



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

Análise do Ciclo de Vida (ACV) do Gasóleo versus Biodiesel de *Jatropha*

Autor:

José Gui Naldo Muchanga

Supervisor:

Prof. Dr. Eng^o. Jorge Nhambiu

Co-supervisora:

Eng^a. Isaura Tobela, Msc

Maputo, Agosto de 2025

José Gui Naldo Muchanga

Análise do Ciclo de Vida (ACV) do Gasóleo versus Biodiesel de Jatropha

Monografia elaborada como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica – entregue a Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

Orientada por:

Prof. Dr. Eng^o. Jorge Nhambiu

(Supervisor)

Eng^a. Isaura Tobela, Msc

(Co-supervisora)

FENG – UEM

Maputo, Agosto de 2025



Análise do Ciclo de Vida (ACV) do Gasóleo versus Biodiesel de
Jatropha.

José Gui Naldo Muchanga



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

Termo de Entrega de Relatório do Trabalho de Licenciatura

Declaro que o estudante, **José Gui Naldo Muchanga** entregou no dia ____ de Agosto de 2025 as ____ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____, intitulado: **Análise do Ciclo de Vida (ACV) do Gasóleo versus Biodiesel de *Jatropha*.**

Maputo, ____ de Agosto de 2025

O/A chefe de Secretaria

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Naldo António Muchanga e Alzira Lucas Cossa pelo incentivo, suporte e sacrifício para que pudesse obter o grau de licenciatura.

AGRADECIMENTOS

Obrigado,

Aos meus pais, Naldo António Muchanga e Alzira Lucas Cossa pela confiança, suporte e compreensão.

Aos meus irmãos Lina Muchanga e Naldo Júnior, minha sobrinha Kimberly Dima e minha parceira Lúcia Munguambe, pela motivação e esperança.

Aos meus colegas France Muchanga (também meu tio) e José Nhacutove, pela parceria e suporte nesta jornada académica.

Ao Professor Jorge Nhambiu pela grande disposição e suporte na realização deste trabalho e pelo excelente acompanhamento que levou à conclusão desta monografia.

À Engenheira Isaura Tobela, pelo apoio na condução do estudo realizado neste trabalho.

MUITO OBRIGADO por tudo!

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **José Gui Naldo Muchanga**, declaro por minha honra que a presente monografia é exclusivamente de minha autoria, não constituindo cópia de nenhum trabalho realizado anteriormente e as fontes usadas para a realização do trabalho encontram-se referidas na bibliografia.

José Gui Naldo Muchanga

Resumo

O presente trabalho é referente a comparação dos impactos ambientais de um motor de combustão interna utilizando gasóleo versus biodiesel de *jatropha*, através da análise de ciclo de vida dos dois combustíveis.

O escopo da análise dos ciclos de vida foi definido através da bordagem “do berço ao túmulo”, onde foram consideradas as etapas de extracção de matéria prima, processamento ou produção dos combustíveis, transporte para o abastecimento e a queima ou utilização no motor. Foi adoptada a unidade funcional de 1000 km percorridos por um veículo movido por um motor do ciclo Diesel, para tornar a comparação justa.

Os dados utilizados para compor o inventário foram maioritariamente retirados do programa computacional *SimaPro* v.9.6.0.1 e outros foram obtidos através de referências bibliográficas, os quais são chamados de dados secundários.

A comparação dos sistemas de produto (motor utilizando gasóleo e motor utilizando biodiesel de *jatropha*) foi feita no programa computacional *SimaPro* v.9.6.0.1 utilizando o método *ReCipe* na versão de actualização 2016. Foram utilizadas as duas abordagens do método escolhido: *ReCipe midpoint* e *ReCipe endpoint*. Com a abordagem *ReCipe endpoint* foi possível escolher as categorias de impacto mais relevantes para a análise comparativa e com a abordagem *ReCipe midpoint* foi feita a análise dos impactos e a comparação dos dois sistemas de produto.

Através da atribuição de pesos ou pontuações às categorias de impacto, observou-se que, no geral, a utilização do biodiesel de *jatropha* gera menos impactos ao ambiente. Este resultado é interessante para o contexto moçambicano, visto que, pode motivar a aposta neste combustível, como alternativa para os combustíveis fósseis.

Para complementar este estudo, foi feita uma comparação económica, tendo em conta o custo por unidade de energia útil de cada combustível. O biodiesel de *jatropha* apresentou maior custo, o que revela ser um desafio que necessita de estudos mais aprofundados de modo a avaliar a viabilidade económica da aposta neste combustível.

Palavras-chave: Combustível, biodiesel, ACV, ambiente.

Abstract

This study compares the environmental impacts of an internal combustion engine using diesel versus jatropha biodiesel, analyzing the life cycle of both fuels.

The scope of the life cycle analysis was defined using a "cradle-to-grave" approach, which considered the stages of raw material extraction, fuel processing or production, transportation for refueling, and combustion or use in the engine. The functional unit of 1,000 km travelled by a vehicle powered by a diesel engine was adopted to ensure a fair comparison.

