol. Para a desidratação do etanol foi considerado o processo por adsorção em peneira molecular.

Os dados para compor este inventário foram retirados de Vianna<sup>(3)</sup>. A tabela abaixo apresenta o inventário para a etapa industrial da produção do biodiesel, já considerando a produção da energia elétrica necessária para a produção dos 2564,1L de biodiesel (fluxo de referência definido no escopo da ACV).

<b>Entradas</b>	
Água (kg)	1,26E+05
Vapor (kg)	1,33E+03
Energia (MJ)	2,77E+02
Carvão (kg)	2,26E+00
Materiais secundários (kg)	1,58E-01
Gás natural (kg)	1,34E-01
Petróleo (kg)	2,13E-01
Reservas bióticas (kg)	8,54E-01
Urânio (kg)	3,17E-05
<b>Saídas</b>	
<b>Emissões atmosféricas</b>	
Hidrocarbonetos (kg)	6,40E+00
CO <sub>2</sub> (kg)	3,26E+02
NO <sub>x</sub> (kg)	5,56E-01
SO <sub>2</sub> (kg)	7,09E-01
CO (kg)	3,24E-02
Material particulado (kg)	1,46E-02
NH <sub>3</sub> (kg)	1,30E-09
Metais (kg)	2,17E-09
N <sub>2</sub> O (kg)	2,38E-03
Vapor de Água (kg)	5,00E+01
CH <sub>4</sub> (kg)	1,19E-02
COVNM (kg)	1,58E-03
Radioatividade para o ar (kBq)	2,12E-03
<b>Efluentes líquidos</b>	
Resíduos não saponificáveis (kg)	3,48E+05
Sabão (kg)	1,79E-01
Glicerídios (kg)	2,27E-01
DBO (kg)	1,52E-05
DQO (kg)	3,90E-05
Hidrocarbonetos (kg)	6,51E-06
Íons metálicos (kg)	2,17E-06
Óleos e graxas (kg)	3,04E-05
Sólidos suspensos totais (kg)	2,17E-05
Sólidos dissolvidos totais (kg)	1,08E-05
Ácidos (kg)	3,69E-08
Cl <sup>-</sup> (kg)	6,40E-07
Compostos de enxofre (kg)	9,73E-08
Compostos de nitrogênio (kg)	9,73E-07
Metais pesados não especificados (kg)	3,90E-08

Radioatividade para a água (kBq)	3,27E-03
<b>Resíduos sólidos</b>	
Matéria graxa (kg)	2,63E+02
Resíduos processuais (kg)	2,32E+00
Resíduos no solo (kg)	2,90E+00

#### 4.2.6 Alocação

Além do biodiesel também é produzido glicerina como co-produto. Assim, faz-se necessário alocar os aspectos ambientais entre os produtos. O critério adotado foi a quantidade em massa produzida de cada um, ou seja, 90% de biodiesel e 10% de glicerina<sup>(3)</sup>.

Para a consolidação do inventário de 2564,1L de biodiesel de dendê rota etílica é necessário somar os inventários obtidos para o óleo de dendê, etanol, soda cáustica, transporte das matérias primas e produção do biodiesel e multiplicar o resultado por 0,9 (alocação do biodiesel).

## 5. AVALIAÇÃO DE IMPACTO

### 5.1 Método

Na etapa de avaliação de impacto foi utilizado o programa computacional SimaPro<sup>(29)</sup>. Segunda a Pré Consultants (empresa detentora do programa), o SimaPro é o software preferencialmente utilizado em análises de ciclo de vida, tendo como funcionalidades desde a coleta de dados até o modelamento completo e analítico do ciclo de vida de uma substância<sup>(29)</sup>.

O programa dispõe de uma série de métodos de análise, entre eles o CML-IA, o Impact 2002 o EPD (2013) e o ReCiPe<sup>(29)</sup>.

Para este trabalho, o método de análise escolhido foi o ReCiPe.

O ReCiPe é o sucessor dos métodos Eco-indicator 99 e CMI-IA, integrando os sistemas de abordagem de problema (midpoint) e abordagem de impacto (endpoint)<sup>(30)</sup>. O ReCiPe contém 11 categorias de impacto que entrelaçam ambas as abordagens e além disso conta com todas as etapas obrigatórias (Seleção e definição das categorias, Classificação e Caracterização) e todas as três etapas opcionais (Normatização, Agrupamento e Valoração), o que torna a análise de maior valor estatístico, ou seja, possui resultados mais confiáveis.

A seguir é apresentada a tabela com todas as categorias de impacto e suas respectivas unidades:

**Tabela 18. Categorias de impacto, suas unidades e fatores de caracterização**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade (abordagem de problema)</b>	<b>Fator de caracterização</b>
<b>Mudanças climáticas</b>	kg CO <sub>2</sub> (no ar)	Potencial de aquecimento global
<b>Depleção da camada de ozônio</b>	kg CFC-11 (no ar)	Potencial de depleção de ozônio
<b>Acidificação</b>	kg SO <sub>2</sub> (no ar)	Potencial total de acidificação
<b>Eutrofização</b>	kg N (na água) kg P (na água)	Potencial de eutrofização de água fresca
<b>Toxicidade</b>	kg de 14DCB (no ar) kg de 14DCB (na água) kg de 14DCB (no solo)	Potencial de toxicidade para o homem
<b>Dano à saúde humana por particulados e ozônio</b>	kg COVSM (no ar) kg PM <sub>10</sub> (no ar)	Potencial de formação de ozônio
<b>Radiação ionizante</b>	kg Urânio-235 (no ar)	Potencial de radiação ionizante
<b>Uso do solo</b>	m <sup>2</sup>	Potencial de uso de solo agrícola

<b>Depleção de água</b>	m <sup>3</sup> de água	Potencial de depleção de água
<b>Depleção de recursos minerais</b>	kg Ferro	Potencial de depleção mineral
<b>Depleção de combustíveis fósseis</b>	kg petróleo bruto, gerador de 42 MJ/kg	Potencial de depleção de fósseis

A seguir é feita uma análise mais detalhada de cada uma das categorias de impacto. O método ReCiPe do SimaPro utiliza modelos matemáticos para encontrar um valor final da unidade de cada uma das categorias. O modelo matemático é baseado em extensos bancos de dados e modelos científicos.

### 1) Mudanças climáticas

Mudanças climáticas afetam tanto o ecossistema quanto a saúde humana.

A unidade de medida é o kg de CO<sub>2</sub> lançado na atmosfera. Outros gases que tem influência nessa categoria são inclusos a partir de um fator de caracterização.

São quatro as principais influências negativas dos gases que entram nessa categoria de impacto:

- Força radiante;
- Aumento de temperatura;
- Dano à saúde humana;
- Dano à diversidade do ecossistema.

Essas influências negativas são mensuradas a partir de modelos matemáticos e bancos de dados individuais que normalmente utilizam uma situação de equilíbrio comparativamente a situação de análise.

### 2) Depleção da camada de ozônio

O ozônio estratosférico é imprescindível para a vida na terra, pois diminui radicalmente a incidência de raios ultra-violetas nocivos para a saúde dos seres vivos. Ele está sob constante formação e deterioração em reações químicas e fotoquímicas.

Chama-se de depleção da camada de ozônio o fenômeno em que as reações de deterioração de ozônio superam as reações de formação do ozônio estratosférico, o que resulta na diminuição de sua concentração.

A unidade de medida para essa categoria é kg de CFC-11 lançado na atmosfera e serve também como fator de caracterização para as demais substâncias de depleção de ozônio (SDO). Essas substâncias são gases que contém cloro e bromo em sua composição, como CFCs, por exemplo. Cloretos e brometos causam a catálise heterogênea do ozônio de altas altitudes, conforme mostra as reações a seguir:

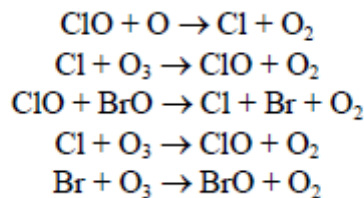


Figura 17. Catálise heterogênea do ozônio de altas altitudes.<sup>(30)</sup>

Vê que uma pequena quantidade de cloretos e brometos já causa um grande impacto, uma vez que podem ser regenerados na terceira reação.

Essa categoria de impacto vem tendo menos foco, uma vez que o buraco na camada de ozônio já não está aumentando e as emissões de gases com cloro e bromo para a atmosfera estão em trajetória estacionária ou decrescente, conforme ilustra o gráfico a seguir:

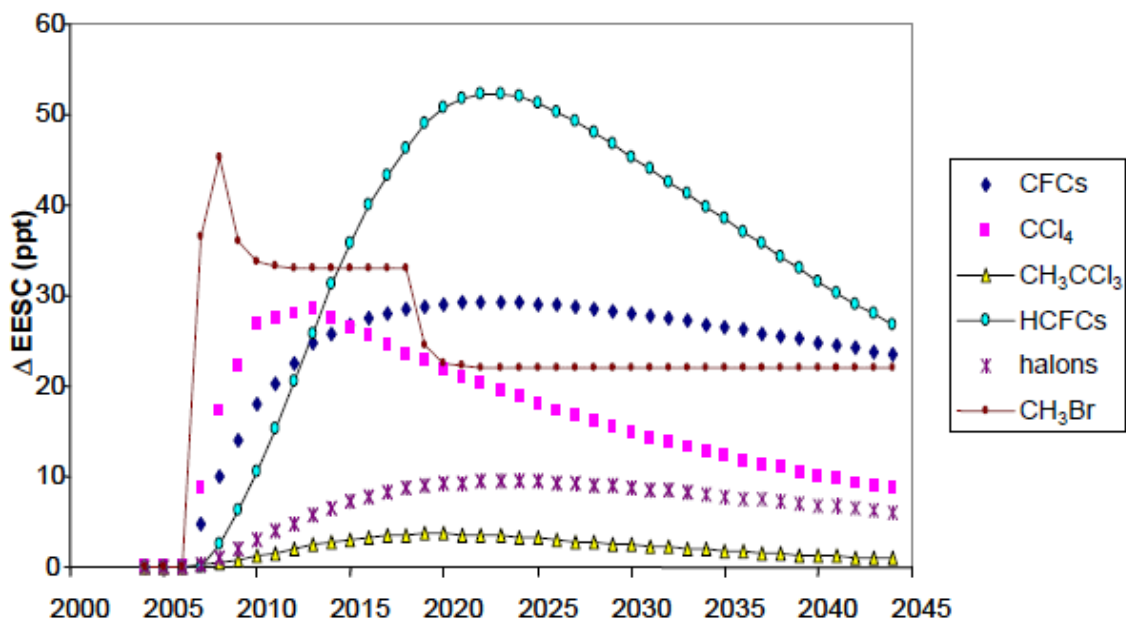


Figura 18. Tendência das emissões de gases que provocam a depleção da camada de ozônio.<sup>(30)</sup>

### 3) Acidificação

Acidificação relaciona-se com emissões de gases causadores de chuva ácida, como  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NH}_3$ . Esses gases podem reagir com vapor de água na atmosfera formando ácidos, entre eles  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Esses ácidos ao cair no solo mudam o pH local, alterando a condição ótima de crescimento da maioria dos organismos vegetais.