The data used to compose the inventory were primarily sourced from the SimaPro v.9.6.0.1 software, while others were obtained through bibliographic references, which are considered secondary data.

The comparison of the product systems (diesel engine and jatropha biodiesel engine) was performed using the SimaPro v.9.6.0.1 software program, employing the ReCipe method in the 2016 update version. The two approaches of the chosen method were used: ReCipe midpoint and ReCipe endpoint. With the ReCipe endpoint approach, it was possible to select the most relevant impact categories for the comparative analysis, and with the ReCipe midpoint approach, the impact analysis and comparison of the two product systems were performed.

By assigning scores to the impact categories, it was observed that, overall, the use of jatropha biodiesel generates fewer environmental impacts. This result is interesting for the Mozambican context, as it may motivate investment in this fuel as an alternative to fossil fuels.

To complement this study, an economic comparison was made, taking into account the cost per unit of useful energy for each fuel. Jatropha biodiesel was found to be more expensive, revealing a challenge that requires further study to assess the economic viability of investing in this fuel.

Keywords: Fuel, biodiesel, LCA, environment.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Objectivos	3
1.2.1 Geral	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Metodologia de pesquisa	4
1.5 Estrutura do trabalho.....	4
CAPÍTULO II.....	5
2 ESTUDO DO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Fundamentos da ACV	5
2.1.1 Conceitos	5
2.1.2 ACV e as normas ISO.....	6
2.1.3 Elementos fundamentais da ACV.....	6
2.1.4 Fases da análise de ciclo de vida	7
2.2 Biocombustíveis e Sustentabilidade.....	8
2.2.1 Classificação dos biocombustíveis.....	9
2.3 Biodiesel de <i>jatropha</i>	9
2.3.1 Características agronómicas.....	9
2.3.2 Produção do biodiesel de <i>jatropha</i>	10
2.3.3 Rendimento energético	11
2.4 Gasóleo.....	11
2.4.1 Produção do gasóleo	11
2.4.2 Impactos do uso do gasóleo	12

2.5	Gasóleo versus biodiesel usando a técnica de ACV	12
2.5.1	Limitações da literatura	13
CAPÍTULO III.....	14	
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	14	
3.1	Delimitação da abordagem geral	14
3.2	Definição do objectivo e escopo.....	14
3.2.1	Objectivo do estudo	14
3.2.2	Escopo do estudo	15
3.3	Análise de inventário	20
3.3.1	<i>Software</i> e Base de dados	20
3.3.2	Modelagem	20
3.3.3	Balanço de CO ₂	22
3.4	Método de avaliação de impacto.....	23
3.4.1	Modelos matemáticos	26
CAPÍTULO IV.....	38	
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38	
4.1	Relevância dos resultados.....	38
4.1.1	Saúde humana.....	38
4.1.2	Biodiversidade.....	40
4.1.3	Escassez de recursos esgotáveis.....	41
4.2	Análise comparativa	42
4.3	Normalização e ponderação.....	46
CAPÍTULO V.....	49	
5 ANÁLISE ECONÓMICA.....	49	
5.1	Objectivo da Análise Económica.....	49
5.2	Metodologia da avaliação económica.....	49

5.3	Estimativa de custo dos combustíveis.....	49
5.4	Cálculo da energia útil por litro.....	51
5.5	Custo por unidade útil de energia.....	52
5.6	Resultados da análise económica.....	52
CAPÍTULO VI.....		53
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		53
6.1	Conclusões.....	53
6.2	Recomendações.....	54
7 REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA.....		56
7.1	Referências.....	56
7.2	Bibliografia.....	58
APÊNDICE A - Análise de Inventário.....		I
APÊNDICE B – Resultados.....		XIII
APÊNDICE C – Árvores de impacto.....		XXI
ANEXO A – Avaliação de biocombustíveis em Moçambique.....		XXIII
ANEXO B – Condições de cultivo da <i>jatropha</i> em Moçambique.....		XXIV
ANEXO C – Comparação entre as propriedades do óleo de <i>jatropha</i> , biodiesel de <i>jatropha</i> e gasóleo.....		XXV

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Ciclo de vida de um produto.....	5
Figura 2: Avaliação de impacto de ciclo de vida.	8
Figura 3: (a) jatropha curcas, (b) sementes da jatropha curcas.	10
Figura 4: Reacção de transesterificação com metanol e com catalisador básico.....	10
Figura 5: Obtenção do gasóleo	12
Figura 6: Esquema do ciclo de vida do gasóleo.	17
Figura 7: Esquema do ciclo de vida do biodiesel de Jatropha.....	19
Figura 8: Definição de produto ou processo no SimaPro.	21
Figura 9: Inserção das entradas no SimaPro.	21
Figura 10: Inserção das saídas no SimaPro.....	22
Figura 11:Representação esquemática de um mecanismo ambiental subjacente à modelagem Avaliação de Impactos.	23
Figura 12: Categorias de avaliação de impacto.....	24
Figura 13: Esquema geral das três fases do uso de terra.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das rotas metilica e etilica..	10
Tabela 2: Resumo do escopo.	15
Tabela 3: Categorias de impacto..	25
Tabela 4: Estimativa de custos de cada etapa do ciclo de vida do biodiesel de jatropha. .	50
Tabela 5: Resultados da análise económica	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultados dos danos à saúde humana.	39
Gráfico 2: Resultados dos danos ao ecossistema.....	40
Gráfico 3: Resultados da escassez dos recursos esgotáveis.....	41
Gráfico 4: Resultados da comparação dos impactos ambientais do motor utilizando gasóleo e biodiesel de jatropha.	42

Gráfico 5: Comparação geral dos impactos ambientais do motor utilizando gasóleo e biodiesel de jatropha.	47
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{ci} – Fluxo crítico de uma substância (i);

F_i – Volume actual da contribuição na Suíça (i);

c – Factor de caracterização (número adimensional);

m_i – Massa da substância emitida (i);

GWP_i – Representa o potencial de aquecimento global de uma substância;

a_i – Absorção de radiação térmica por unidade de aumento de concentração de um GEE (i);

$c_i(t)$ – Concentração do GEE no instante t após a libertação;

T – Número total de anos ou horizonte temporal;

a_{CO_2} – Absorção de radiação térmica por unidade de aumento de concentração da substância de referência (CO₂);

$c_{CO_2}(t)$ – Concentração de CO₂ no instante t após a libertação;

ODP_i – Potencial de depleção da camada de ozono de uma substância;

$\delta[O_3]_i$ – Mudança na coluna de ozono no estado de equilíbrio devido às emissões anuais de uma substância (i);

$\delta[O_3]_{CFC-11}$ – Mudança na coluna de ozono no estado de equilíbrio devido às emissões anuais de CFC-11;

AP_i – Potencial de acidificação de uma substância (i);

v_i – Número de potencial H⁺ equivalente de uma substância (i);

M_i – Unidade de massa da substância (i);

NP_i – Potencial de eutrofização do ambiente aquático de uma substância(i);

IRP – Potencial de radiação ionizante de 1kBq de uma substância emitida para o compartimento (i);

$CD_{x,i}$ – Dose colectiva causada pela libertação da substância para o compartimento;

$CD_{co-60,ar}$ – Dose colectiva causada pela libertação de um 1kBq de C0-60 para o ar.

$PMFP_{x,i}$ – Potencial de formação de material particulado de uma substância (i);

$iF_{x,i}$ – Taxa de ingestão de material particulado fino devido as emissões na região (i) determinada pela substância (x);

$iF_{PM2,5,world}$ – Média mundial ponderada pelas emissões de PM2,5;

dC_j – É a variação da concentração de PM2,5 em cada região receptora;

N_j – Indica a população na região receptora (j);

BR – É a taxa média respiratória por pessoa;

$dM_{x,i}$ – É a variação da emissão de uma substância precursora na região (i);

$ETP_{x,i,j,c}$ – É o potencial de toxicidade ecológica para o comportamento receptor j (água doce, marinho ou terrestre) do produto químico x emitido no compartimento i, transportado para o compartimento receptor j, relacionado a perspectiva cultural c;

$FF_{x,i,j,g,c}$ – É o factor de destino, definido como a mudança marginal na massa em estado estacionário da substância x em um comportamento ambiental j na escala g devido a uma emissão marginal no comportamento i para a perspectiva cultural c;

HCA – Factor de classificação taxológico humano para o ar;

HCW – Factor de classificação taxológico humano para a água;

HCS – Factor de classificação taxológico humano para o solo;

$FCm_{occ,x}$ – Factor de caracterização para a ocupação da terra;

$S_{rel,x}$ – Perda relativa das espécies causada pelo tipo de uso de terra;

$S_{rel,anualcrop}$ – Perda relativa das espécies resultantes da produção agrícola;

$S_{LU,x,i}$ – Número de espécies observadas sob o tipo de uso de terra (x);

$S_{ref,i}$ – Número de espécies observadas da cobertura de terra de referência na região (i);

A_x – Área ocupada;

$CF_{midpoint,i}$ – Factor de caracterização de um recurso não renovável i (em kg equivalentes de petróleo/unidade de recurso i);

CED_i – Indicador de demanda cumulativa de energia do recurso não renovável;

CED_{ref} – Indicador de demanda cumulativa de energia do recurso petrolífero de referência;

$ASOP_{x,R}$ – É o potencial absoluto excedente de minério no mineral (x) na reserva (R);

$ASOP_{Cu,R}$ – É o potencial absoluto excedente de cobre na reserva (R).