Um efeito conhecido da chuva ácida nos centros urbanos é a deteriorização de estruturas de cobre e pedra-sabão (contém  $\text{CaCO}_3$ ). A seguir é mostrada uma imagem de obra danificada do artista Aleijadinho, feita em pedra-sabão:



**Figura 19. Obra de Aleijadinho danificada por conta da chuva ácida.<sup>(31)</sup>**

A unidade adotada nessa categoria de impacto é a quantidade (kg) de  $\text{SO}_2$  lançada na atmosfera.

#### 4) Eutrofização

A eutrofização pode ser definida como um aumento da quantidade de nutrientes em uma atmosfera aquática (tanto de água doce quanto marinha) por conta de atividade humana, causando um desequilíbrio na fauna e flora local.

Esse desequilíbrio normalmente resulta em um crescimento descontrolado de algas, o que pode gerar uma diminuição da concentração de oxigênio na água, além da liberação de substâncias nocivas tanto para os outros seres vivos quanto para as próprias algas.





Figura 20. Maré vermelha, um exemplo de eutrofização.<sup>(32)</sup>

As unidades para essa categoria são a quantidade (kg) de nitrogênio ou fósforo despejados nas águas (nitrogênio tem um fator de caracterização de 3 e fósforo um de 7). Nitrogênio e fósforo podem ser considerados junto com o potássio os principais responsáveis pelo crescimento vegetal, tanto aquático quanto terrestre.

Normalmente em processos industriais as emissões de nitrogênio e fósforo sofrem tratamento, constando então apenas na tecnosfera e não influenciando negativamente nessa categoria. Esse impacto, assim como a depleção da camada de ozônio já tem soluções práticas adotadas para a maioria dos casos e portanto tem um peso menor na análise.

#### 5) Toxicidade

O efeito tóxico para a saúde humana é avaliado a partir de métodos que medem a acumulação de compostos químicos dessa natureza em produtos de consumo alimentício humano e também a partir da inalação de gases deste tipo.

Quanto à toxicidade para o meio-ambiente, esta é avaliada a partir da quantidade de compostos tóxicos lançados no solo ou em água.

A toxicidade tem um caráter bem regional na maioria dos casos, já que medidas rigorosas são implementadas para controlar o efeito negativo dessas substâncias uma vez detectadas. Contudo, muitas substâncias com caráter um pouco tóxico para os humanos podem ser encontradas em pesticidas agrícolas, por exemplo.

As unidades de medida para esse fator de caracterização são: kg 14DCB lançados no ar, na água e no solo.

#### 6) Dano à saúde humana por particulados e ozônio

Apesar de em grandes altitudes o ozônio ser um regulador de entrada de raios ultravioleta, importantíssimo para a vida, em baixas altitudes este é um poluente. Esse composto não é diretamente emitido na atmosfera, mas é formado a partir do resultado de uma reação fotoquímica com  $\text{NO}_x$  ou compostos orgânicos voláteis sem metano (COVSM). O ozônio prejudica o funcionamento do sistema respiratório humano, uma vez que inflama as vias respiratórias e causa danos aos pulmões.

Particulados menores de 10 micrometros ( $\text{PM}_{10}$ ) tem o mesmo efeito danoso ao sistema respiratório humano. Os  $\text{PM}_{10}$  são formados a partir de diversos compostos, entre eles  $\text{SO}_2$  e  $\text{NH}_3$ .

A unidade desta categoria de impacto é a quantidade em kg de  $\text{PM}_{10}$  e COVSM, enquanto que o fator de caracterização é o potencial para formação de ozônio (em baixas altitudes).

#### 7) Radiação ionizante

Nesta categoria de impacto entra qualquer categoria de compostos capaz de promover a radiação ionizante, entre eles tório e cézio. A análise leva em conta o inventário para estabelecer quais são essas substâncias e suas quantidades e posteriormente analisa também a dispersão dessas substâncias, assim como a resposta que o ser humano tem quando exposto a elas.

A unidade é o potencial de radiação ionizante e o fator de caracterização é Urânio-235.

#### 8) Impactos no uso do solo

Esta categoria de impacto calcula os danos causadas pela ocupação e transformação do solo na biodiversidade dos ecossistemas.

Esta categoria de impacto normalmente tem dificuldades de alocação, uma vez que na maioria dos casos ocorre o revezamento de culturas em uma plantação. Porém, isso não é um problema em nossa análise, pois não há rotatividade na produção de dendê.

O impacto pode ser calculado a partir da estimativa em anos do restabelecimento da biodiversidade antes existente.

A unidade é o  $\text{m}^2$  e o fator de caracterização é o potencial de ocupação do solo.

#### 9) Depleção da água

A água é um recurso natural heterogeneamente espalhado no mundo. A extração de água em lugares secos tem um grande impacto no ecossistema e na saúde humana e deve, portanto aparecer como uma fonte de problema apesar de não constarem ainda análises da mesma como fonte de impacto.

A unidade a ser utilizada é simplesmente a quantidade de água usada em m<sup>3</sup> nas unidades de processo analisadas.

#### 10) Depleção de recursos minerais

Um mineral é uma substância natural de composição química definida formada a partir de processos geológicos. Minerais são obtidos a partir da exploração humana de reservas minerais ou jazidas minerais. Embora exista nessas minas o interesse principal em apenas um componente, por exemplo o ouro, muitos outros minérios (minerais de interesse) podem ser subtraídos da mesma reserva.

Esta categoria de impacto utiliza o banco de dados da sociedade americana de geologia para efetuar o modelo matemático. A unidade a ser adotada é a quantidade de ferro retirada (em kg).

#### 11) Depleção de combustíveis fósseis

O grupo de combustíveis fósseis refere-se aos combustíveis de hidrocarbonetos, desde os gases como metano e butano, até gasolina, diesel e até mesmo as parafinas sólidas e carvão.

A categoria de impacto é avaliada a partir da comparação entre a atual matriz de combustíveis fósseis comparada com uma matriz fóssil não convencional, economicamente mais cara, mas ecologicamente mais correta. O gráfico a seguir ilustra as possibilidades de uso de combustíveis fósseis de acordo com o preço do barril de petróleo:

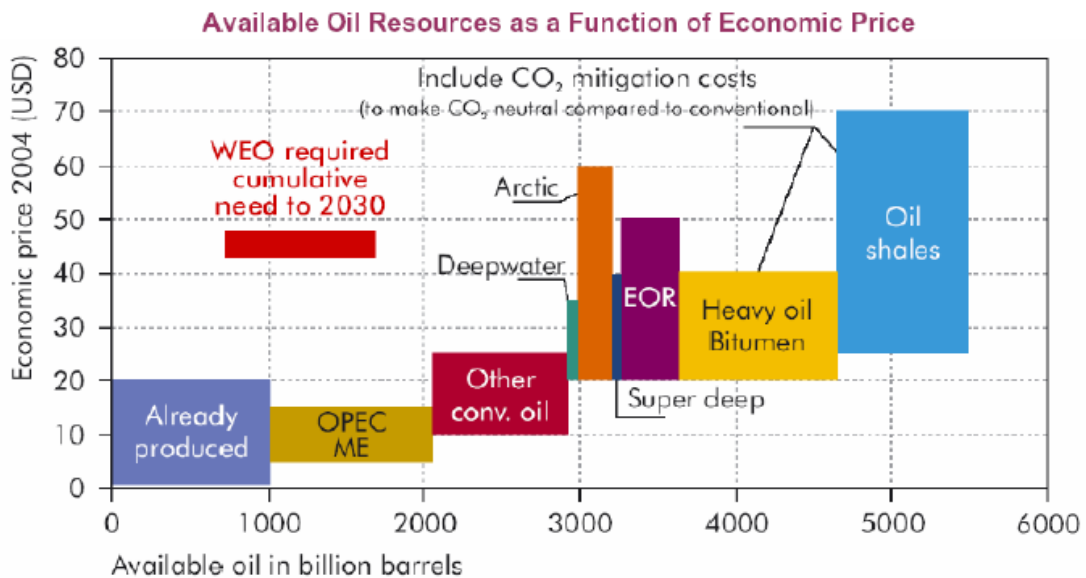


Figura 21. Possibilidades de uso de combustíveis fósseis a partir do preço mundial do barril.<sup>(30)</sup>

Esse gráfico serve também para entendermos o interesse Brasileiro na extração de petróleo em altas profundidades no pré-sal e sua atual viabilidade econômica, além do interesse em alternativas aos combustíveis de petróleo, como o biodiesel que estamos comparativamente analisando junto ao petrodiesel.

A unidade usada é o petróleo bruto retirado do solo, gerador de 42 MJ por quilograma, enquanto que o fator de caracterização é o potencial de depleção fóssil.

## 5.2 Resultados

### 5.2.1 Petrodiesel

A seguir é apresentada a tabela que compreende os resultados obtidos para a produção de 2331L de petrodiesel no método ReCiPe Midpoint, com suas 11 categorias de impacto e 18 unidades de medida de impacto.

Tabela 19. Impactos por categoria para 2331L de petrodiesel.

Categoria de impacto	Total
Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	4,14E+02
Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	0,00E+00
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	4,11E-01
Eutrofização P (kg P eq)	0,00E+00
Eutrofização N (kg N eq)	1,31E-02
Toxicidade p/ homem (kg 1,4-DB eq)	8,84E-04
Dano a saúde humana por ozônio (kg NMVOC)	4,24E-01
Dano a saúde humana por material particulado (kg PM <sub>10</sub> eq)	1,07E-01
Toxicidade p/ solo (kg 1,4-DB eq)	3,70E-07

Toxicidade p/ água (kg 1,4-DB eq)	1,16E-07
Toxicidade p/ mar (kg 1,4-DB eq)	3,47E-08
Radiação ionizante (kg U235 eq)	0,00E+00
Uso do solo urbano (m <sup>2</sup> )	0,00E+00
Uso do solo rural (m <sup>2</sup> )	0,00E+00
Transformação do solo (m <sup>2</sup> )	0,00E+00
Depleção de água (m <sup>3</sup> )	4,98E+02
Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	8,14E-03
Depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq)	9,93E+01

Observação: O uso do solo urbano não foi computado, uma vez que foi considerado que esse impacto é igual para os dois produtos (petrodiesel e biodiesel).