LISTA DE ABREVIATURAS

ACV – Análise de Ciclo de Vida;

ADI – *Acceptable Daily Intake*;

AP – *Acidification potential*;

ARENE – Autoridade Reguladora de Energia;

CIP – Centro de Integridade Pública;

COVs – Compostos Orgânicos Voláteis;

COVSM – Compostos Orgânicos Voláteis sem Metano;

EF – factor de efeito;

FF – factor de destino;

FUNAE – Fundo Nacional de Energia;

GEE – Gases com Efeito de Estufa;

GWP – *Global Warming Potential*;

HAPs – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos;

ICE – Imposto sobre Consumos Específicos;

ICV – Inventário do Ciclo de Vida;

IEA – Agência Internacional de Energia;

IIAM – Instituto de Investigação Agrária de Moçambique;

IPCC – *International Panel on Climate Change*;

IR – Imposto sobre a Rentabilidade;
IRP – *Ionizing Radiation Potential*;
ISO – *International Standard Organization*;
IVA – Imposto sobre o Valor Adicionado;
MCI – Motor de Combustão Interna;
NP – *Nutrification Potential*;
ODP – *Ozone Depletion Potential*;
PCI – Poder Calorífico Inferior;
PMFP – *Particulate matter formation potentials*;
RIVM – *National Institute for Public Health and the Environment*;
SOP – *Surplus Ore Potential*;
TDI – *Tolerable Daily Intake*;
UEM – Universidade Eduardo Mondlane;
USD – *United States Dollar*;
WHO – *World Health Organization*;

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A crescente preocupação com as mudanças climáticas, a degradação ambiental e a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis. No sector dos transportes, que representa uma das principais fontes de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis tem sido apontada como uma alternativa promissora.

Entre os diversos biocombustíveis, o biodiesel de *jatropha curcas* tem despertado interesse particular em países em desenvolvimento, como Moçambique, devido à adaptabilidade da planta a solos pobres e condições climáticas adversas. Além disso, a *jatropha* não compete directamente com culturas alimentares, o que a torna uma opção atractiva do ponto de vista da segurança alimentar.

Para avaliar os reais benefícios ambientais de um combustível ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extracção da matéria-prima até a sua utilização final, é essencial o uso de ferramentas sistemáticas e reconhecidas internacionalmente. Uma dessas ferramentas é a Análise de Ciclo de Vida (ACV), normatizada pela norma ISO 14040. A ACV permite quantificar os impactos ambientais associados a todas as etapas de um produto ou processo, proporcionando uma visão abrangente e fundamentada para a tomada de decisões.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objectivo aplicar a metodologia de ACV, por meio do programa computacional *SimaPro*, para comparar o desempenho ambiental de um motor de combustão interna operando com dois tipos de combustíveis: gasóleo (derivado do petróleo) e biodiesel de *jatropha* (de origem renovável). O estudo será desenvolvido com base em dados primários e secundários, priorizando a realidade moçambicana.

Além da comparação ambiental, pretende-se fazer uma análise económica da substituição total do gasóleo pelo biodiesel de *jatropha*, com base na eficiência energética dos combustíveis e tendo em consideração os impactos no consumo final e aspectos que influenciam essa transição no país.

1.2 Objectivos

1.2.1 Geral

Comparar os impactos ambientais associados à utilização do gasóleo e biodiesel de *jatropha* em um motor de combustão interna.

1.2.2 Específicos

- ✓ Aplicar a metodologia de ACV, para avaliar os impactos ambientais de acordo com a norma ISO 14040;
- ✓ Modelar os dois sistemas de produtos (motor utilizando gasóleo e motor utilizando biodiesel de *jatropha*) fazendo o uso do programa computacional *SimaPro*;
- ✓ Identificar e quantificar os impactos ambientais em diferentes categorias, por meio da aplicação de métodos de avaliação como CML e ReCiPe;
- ✓ Comparar os níveis de impacto ambientais gerados pelos dois sistemas de produto;
- ✓ Realizar uma análise económica comparativa, considerando os custos por unidade energética útil.

1.3 Justificativa

Moçambique apresenta um elevado potencial para a produção de biocombustíveis, em particular o biodiesel de *jatropha*, que pode contribuir para a diversificação da matriz energética, redução das importações de combustíveis fósseis e geração de emprego no meio rural. No entanto, é fundamental garantir que a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis seja ambientalmente vantajosa. A aplicação da ACV oferece uma base técnica rigorosa para essa avaliação, promovendo decisões mais sustentáveis e bem informadas.

1.4 Metodologia de pesquisa

A pesquisa foi conduzida com base na:

- ✓ **Pesquisa bibliográfica** – onde foram recolhidas informações relevantes a aplicação da técnica de ACV e alguns dados para a composição do inventário dos sistemas de produto, cujos mesmos complementam a base de dados do programa utilizado.
- ✓ **Simulação computacional** – onde foram modelados os sistemas de produto e foi feita a simulação com vista na obtenção dos resultados da pesquisa.
- ✓ **Consulta técnica** – foram consultados professores e supervisores para melhor abordar e responder questões. Esta consulta contou com docentes e professor das faculdades de Agronomia e Engenharia da UEM.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente relatório está dividido em 6 capítulos, a saber:

- ✓ **Capítulo I** – faz a introdução do trabalho, apresentando a contextualização, os objectivos, a justificativa e estrutura do trabalho;
- ✓ **Capítulo II** – aborda a revisão da literatura sobre a Análise de Ciclo de Vida (ACV), gasóleo, biodiesel para motores de combustão e estudos relacionados;
- ✓ **Capítulo III** – descreve a metodologia adoptada, incluindo o uso do *SimaPro* e a definição dos sistemas comparados;
- ✓ **Capítulo IV** – apresenta os resultados e a discussão com base na avaliação dos impactos ambientais;
- ✓ **Capítulo V** – avalia a viabilidade económica da implementação do biodiesel de *Jatropha*;
- ✓ **Capítulo VI** – traz as conclusões do estudo realizado e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 ESTUDO DO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos da Análise de Ciclo de Vida (ACV) e uma revisão de estudos feitos relacionados a comparação de combustíveis fósseis (gasóleo) e biocombustíveis (biodiesel) usando a técnica de Análise de Ciclo de Vida.