Foram obtidos também os resultados por unidade de processo. A tabela abaixo apresenta esses resultados.

**Tabela 20. Resultados por categoria para cada unidade de processo do sistema petrodiesel.**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Extração petróleo nacional</b>	<b>Extração petróleo importado</b>	<b>Transporte petróleo importado</b>	<b>Energia gerada para refino</b>	<b>Refino do petróleo</b>
Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	3,36E+02	4,59E+01	9,81E+00	4,70E+00	1,80E+01
Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	0,00E+00	0,00E+00	2,78E-01	1,24E-01	1,02E-02
Eutrofização P (kg P eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofização N (kg N eq)	0,00E+00	0,00E+00	7,1E-03	5,29E-03	7,33E-04
Toxicidade p/ homem (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	0,00E+00	8,35E-04	0,00E+00	4,89E-05
Dano a saúde humana por ozônio (kg NMVOC)	7,51E-02	1,03E-02	1,95E-01	1,40E-01	4,14E-03
Dano a saúde humana por material particulado (kg PM <sub>10</sub> eq)	0,00E+00	0,00E+00	6,97E-02	3,53E-02	2,04E-03
Toxicidade p/ solo (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	0,00E+00	3,7E-07	0,00E+00	0,00E+00
Toxicidade p/ água (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	0,00E+00	1,6E-07	0,00E+00	0,00E+00
Toxicidade p/ mar (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	0,00E+00	3,47E-08	0,00E+00	0,00E+00
Radiação ionizante (kg U235 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo urbano (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo rural (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Transformação do solo (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de água (m <sup>3</sup> )	4,14E+02	5,66E+01	9,80E-05	2,74E+01	0,00E+00
Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	2,58E-03	3,53E-04	0,00E+00	5,21E-03	0,00E+00
Depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq)	8,67E+01	1,19E+01	0,00E+00	6,78E-01	0,00E+00

Os resultados serão analisados na próxima seção 6.

## 5.2.2 Biodiesel

A tabela obtida através do software SimaPro<sup>(29)</sup>, utilizando o mesmo método utilizado para o petrodiesel (ReCiPe Midpoint) é apresentada abaixo para o fluxo de referência definido, 2564,1L de biodiesel.

**Tabela 21. Impactos por categoria para 2564,1L de biodiesel.**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Total</b>
Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	-3,39E+03
Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	4,70E-05
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	5,04E+00
Eutrofização P (kg P eq)	1,19E+00
Eutrofização N (kg N eq)	9,05E+00
Toxicidade p/ homem (kg 1,4-DB eq)	3,93E-01
Dano a saúde humana por ozônio (kg NMVOC)	3,37E+00
Dano a saúde humana por material particulado (kg PM <sub>10</sub> eq)	1,25E+00
Toxicidade p/ solo (kg 1,4-DB eq)	6,86E-04
Toxicidade p/ água (kg 1,4-DB eq)	1,31E-04
Toxicidade p/ mar (kg 1,4-DB eq)	9,36E-05
Radiação ionizante (kg U235 eq)	0,00E+00
Uso do solo urbano (m <sup>2</sup> )	0,00E+00
Uso do solo rural (m <sup>2</sup> )	6,88E+02
Transformação do solo (m <sup>2</sup> )	0,00E+00
Depleção de água (m <sup>3</sup> )	1,84E+05
Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	2,48E+01
Depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq)	3,44E+00

Também foram obtidos os resultados por unidade de processo. Abaixo são apresentados os resultados para as unidades de processo de produção das matérias primas, transporte e produção do biodiesel.

**Tabela 22. Resultados por categoria para cada unidade de processo de produção das matérias primas do biodiesel.**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Etapa Agrícola dende</b>	<b>Transporte dos cachos</b>	<b>Produção petrodiesel para transporte de cachos</b>	<b>Produção óleo de dende</b>	<b>Produção etanol</b>	<b>Produção catalisador</b>
Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	-2,31E+03	4,00E+01	2,36E+00	0,00E+00	-1,94E+03	4,48E+02
Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,70E-05
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	0,00E+00	5,61E-01	2,34E-03	0,00E+00	2,07E-04	2,31E+00
Eutrofização P (kg P eq)	7,74E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,19E-01	0,00E+00
Eutrofização N (kg N eq)	1,14E+00	2,00E-02	7,46E-05	4,72E+00	3,02E+00	5,57E-02
Toxicidade p/ homem (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	5,02E-06	5,02E-06	0,00E+00	7,00E-04	3,92E-01
Dano a saúde humana por ozônio (kg NMVOC)	0,00E+00	7,60E-01	2,41E-03	0,00E+00	2,67E-02	4,53E-01
Dano a saúde humana por material particulado (kg PM <sub>10</sub> eq)	0,00E+00	1,70E-01	6,09E-04	0,00E+00	4,13E-05	4,84E-01

Toxicidade p/ solo (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	2,10E-09	2,10E-09	0,00E+00	6,79E-04	7,44E-06
Toxicidade p/ água (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	6,61E-10	6,61E-10	0,00E+00	1,30E-04	3,13E-07
Toxicidade p/ mar (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	1,97E-10	1,97E-10	0,00E+00	9,35E-06	8,42E-05
Radiação ionizante (kg U235 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo urbano (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo rural (m <sup>2</sup> )	3,16E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,72E+02	0,00E+00
Transformação do solo (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de água (m <sup>3</sup> )	7,70E+02	2,46E+00	2,83E+00	2,46E+00	1,68E+05	1,51E+04
Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	2,48E+01	0,00E+00	4,63E-05	0,00E+00	1,23E-07	3,03E-03
Depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq)	0,00E+00	0,00E+00	5,64E-01	0,00E+00	8,61E-01	3,75E-01

**Tabela 23. Resultados por categoria para cada unidade de processo do sistema biodiesel.**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Produção biodiesel</b>	<b>Produção petrodiesel para transporte matérias primas</b>	<b>Transporte etanol</b>	<b>Transporte NaOH</b>	<b>Transporte óleo de dendê</b>
Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)	2,94E+02	3,85E+00	6,00E+01	7,00E+00	1,00E+01
Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)	9,93E-01	3,82E-03	9,16E-01	1,10E-01	1,57E-01
Eutrofização P (kg P eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofização N (kg N eq)	1,95E-02	1,22E-04	5,00E-02	5,30E-03	2,00E-02
Toxicidade p/ homem (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	8,20E-06	8,00E-06	0,00E+00	1,37E-06
Dano a saúde humana por ozônio (kg NMVOC)	5,53E-01	3,94E-03	1,24E+00	1,38E-01	2,02E-01
Dano a saúde humana por material particulado (kg PM <sub>10</sub> eq)	2,38E-01	9,94E-04	2,78E-01	3,10E-02	4,70E-02
Toxicidade p/ solo (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	3,43E-09	0,00E+00	0,00E+00	5,70E-10
Toxicidade p/ água (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	1,08E-09	0,00E+00	0,00E+00	1,80E-10
Toxicidade p/ mar (kg 1,4-DB eq)	0,00E+00	3,22E-10	0,00E+00	0,00E+00	5,40E-11
Radiação ionizante (kg U235 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo urbano (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo rural (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Transformação do solo (m <sup>2</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de água (m <sup>3</sup> )	1,14E+02	4,62E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,54E+00
Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	3,51E-03	7,56E-05	7,56E-05	1,00E-05	0,00E+00
Depleção de combustíveis fósseis (kg oil eq)	4,58E-01	9,22E-01	9,19E-01	1,03E-01	1,54E-01

Todos os resultados serão analisados na seção 6.

## 6. INTERPRETAÇÃO

### 6.1 Comparação

#### 6.1.1 Mudanças climáticas

A seguir é apresentado o gráfico comparativo para a categoria de impacto mudanças climáticas entre petrodiesel e biodiesel:

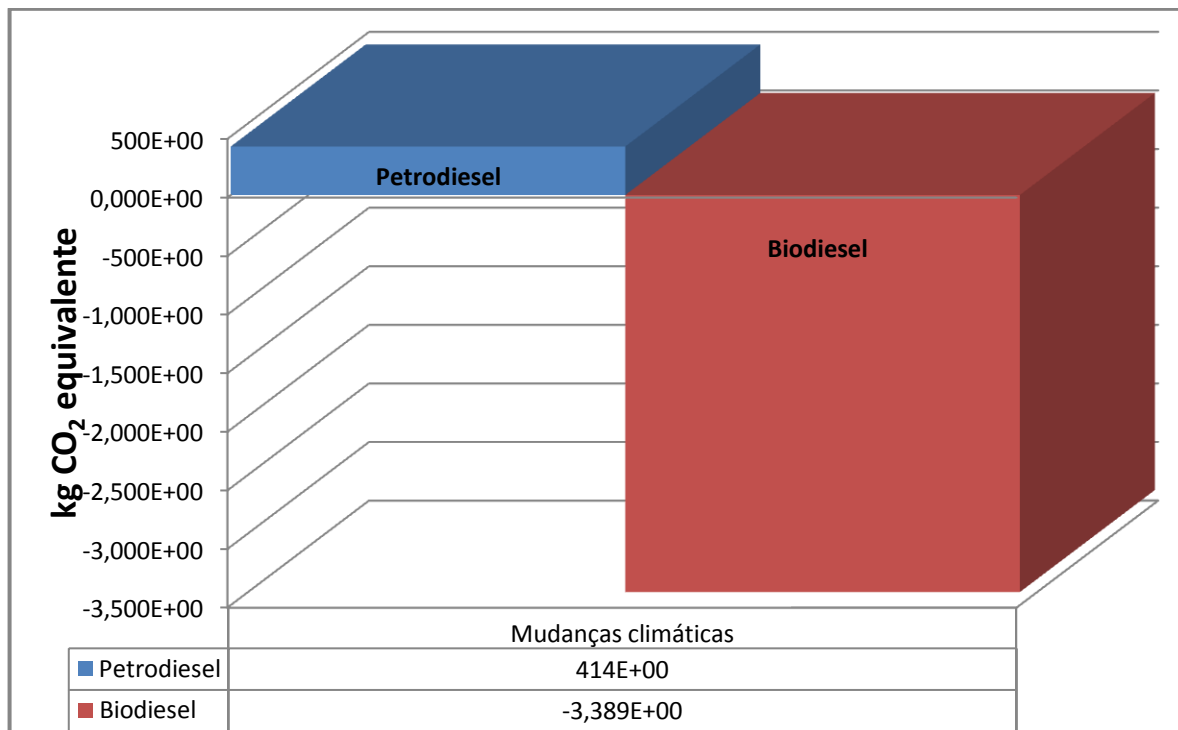


Figura 22. Gráfico comparativo da categoria de impacto “mudanças climáticas”

Quando se trata de mudanças climáticas, o biodiesel é muito melhor do que o petrodiesel, pois além de sequestrar toda a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente para sua produção, ainda consegue sequestrar mais 3388 kg adicionais, contribuindo positivamente para essa categoria de impacto, ou seja, mudando o atual cenário de aumento de temperaturas para um cenário mais ameno. O sequestro de CO<sub>2</sub> é feito tanto pela cana-de-açúcar quanto pelo dendezeiro. Ao contrário, o petrodiesel lança na atmosfera aproximadamente 414kg de CO<sub>2</sub> equivalente, primordialmente na etapa de extração. Isso se deve ao uso de equipamentos a combustão e também à queima de gás natural que é naturalmente encontrado junto às jazidas de petróleo e não pode ser totalmente descartado na atmosfera, uma vez que pode causar incêndios, intoxicações ou explosões <sup>(31)</sup>.



### 6.1.2 Depleção da Camada de Ozônio

O gráfico a seguir ilustra os resultados obtidos para a categoria de impacto:

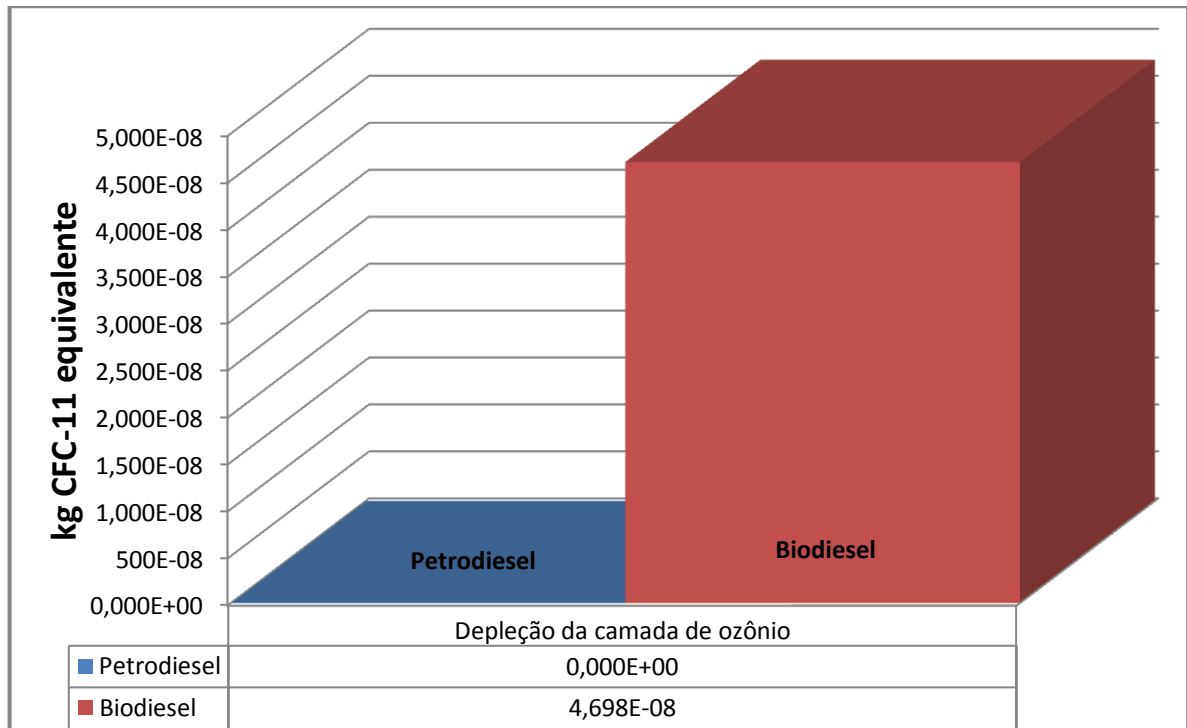


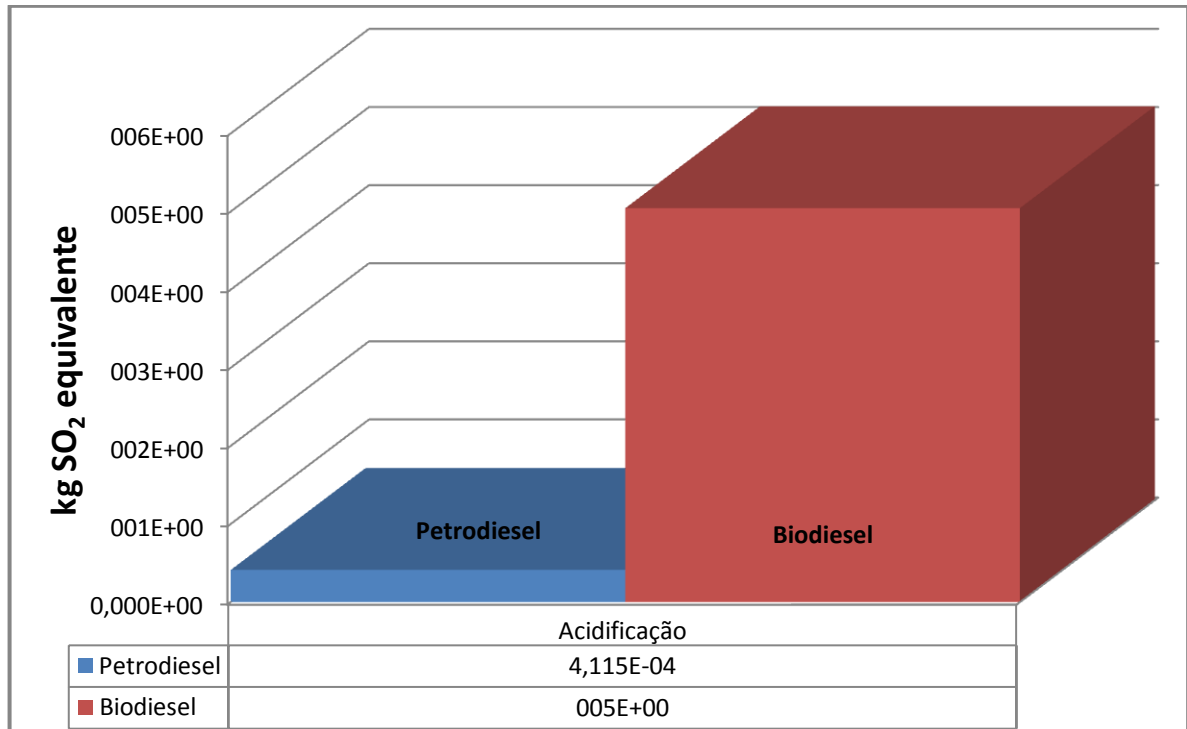
Figura 23. Gráfico comparativo da categoria de impacto “depleção da camada de ozônio”

Na depleção da camada de ozônio o Biodiesel causa mais impactos do que o petrodiesel. A contribuição para essa categoria vem do processo de produção do catalisador da reação de transesterificação, a soda cáustica. O sódio utilizado na produção provém primordialmente do sal NaCl por meio de reação de eletrólise. O problema reside no fato do outro produto de interesse da reação, o cloro molecular ( $\text{Cl}_2$ ) ser um dos responsáveis pelo impacto na camada de ozônio<sup>(32)</sup>. Em altas altitudes,  $\text{Cl}_2$  produzido na reação de eletrólise pode ser ionizado e iniciar as reações descritas no item 3.5.1 deste relatório.

Na produção de petrodiesel a partir das matérias-primas e fontes naturais analisadas não existe a formação de compostos clorados ou bromados, o que implica impacto zero para essa categoria.

### 6.1.3 Acidificação

O gráfico abaixo ilustra os resultados obtidos para a acidificação:



**Figura 24. Gráfico comparativo da categoria de impacto "Acidificação"**

Com relação a acidificação do solo, o biodiesel causa aproximadamente dez vezes mais impactos do que o petrodiesel, que tem sua contribuição praticamente resumida a etapa de transporte internacional. O transporte é feito por meio da queima de combustíveis, primordialmente diesel. Diesel contém enxofre como contaminante e a combustão de enxofre gera óxidos de enxofre que ocasionalmente podem formar chuva ácida.

O transporte também é o grande gerador de impacto para o biodiesel. No biodiesel temos o agravante de ter que transportar todas as matérias-primas do processo de produção do biodiesel, enquanto que no petrodiesel somente a parcela de petróleo importado entrava na análise de transporte, o que correspondia a uma parcela de apenas 11,87% do total. A parcela de petróleo nacional, muito maior, não precisava ser transportada por longas distâncias e nem por um modal de grandes emissões de enxofre, como o modal rodoviário<sup>(33)</sup>.

Além disso, uma boa parte do impacto, cerca de 50%, ocorre no processo de produção da soda cáustica. Esse processo resulta em formação de tanto óxidos de enxofre quanto óxidos de nitrogênio que podem reagir com vapor d'água da atmosfera e retornar ao solo em forma de chuva ácida.