2.1 Fundamentos da ACV

2.1.1 Conceitos

A Análise de Ciclo de Vida é uma técnica para determinar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, agregando um inventário de todas as entradas e saídas relevantes do sistema, avaliando os impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas, e interpretando os resultados em relação aos objectivos de estudo (ISO 14040, 1997).

Segundo Ferreira e Carvas 2014, todo produto, independentemente do tipo de material de que ele seja feito, provoca um impacto no meio ambiente, através do processo produtivo, das matérias-primas utilizadas, durante o uso ou disposição final. O “ciclo inteiro” do produto, envolve etapas que vão desde a retirada das matérias-primas da natureza até a sua disposição final, como ilustrado na figura abaixo.

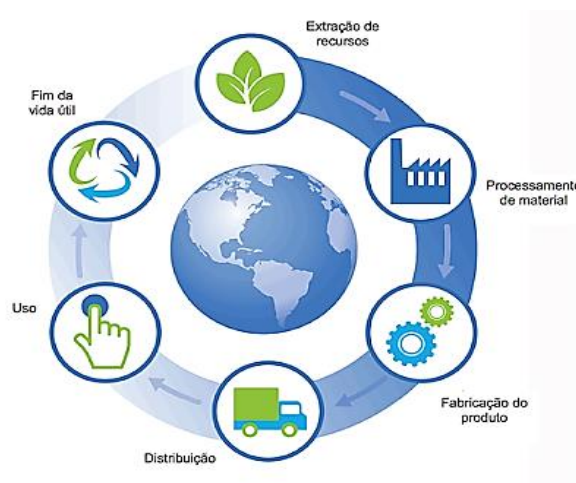


Figura 1: Ciclo de vida de um produto. (Fonte: Autossustentável, 2015)

2.1.2 ACV e as normas ISO

De acordo com sua forma actual, o ACV constitui uma ferramenta de gestão ambiental. As normas ISO possuem várias normas associadas à condução do ACV:

- ✓ Norma ISO 14040: Apresenta os princípios gerais e a metodologia da ACV.
- ✓ Norma ISO 14041: Guia para determinar os objectivos e alcances de um estudo de ACV e para realizar a análise de inventário.
- ✓ Norma ISO 14042: Guia para a realização a fase de avaliação de impacto ambiental de um estudo de ACV.
- ✓ Norma ISO 14043: Guia para a avaliação dos resultados do estudo de ACV.
- ✓ Norma ISO 14048: Apresenta informações do formato dos dados que servem de base para a avaliação do ciclo de vida.
- ✓ Norma ISO 14049: Ilustra com exemplos como aplicar os guias ISO 14041 e ISO 14042.

2.1.3 Elementos fundamentais da ACV

Além da elaboração do fluxograma do ciclo de vida do sistema a ser estudado e do procedimento para o desenvolvimento do estudo de ACV, ainda existem quatro elementos fundamentais para se entender o conceito da ACV.

2.1.3.1 Unidade funcional

A unidade funcional é definida como o desempenho quantificado de um sistema de produto e tem como objectivo primário servir de unidade de referência do estudo. Assim, todos os dados do estudo de ACV são relacionados à unidade funcional, ou seja, todas as entradas e saídas do sistema são relacionadas a esta unidade. Portanto, esta unidade precisa ser bem definida e mensurável (ISO 14040, 1997).

2.1.3.2 Fronteiras do sistema

A fronteira do sistema estabelece limites para o estudo, ou seja, define todos os processos elementares que serão estudados.

O estabelecimento das fronteiras do estudo é feito no início da fase de definição do objectivo e escopo. No entanto, a fronteira final do sistema é definida efectivamente somente

quando informações suficientes forem colectadas durante a análise de inventário. Assim, se alguma parte do ciclo de vida do produto não foi estudada esta exclusão deve estar bem clara no relatório (ISO 14040, 1997).

2.1.3.3 Alocação

As situações que requerem critérios de alocação ocorrem em estudos de ACV quando o ciclo de vida de produtos diferentes, são interligados. Quando estas situações ocorrem, a norma ISO 14041 recomenda que a fronteira do sistema seja expandida de modo que os co-produtos sejam incluídos no estudo ou o nível de detalhes do ciclo de vida seja ampliado, o que ajuda na identificação de dados relevantes que são específicos do produto.