#### 6.1.4 Eutrofização

O gráfico abaixo ilustra os resultados obtidos para a eutrofização P e N:

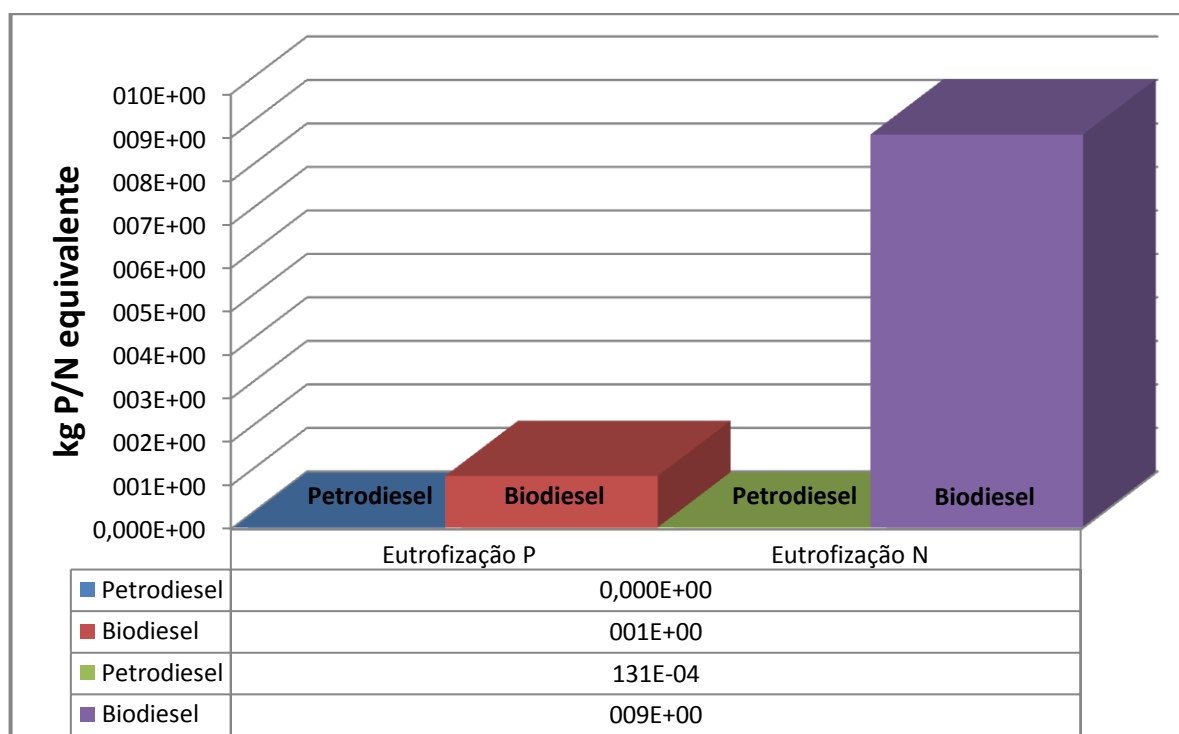


Figura 25. Gráfico comparativo da categoria de impacto “eutrofização”

Nota-se pelo gráfico que o biodiesel é pior do que o petrodiesel tanto para a eutrofização por fonte de nitrogênio quanto para eutrofização por fonte de fósforo.

Analisando a eutrofização por fósforo, vê-se que essa é causada nas etapas que envolvem as plantações vegetais de cana-de-açúcar e dendê. Isso se deve ao uso de fertilizantes, normalmente baseados em alguma fórmula NPK (nitrogênio-fósforo-potássio) para facilitar o crescimento das plantas. Nem todo o fertilizante é efetivamente consumido pela planta, podendo essa fonte de fósforo entrar no lençol freático ou atingir um curso d’água, resultando na eutrofização de rios e lagos. O petrodiesel não tem contribuições de fósforo, pois não utiliza esse elemento em nenhuma de suas etapas de obtenção.

Já na análise de eutrofização por nitrogênio, nota-se também as etapas agrícolas com grande importância, pelo mesmo motivo do fósforo, já que o nitrogênio também faz parte desses fertilizantes. Acrescenta-se também uma contribuição relacionada ao processo de produção do óleo de dendê. Isso se deve aos subprodutos que são gerados, as cascas e rejeitos que serão queimadas ou desprezadas e que contém nitrogênio em boa quantidade.

O petrodiesel tem uma pequena contribuição para a eutrofização via nitrogênio. O principal processo que contribui para isso é a produção de energia, já que no Brasil utilizamos primordialmente a energia elétrica via hidrelétricas, desviando rios e criando represas.

### 6.1.5 Toxicidade

O gráfico a seguir ilustra os resultados para a toxicidade humana, para o solo, para a água e para o mar:

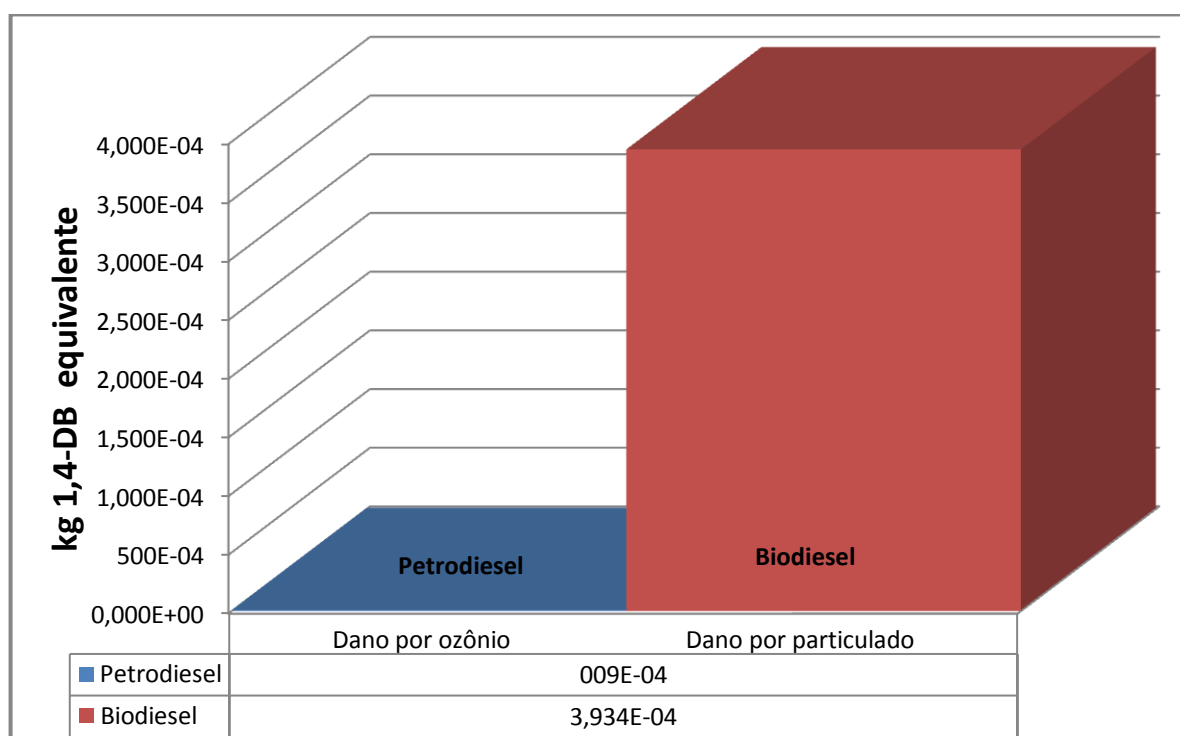


Figura 26. Gráfico comparativo da categoria de impacto "Toxicidade"

A fim de avaliar os resultados dessa categoria, as diversas toxicidades foram incluídas em um único indicador global. Cabe a ressalva de que para efeito prático a toxicidade para o homem estava ordens de grandeza maior do que as outras.

O gráfico aponta uma toxicidade muito maior do biodiesel do que de petrodiesel. Isso é explicado pelos pesticidas utilizados nas etapas agrícolas. Na ferramenta que utilizamos, o SimaPro, não é possível dar entradas individuais de pesticidas, sendo o cálculo feito a partir de um pesticida genérico. Isso não desqualifica o resultado, uma vez que o banco de dados é atual e tanto o dendezeiro como a cana-de-açúcar utilizam uma série de pesticidas e não um único, o que estatisticamente colabora para o princípio do pesticida genérico.

O impacto do petrodiesel nessa categoria resume-se a etapa de refino em que são produzidas algumas substâncias mais perigosas, como por exemplo o benzeno.

### 6.1.6 Dano à saúde humana por particulados e ozônio

O gráfico abaixo ilustra os resultados obtidos para a categoria dano à saúde humana por ozônio e por particulado.

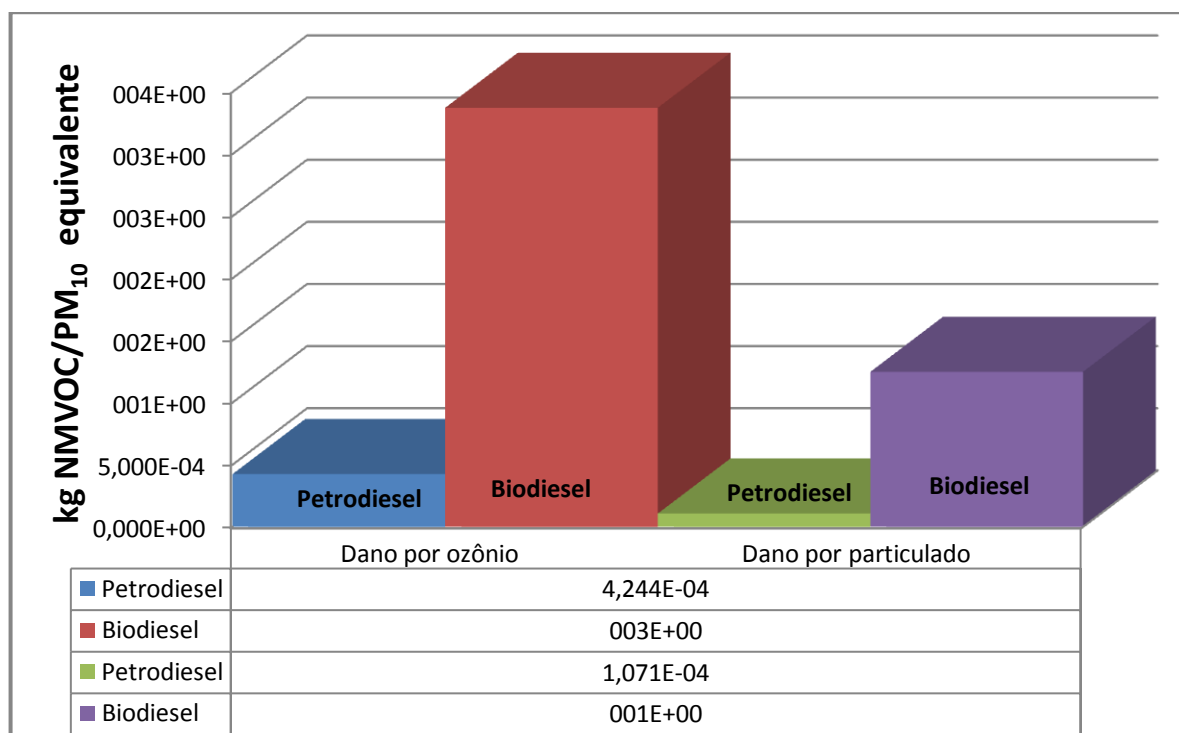


Figura 27. Gráfico comparativo da categoria "Dano por ozônio e dano por particulado".

O biodiesel causa mais impacto tanto em relação à formação de particulados, quanto em relação a agentes potencialmente formadores de ozônio.

Quanto à distribuição entre as unidades de processo de formadores de particulados, para o biodiesel praticamente todas as unidades tem uma contribuição significativa, mas destaca-se a produção da soda. Em relação ao petróleo, o impacto resume-se mais à etapa de transporte do petróleo importado.

Já em relação à formação de compostos com potencial de formação de ozônio em baixas altitudes, destaca-se mais uma vez para o biodiesel o processo de fabricação da soda, responsável pela formação de compostos orgânicos voláteis sem metano potencialmente perigosos. O petrodiesel tem uma contribuição

aproximadamente sete vezes menor, mais uma vez concentrada na etapa de transporte do petróleo internacional.

### 6.1.7 Radiação ionizante

Nenhum dos dois produtos testados é composto por substâncias capazes de emitir radiação ionizante. Assim, essa categoria não é adequada para a análise comparativa entre o petrodiesel e o biodiesel.

### 6.1.8 Impactos no uso e do solo

O gráfico abaixo ilustra os resultados obtidos para o impacto uso do solo. Lembrando que as contribuições de uso do solo urbano foram consideradas iguais para os dois produtos, o único impacto considerado foi o uso do solo rural.

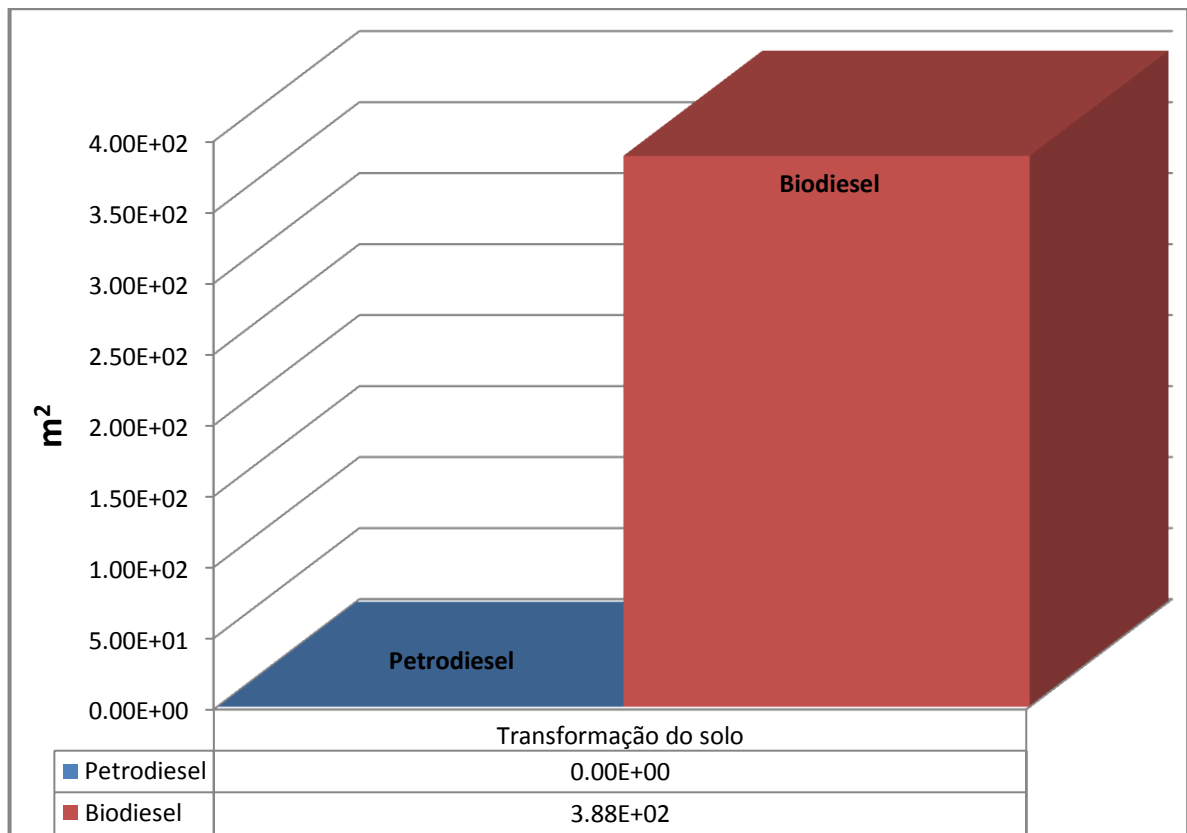


Figura 28. Gráfico comparativo da categoria "Transformação do solo"

Como não existe ocupação rural para a produção do petrodiesel, mas existe para a produção de biodiesel nas etapas agrícolas de produção de dendê e cana-de-açúcar, o biodiesel é bem mais impactante para essa categoria de impacto.

### 6.1.9 Depleção da água

O gráfico a seguir ilustra os resultados para a depleção da água:

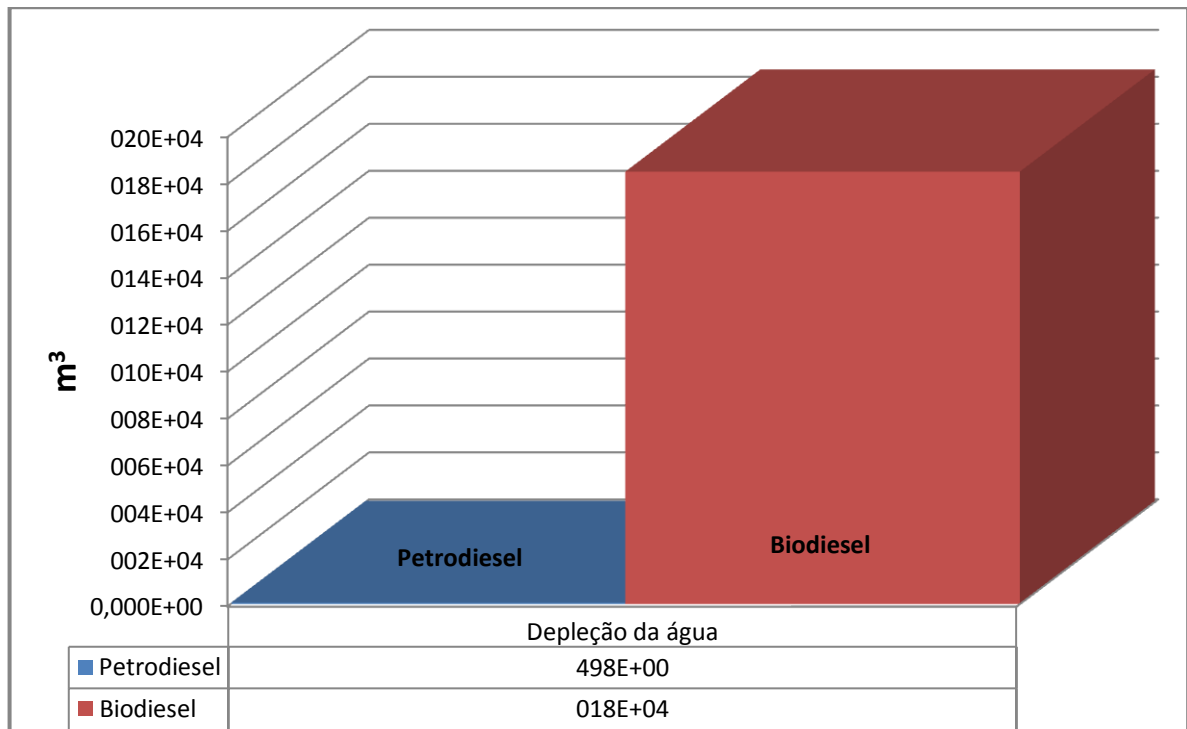


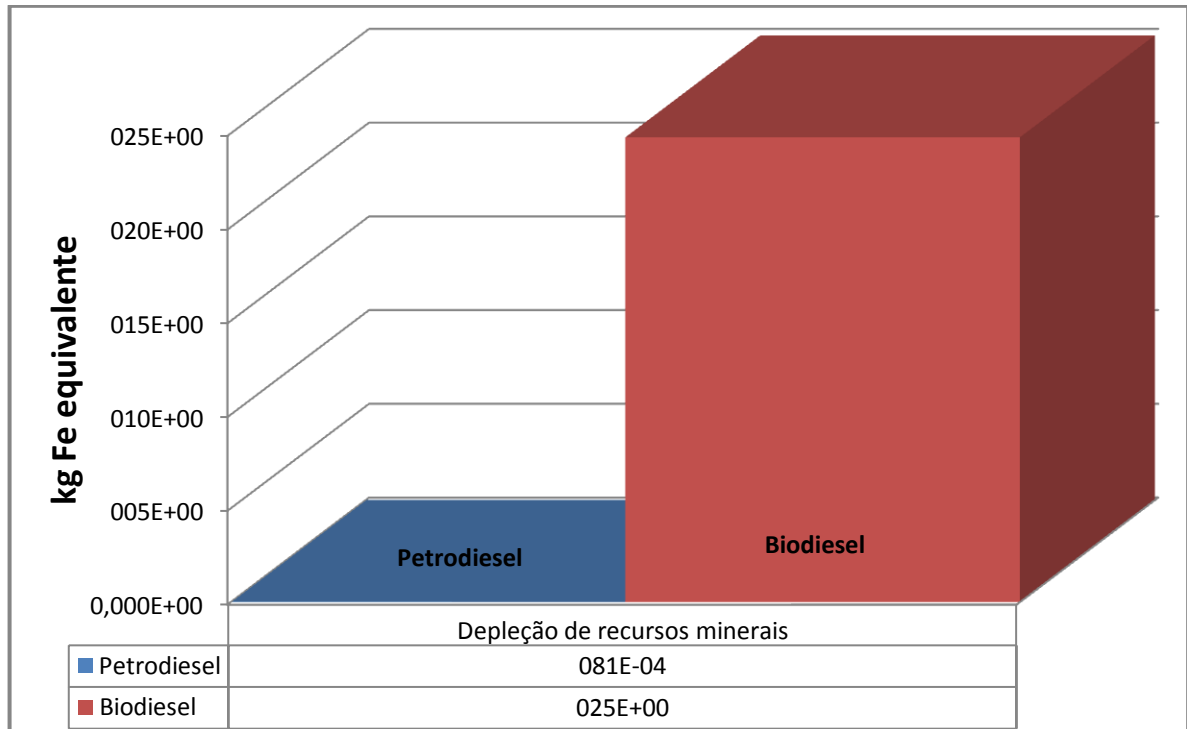
Figura 29. Gráfico comparativo da categoria "Depleção da água"

No quesito depleção da água, o biodiesel é muito mais impactante. Explica-se isso pelas etapas agrícolas que necessitam de muita água para que a planta cresça adequadamente, principalmente a planta de cana-de-açúcar. O dendezeiro é plantado do norte do Brasil, região com muitas chuvas, ou seja, há menor necessidade de irrigação. Além disso, atribui-se um valor também impactante para a produção de energia elétrica, esta no Brasil primordialmente de hidrelétricas.