2.1.4 Fases da análise de ciclo de vida

Segundo a norma ISO14040 avaliação de ciclo de vida deve incluir 4 fases, a saber:

1ª Fase – Definição de objectivo e escopo

A definição do objectivo e escopo consiste na significação do propósito e a extensão do estudo, por meio do estabelecimento de suas fronteiras, ou seja, quais processos da produção do produto serão ou não abordados.

O escopo de uma avaliação de ciclo de vida é feito através de três abordagens:

- ✓ **Do berço ao portão:** que foca o impacto ambiental desde a extracção da matéria-prima até o portão da fábrica;
- ✓ **Do berço ao túmulo:** abrange todo o ciclo de vida, desde a extracção da matéria-prima até o descarte;
- ✓ **Do berço ao berço:** semelhante ao berço ao túmulo, mas inclui processos de reciclagem para tornar o produto reutilizável.

2ª Fase – Análise de inventário.

A fase da análise de inventário busca quantificar os fluxos de material e energia ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Durante a análise de inventário, são levantadas informações sobre as diferentes etapas do ciclo de vida, quantificando os recursos utilizados e os resíduos gerados em cada etapa.

3ª Fase – Avaliação de impacto.

Na terceira fase de ACV, são avaliados os impactos ambientais potenciais de um sistema de produtos, utilizando os dados compilados na fase de análise de inventário. Nesta fase, são escolhidas as categorias de impacto a serem avaliadas e definidos os indicadores para cada categoria (FRANCINE, 2024).

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

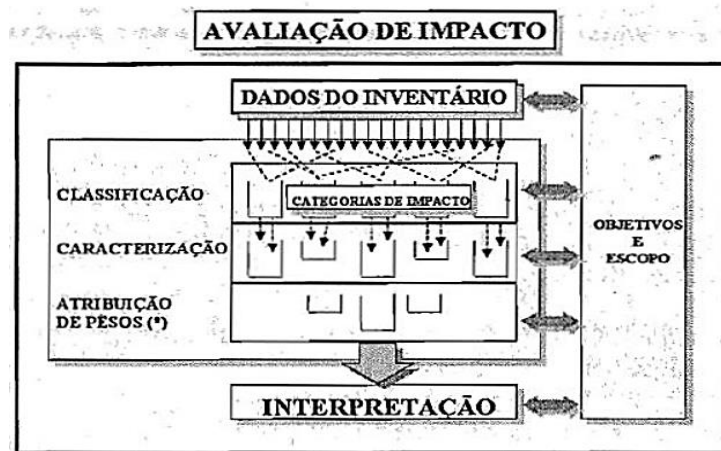


Figura 2: Avaliação de impacto de ciclo de vida. (Fonte: Ferreira, G. e Carvas, R., 2014)

4ª Fase – Interpretação dos resultados.

Interpretação é a fase na qual os resultados da análise de inventário e da avaliação de impactos são combinados ou, no caso de estudos de inventário de ciclo de vida, apenas os resultados da análise de inventário, consistentes com a meta e o escopo definido, a fim de chegar a conclusão e recomendações (ISO 14040, 1997).

2.2 Biocombustíveis e Sustentabilidade

Os biocombustíveis são combustíveis derivados de biomassa, que são fontes de energia renováveis e podem ser usados como substitutos ou complementos aos combustíveis fósseis. Esses biocombustíveis são produzidos a partir de matéria-prima vegetal ou animal.

Os biocombustíveis podem ser uma alternativa mais sustentável aos combustíveis fósseis, ajudando a reduzir o uso de recursos esgotáveis, a poluição e as emissões de gases de efeito estufa (RAÍZEN, 2021).

2.2.1 Classificação dos biocombustíveis

Os biocombustíveis podem ser classificados pelas suas gerações, que são distinguidas em três, a saber:

- ✓ **1ª geração** - Caracteriza-se pelos biocombustíveis produzidos principalmente de matérias-primas cultivadas e pela baixa complexidade tecnológica para a sua produção.
- ✓ **2ª geração** - Caracteriza-se pelos biocombustíveis produzidos a partir de recursos não destinados à alimentação, e alta complexidade tecnológica para sua obtenção. Não gera disputa por solos com áreas de plantio de alimentos.
- ✓ **3ª geração** - Caracteriza-se pela alta velocidade de produção, alto teor de óleo e carboidratos, adaptação a um espectro amplo de temperatura e acidez do meio, capacidade de fixar nitrogénio da atmosfera, e maior eficiência fotossintética.

2.3 Biodiesel de *Jatropha*

Segundo o Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), é importante referir que o óleo não consumível da *Jatropha curcas* tem potencial como alternativa viável, promissora e comercial, para substituir o combustível visto que tem características físico-químicas comparáveis ao gasóleo.

2.3.1 Características agronómicas

A *Jatropha curcas* é um arbusto ou pequena árvore (altura máxima de 5m) pertencente à família das Euforbiáceas, que se tem destacado por ser uma planta rústica e perene, tolerante à falta de água e a salinidade do solo, com boa adaptação a várias condições do meio ambiente, que pode ser utilizado na recuperação de solos degradados e que produz sementes ricas em óleo (Galp, SD). A semente de *Jatropha* possui cerca de 30-40% de conteúdo de óleo.