Quanto ao petrodiesel, o impacto na categoria resume-se à etapa de extração do petróleo, onde é utilizada água para inundar o poço e facilitar a retirada de petróleo.

### 6.1.10 Depleção de recursos minerais

O gráfico abaixo apresenta os resultados para a depleção de metais.



**Figura 30. Gráfico comparativo da categoria "Depleção de recursos minerais"**

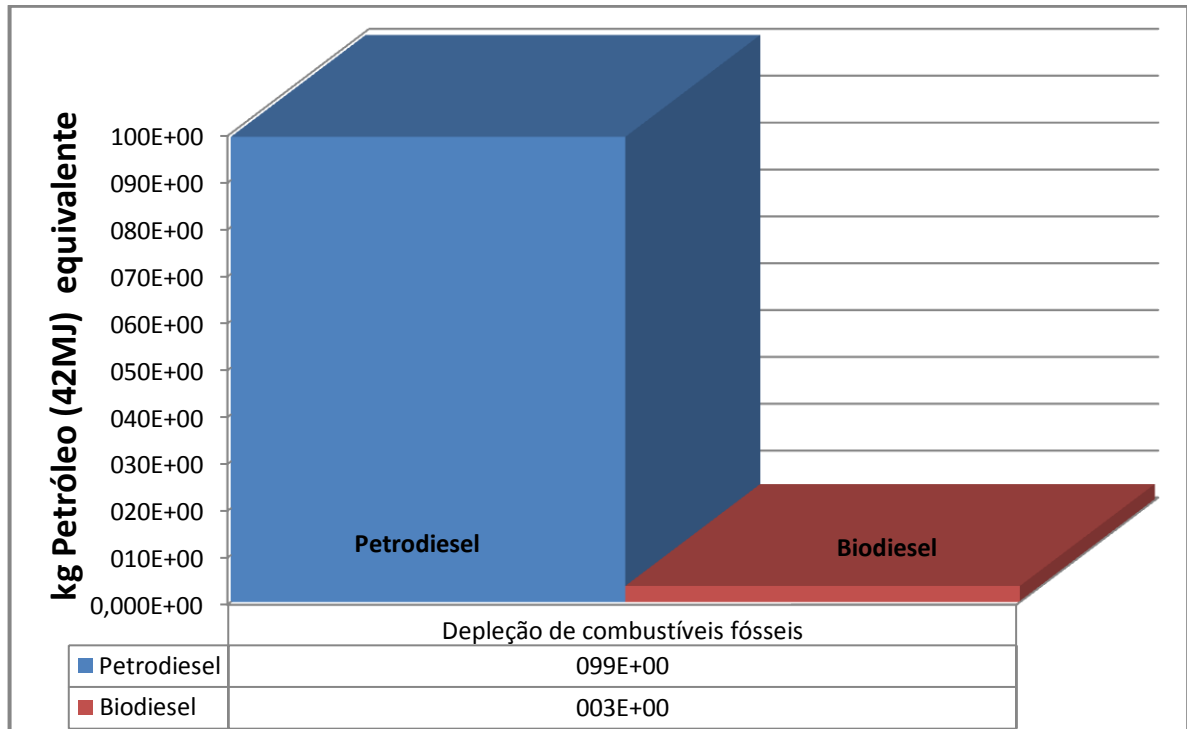
Mais uma vez o biodiesel é mais impactante do que o petrodiesel. Cada unidade de processo do biodiesel tem uma contribuição para a categoria, com destaque para a etapa de produção do dendê, que necessita de acréscimo de manganês, magnésio e zinco para correção dos solos em que é plantado.

Quanto ao petrodiesel, a única unidade de processo com mais impacto é a extração, o que pode estar relacionado com o uso de ferro para reparo das tubulações e o uso de alguns combustíveis renováveis (que usam minerais para correção do solo) para geração de energia.

#### 6.1.11 Depleção de combustíveis fósseis

O gráfico a seguir ilustra os resultados para a depleção fóssil.





**Figura 31. Gráfico comparativo da categoria "Depleção de combustíveis fósseis"**

Nessa categoria de impacto o petrodiesel é muito mais impactante, afinal fundamentalmente o petrodiesel é um combustível fóssil.

Quanto ao biodiesel, o impacto nessa categoria resume-se às etapas de transporte que utilizam óleo diesel.

## 6.2 Normalização e ponderação

Normalização é uma etapa opcional na análise do ciclo de vida de um produto. Ela serve para assessorar na interpretação dos resultados, ajudando a elaborar um indicador baseado em cada uma das categorias de impacto.

O método de normalização implica na multiplicação dos valores obtidos para as diversas categorias de impacto por um fator de normalização, baseado nas contribuições globais para aquela categoria de impacto, gerando uma unidade global para as categorias: o ano/kg produto. Apesar de não ter significado físico, essa unidade deixa todas as categorias iguais.

Neste trabalho foi utilizada a tabela de normalização baseado no método ReCiPe midpoint world<sup>(30)</sup>, apresentada a seguir:

**Tabela 24. Fatores de normalização para cada categoria de impacto <sup>(30)</sup>.**

Categoria de impacto	Fator de normalização
----------------------	-----------------------

Mudanças climáticas	1,81E-04
Depleção da camada de ozônio	2,66E+01
Acidificação	2,37E-02
Eutrofização P	3,45E+00
Eutrofização N	1,36E-01
Toxicidade p/ homem	6,89E-04
Dano à saúde humana por ozônio	1,76E-02
Dano à saúde humana por material particulado	7,11E-02
Toxicidade p/ solo	1,23E-01
Toxicidade p/ água	2,20E-01
Toxicidade p/ mar	1,48E-03
Radiação ionizante	7,59E-04
Uso do solo urbano	1,84E-04
Uso do solo rural	1,29E-03
Transformação do solo	8,31E-02
Depleção de água	0,00E+00
Depleção de recursos minerais	2,25E-03
Depleção de combustíveis fósseis	7,76E-04

Após a normalização é interessante acrescentar pesos às categorias. Essa etapa é subjetiva, uma vez que cada indivíduo tem uma percepção de importância para cada uma das categorias.

Para encontrar os pesos das categorias de impactos, fizemos uma média da percepção de importância entre os dois componentes do grupo, obtendo os pesos apresentados abaixo.

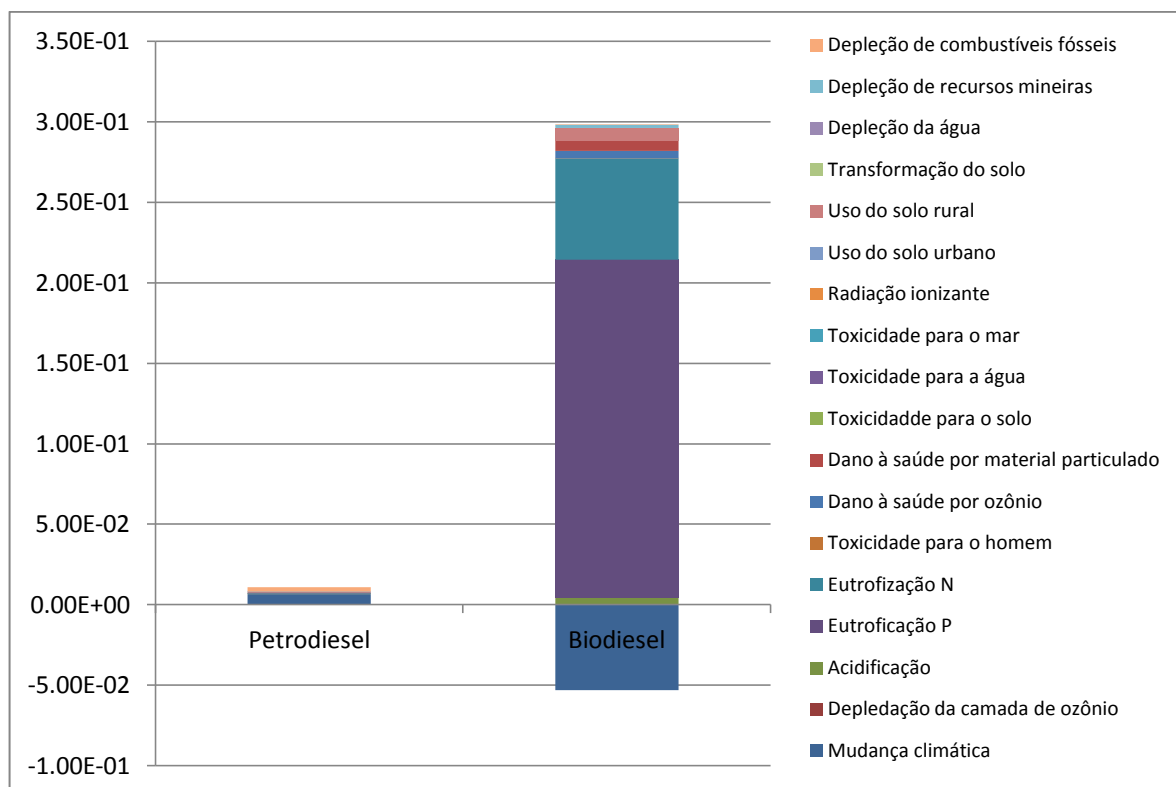
**Tabela 25. Pesos para cada categoria de impacto.**

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Pesos (0-100)</b>	<b>Porcentagem de importância</b>
Mudanças climáticas	85	8.67%
Depleção da camada de ozônio	40	4.08%
Acidificação	35	3.57%
Eutrofização P	50	5.10%
Eutrofização N	50	5.10%
Toxicidade p/ homem	80	8.16%
Dano a saúde humana por ozônio	75	7.65%
Dano a saúde humana por material particulado	75	7.65%
Toxicidade p/ solo	80	8.16%
Toxicidade p/ água	80	8.16%
Toxicidade p/ mar	80	8.16%
Radiação ionizante	90	9.18%
Uso do solo urbano	15	1.53%
Uso do solo rural	15	1.53%
Transformação do solo	15	1.53%
Depleção de água	45	4.59%
Depleção de recursos minerais	35	3.57%

E dessa forma obtivemos os seguintes resultados normalizados e ponderados:

**Tabela 26. Resultados normalizados e ponderados.**

<b>Categoria de impacto (ano/kg de produto)</b>	<b>Petrodiesel normalizado</b>	<b>Biodiesel normalizado</b>	<b>Petrodiesel ponderado</b>	<b>Biodiesel ponderado</b>
Mudanças climáticas	7,50E-02	-6,13E-01	6,50E-03	-5,32E-02
Depleção da camada de ozônio	0,00E+00	1,25E-03	0,00E+00	5,10E-05
Acidificação	9,75E-03	1,20E-01	3,48E-04	4,27E-03
Eutrofização P	0,00E+00	4,12E+00	0,00E+00	2,10E-01
Eutrofização N	1,78E-03	1,23E+00	9,11E-05	6,28E-02
Toxicidade p/ homem	6,09E-07	2,70E-04	4,97E-08	2,21E-05
Dano a saúde humana por ozônio	7,47E-03	5,94E-02	5,72E-04	4,54E-03
Dano a saúde humana por material particulado	7,61E-03	8,87E-02	5,83E-04	6,79E-03
Toxicidade p/ solo	4,55E-08	8,44E-05	3,71E-09	6,89E-06
Toxicidade p/ água	2,56E-08	2,87E-05	2,09E-09	2,34E-06
Toxicidade p/ mar	5,13E-11	1,38E-07	4,19E-12	1,13E08
Radiação ionizante	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo urbano	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uso do solo rural	0,00E+00	5,01E-01	0,00E+00	7,66E-03
Transformação do solo	0,00E+00	3,22E+01	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de água	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de recursos minerais	1,83E-05	5,58E-02	6,54E-07	1,99E-03
Depleção de combustíveis fósseis	7,70E-02	2,67E-03	2,75E-03	9,52E-05
<b>TOTAL (indicador único)</b>	-	-	<b>1,08E-02</b>	<b>2,45E-01</b>



**Figura 32. Gráfico com os resultados ponderados.**

Analisando os indicadores únicos obtidos após a ponderação, 0,012 ano/kg de petrodiesel e 0,245 ano/kg de biodiesel, pode-se dizer que os impactos ambientais causados durante o ciclo de vida do biodiesel são cerca de vinte vezes maiores que os impactos causados durante o ciclo de vida do petrodiesel (no escopo definido na análise, ou seja, não considerando o uso e disposição final).

Os resultados fazem sentido, uma vez que o impacto do biodiesel foi maior em 8 das 11 categorias analisadas. O processo de produção do biodiesel tem dois grandes vilões que impactam sensivelmente nas estatísticas: a produção da soda cáustica, um processo que libera componentes clorados, óxidos de nitrogênio e enxofre para a atmosfera e o uso de fertilizantes e defensivos nas etapas agrícolas, compostos por vezes tóxicos e que causam eutrofização.

Quanto ao petrodiesel, somente duas categorias sofrem impacto significativo: a categoria de mudanças climáticas, explicada pelas etapas de transporte e extração, em que combustíveis fósseis são queimados, formando gases do efeito estufa (principalmente CO<sub>2</sub>) e a categoria de depleção de combustíveis fósseis, uma vez que o petrodiesel é uma fração do petróleo, um combustível fóssil por definição.

## 7. Conclusão

Nas condições atuais de produção, o biodiesel ainda é ambientalmente uma opção menos favorável do que o petrodiesel. Muitas vezes analisa-se somente o fator relacionado com as mudanças climáticas, em que o biodiesel é realmente muito melhor do que o petrodiesel, porém avaliando todos os outros impactos observa-se uma grande deficiência ambiental do biodiesel.

É uma comparação até um pouco desleal, em que o petrodiesel só necessita de uma separação para ser produzido e o biodiesel necessita de todas as etapas de produção de suas matérias-primas e suas transformações.

Ficou claro também que o biodiesel tem muito potencial para melhorar seu processo de produção, utilizando outro catalisador, por exemplo. O petrodiesel é a alternativa atual, porém estimativas apontam o esgotamento das fontes de petróleo Brasileiro em 40 anos <sup>(34)</sup>, o que indica a necessidade de se investir em alternativas a esse recurso natural.

A etapa agrícola de produção do biodiesel também deve ser melhorada, com a substituição dos pesticidas tóxicos atuais. É importante também evitar a eutrofização, utilizando menos adubação ou evitando que esses adubos atinjam cursos d'água e o lençol freático.

Consideramos como etapas de um futuro estudo a avaliação do uso e disposição finais desses materiais, além da avaliação do impacto da produção de biodiesel a partir de outro catalisador, como por exemplo, KOH, ácido sulfúrico e fluídos supercríticos<sup>(35)</sup>.

## 8. REFERÊNCIAS

- (1) Braga, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2 ed. São Paulo, Prentice Hall, 2005.
- (2) <http://fernandoazevedo2010.blogspot.com.br/> Acesso em: 30 nov. 2013
- (3) Vianna, F. C. **Análise de Ecoeficiência: Avaliação do Desempenho Econômico-Ambiental do Biodiesel e petrodiesel**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2006.
- (4) CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos**. Ferramenta gerencial da ISO14000. 1998.
- (5) <http://www.qualidadeemquadrinhos.com.br/blog/> Acesso em: 1 Jun. 2014
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2001.
- (7) Lima, A. M. F. **Avaliação de Ciclo de vida no Brasil**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.
- (8) Oliveira, M. C. F. R. **Estudo comparativo de tintas utilizando a análise do ciclo de vida**. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2006.
- (9) UNICENP, Universidade Positivo. **Curso de formação de operadores re refinaria: Processos de refino**. Disponível em: <[http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/petrobras/processos\\_de\\_refino.pdf](http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/petrobras/processos_de_refino.pdf)> Acesso em: 02 ago. 2014.
- (10) CAS, Chemical Abstracts Service. Disponível em: <<http://www.cas.org>> Acesso em: 9 jul. 2014
- (11) Mourad, A.L., **Considerações econômicas e técnicas sobre o uso de óleos vegetais combustíveis como substituto do óleo diesel**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000100041&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100041&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 29 jul. 2014.
- (12) BIT, Banco de informações e mapas de transportes. **Transporte Rodoviário do Brasil**. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/02-rodo/rodo.html>>. Acesso em: 9 jul. 2014.
- (13) MEE, Ministério de Minas e energia. Acesso à informação: **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/biodiesel/perguntas.html>> Acesso em: 9 jul. 2014
- (14) ISAE – FGV, **Projeto Potencialidades Regionais Estudo de viabilidade econômica do dendê**, São Paulo, 2005.

- (15) Macedo, I. C.; Nogueira, L. A.H. **Avaliação do biodiesel no Brasil** - revisado. CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2004.
- (16) <http://blogdocaminhoneiro.com/> Acesso em: 20 jun. 2014
- (17) desempenho biodiesel Acesso em: 20 jun. 2014
- (18) <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2 - BEN - Ano Base/1 - BEN Portugues - Inglxs - Completo.pdf> Acesso em: 26 jul. 2014
- (19) ANP, Agência nacional do Petróleo. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2013**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 26 jul. 2014.
- (20) PETROBRÁS, Bacia do Espírito Santo. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-do-espírito-santo.htm>> Acesso em: 26 jul. 2014.
- (21) <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/> Acesso em: 27 jul. 2014
- (22) GABI 4. The software system for Life Cycle Engineering: PE Europe GMBH Life Cycle Engineering. BR Crude oil mix (1995). Stuttgart, 2004.
- (23) Silva, O.C. **Análise do aproveitamento econômico e energético do óleo de palma na Guiné-Bissau na perspectiva do desenvolvimento sustentável**. Dissertação – Programa Interunidades em Energia. EP/IEE/FEA/IF USP. 192p. São Paulo, 1997.
- (24) PRé Consultants. ETH – Archive 1994. **Truck 16ton**. SimaPro. Versão 5.1. 2003.
- (25) PRé Consultants. Idemat 2001. **Energy Oil I**. SimaPro. Versão 5.1. 2003.
- (26) YUSSOF, S.; HANSEN, S. B. **Feasibility Study of Performing an Life Cycle Assessment on Crude Palm Oil Production in Malaysia**. International Journal of Life Cycle Assessment. LCA Case studies. Online First: Agosto de 2005. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1065%2F1ca2005.08.226>>. Acesso em: 30 de jul. de 2014.
- (27) SILVA, O. C. et al. **Potencial de mitigação de gases estufa pela indústria de óleo de palma visando a captação de recursos do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2000, Campinas.
- (28) PRé Consultants. Idemat 2001. **Barge I**. SimaPro. Versão 5.1. 2003.
- (29) SIMAPRO. World's Leading LCA Software: PRé Consultants. Versão 7.3.3.
- (30) GOEDKOOPE, M. et al. **ReCiPe 2008**: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Netherlands, May 2013. Disponível em: <http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet>. Acesso em : 27 jul. 2014.

- (31) [http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/ciencia-e-saude/2013/05/25/interna\\_ciencia\\_saude,367936/residuos-da-pedra-sabao-viram-materia-prima-para-outros-produtos.shtml](http://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/ciencia-e-saude/2013/05/25/interna_ciencia_saude,367936/residuos-da-pedra-sabao-viram-materia-prima-para-outros-produtos.shtml) Acesso em: 27 jul. 2014.
- (32) <http://www.brasile scola.com/biologia/mare-vermelha.htm> Acesso em: 27 jul. 2014.
- (31) PETROBRÁS. **Queima de gás: respostas à folha**. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspetrobras.com.br/2010/08/11/queima-de-gas-respostas-a-folha-de-sao-paulo/>> Acesso em: 01 ago. 2014.
- (32) ANDRADE, J.E. P, ZAPORSKI, J. **A indústria de Cloro-Soda**. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev209.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev209.pdf)> Acesso: 1 ago. 2014
- (33) MMA, Ministério do meio ambiente. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf)> Acesso em: 01 ago. 2014.
- (34) LOBÃO, E. Ministro de minas e energia. Entrevista à revista Em Discussão. Disponível em: < <http://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/revista-em-discussao-edicao-abril-2010/noticias/reservas-atuais-de-petroleo-devem-se-esgotar-em-40-anos-p4.aspx>> Acesso: 3 ago. 2014.
- (35) MARCHETTI, J. M.; MIGUEL, V. U.; ERRAZU, A. F. **Possible methods for biodiesel production**. Elsevier, Argentina, 2005.