(a)



(b)

Figura 3: (a) *jatropha curcas*, (b) sementes da *jatropha curcas*. (Fonte: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Jatropha_curcas)

2.3.2 Produção do biodiesel de *jatropha*

O biodiesel é produzido através do processo de transesterificação que se trata de um processo no qual moléculas de triglicerídeos presentes em óleos vegetais ou em gordura animal reagem com um álcool (em excesso no meio reaccional), na presença de um catalisador, formando biodiesel (ésteres) e um subproduto (glicerol), de acordo com a reacção apresentada a seguir.



Figura 4: Reacção de transesterificação com metanol e com catalisador básico. (Fonte: Silva, L., 2014)

Existem duas rotas possíveis para efectivar a reacção de transesterificação, que são as rotas metílica e etílica, comparadas na seguinte tabela.

Tabela 1: Comparação das rotas metílica e etílica. [Fonte: Vianna, F., 2006 (Adaptado)].

Quantidades e condições usuais médias aproximadas	Rotas de processo	
	Metílica	Etílica
Quantidade consumida de álcool por 1000L de biodiesel	90 kg	130kg
Tempo de reacção	45 minutos	90 minutos
Excesso recomendado de álcool, recuperável, por destilação, após reacção	95%	75%
Temperatura recomendada de reacção	60°C	90°C

Com base na tabela, notam-se algumas vantagens da rota metílica em comparação com a rota etílica, como o consumo do metanol 45% menor que o do etanol.

2.3.3 Rendimento energético

O Poder Calorífico Inferior (PCI) do biodiesel de *jatropha curcas* varia conforme o método de produção e a pureza final do combustível. No entanto, de acordo com KNOTHE, G.; GERPHEIDE, K. (2005) e Achten, W.M.J. et al. (2008), o PCI do biodiesel de *jatropha* convergem para valores entre 36,5 e 38,5 MJ/L, com média de 37 MJ/L, que é o valor mais comumente utilizado em análises de balanços energéticos.

2.4 Gasóleo

O gasóleo ou óleo Diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, utilizado primordialmente como combustível para motores à combustão interna, em particular, em motores de ciclo Diesel (PETROBRAS, 2024).

2.4.1 Produção do gasóleo

De acordo com Ferreira, G. e Carvas, R. (2014) a produção do gasóleo envolve várias etapas complexas, partindo da extração do petróleo bruto no subsolo, através de perfurações de poços em terra ou no mar. O petróleo bruto é uma mistura de hidrocarbonetos e outras substâncias que precisa de ser refinado para se tornar utilizável.

Na refinaria o petróleo bruto é aquecido em grandes torres de destilação. Através desse processo, os componentes do petróleo são separados por ponto de ebulição. O gasóleo é obtido nesse processo entre as temperaturas de 163-357°C, aproximadamente (Ferreira, G. e Carvas, R., 2014).

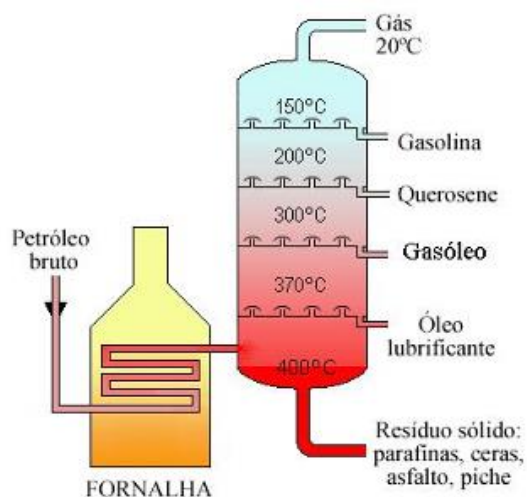


Figura 5: Obtenção do gasóleo. (Fonte: Mundo Educação (SD). Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/refino-petroleo.htm>).

2.4.2 Impactos do uso do gasóleo

O uso do gasóleo em motores de combustão interna (MCI) tem um impacto significativo no meio ambiente devido às emissões de poluentes atmosféricos, como nitrogénio (NO_x), material particulado, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2) (Heywood, 1988).

2.5 Gasóleo versus biodiesel usando a técnica de ACV

A aplicação da Análise de Ciclo de Vida (ACV) na comparação de combustíveis tem sido amplamente explorada em diversos contextos académicos e industriais.

Segundo Achten et al. (2008), a produção de biodiesel de *jatropha* pode reduzir de forma significativa as emissões de CO_2 ao longo do ciclo de vida, principalmente se a produção agrícola for bem controlada e as emissões indirectas forem minimizadas. No entanto, o mesmo estudo alerta para o risco de impactos negativos caso a produção leve ao desmatamento ou à alteração de ecossistemas locais.

Gmünder et al. (2010) utilizaram o *SimaPro* para realizar uma ACV comparativa entre o biodiesel de *jatropha* produzido na Índia e o diesel fóssil europeu. Os resultados indicaram que, embora o biodiesel tenha menor impacto em categorias como mudança climática e

esgotamento de recursos fósseis, ele pode apresentar maiores impactos em categorias como toxicidade humana e uso da terra, dependendo das práticas agrícolas e do uso de insumos.

Em Moçambique, estudos como o de Foidl et al. (2011) e relatórios do Fundo Nacional de Energia (FUNAE) têm explorado a viabilidade do cultivo de *jatropha* para produção de biocombustíveis. Embora ainda em estágios experimentais, essas iniciativas mostram que existe um potencial técnico e socioeconómico para a implementação local de cadeias de produção de biodiesel, o que reforça a relevância de estudos de ACV no contexto nacional.

2.5.1 Limitações da literatura

A implementação do biodiesel de *jatropha* em Moçambique tem sido uma alternativa bastante atractiva, porém a falta de estudos referentes aos benefícios relativos aos impactos ambientais e socioeconómicos, condiciona a tomada de decisão.

Os estudos até então produzidos, como o projecto de desenvolvimento do biodiesel de *jatropha*, da Galp Moçambique produzido em 2016 e o relatório da *Econergy Internacional Corporation* de avaliação de combustíveis em Moçambique de 2008, abordam questões socioeconómicas associadas à implementação de biocombustíveis e em particular o de *jatropha*, não considerando potenciais impactos ambientais envolvidos.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, segue-se com a apresentação da técnica de análise de ciclo de vida baseada na norma ISO 14040, que foi utilizada para conduzir a pesquisa. Aqui são detalhadas as informações referentes às três primeiras etapas da técnica da ACV, a saber: definição do objectivo e escopo, análise de inventário, e método de avaliação de impacto.

3.1 Delimitação da abordagem geral

Este estudo é conduzido com base numa abordagem de causalidade, trazendo uma relação quantitativa entre as entradas e saídas dos sistemas. Define-se também, um escopo do tipo “do berço ao túmulo”, ou seja, são considerados as etapas da extracção da matéria-prima, transformação dos recursos, distribuição do combustível e uso, não abordando a etapa da reciclagem.

A perspectiva deste estudo é ambiental, determinando os impactos gerados pelos ciclos de vida dos dois sistemas de produto bem definidos segundo os seus limites de abordagem.

3.2 Definição do objectivo e escopo

3.2.1 Objectivo do estudo

O objectivo deste estudo de ACV é comparar os impactos ambientais do motor de combustão interna usando o gasóleo (combustível fóssil) e o biodiesel de *Jatropha*.

Os resultados do estudo fornecerão informações para a tomada de decisão, com vista a consolidação do biodiesel em Moçambique. Atendendo a actual consciência da redução do consumo de recursos esgotáveis e a redução dos impactos ambientais no uso de motores a combustão em veículos, estes resultados serão importantes para a projecção do sector energético em Moçambique. A importância destes resultados estende-se aos distribuidores locais e transportadoras com consciência ambiental, podendo investir em combustíveis ambientalmente mais agradáveis.

Os dados dos inventários de todas as unidades de processo deste estudo, podem ser utilizados em outros estudos de ACV que utilizem o gasóleo e o biodiesel de *Jatropha* em seu sistema.

3.2.2 Escopo do estudo

Os motores de combustão interna que funcionam segundo o ciclo Diesel têm diversas finalidades, assim, para poder efectuar uma comparação justa da operação de um determinado motor com diferentes combustíveis, é necessário escolher uma mesma única função para este motor. Neste contexto, a função escolhida foi a operação de um veículo ligeiro com a unidade funcional definida como a distancia percorrida pelo veículo ao longo de 1.000 km.

Tomando em consideração o desempenho de um motor do ciclo Diesel em um veículo ligeiro com consumo médio de 10 km/l e que segundo Krishnakumar et al (2013) o desempenho do biodiesel de *Jatropha* é 10% menor que o do gasóleo, correspondendo neste caso a um consumo médio de 9 km/L, calcula-se a quantidade de combustível necessária para atender a unidade funcional escolhida de 1.000 km. Assim, são necessários 100 L de gasóleo e 111,1 L de biodiesel, sendo estes os fluxos de referência para os dois combustíveis.

Tabela 2: Resumo do escopo. (Fonte: Autor)

Combustível	Gasóleo	Biodiesel
Função	Rodar um veículo ligeiro	
Unidade funcional	1.000km	
Desempenho	10km/L	9km/L
Fluxo de referência	100L	111,1L

3.2.2.1 Unidades do processo

1. Motor utilizando gasóleo

Para este estudo, o sistema do motor a gasóleo é baseado no ciclo de vida do gasóleo e está dividido em função das unidades de processo de obtenção e uso deste combustível, a saber:

- ✓ Extracção do petróleo;
- ✓ Refinação e produção do combustível;
- ✓ Transporte e distribuição do combustível;
- ✓ Uso do combustível no motor.

A extracção do petróleo é um processo intensivo em termos de energia, especialmente em locais de difícil acesso, como águas profundas. A energia consumida varia conforme o método de extracção utilizado. Plataformas em alto mar, por exemplo, utilizam turbinas a gás ou geradores eléctricos para alimentar as bombas e equipamentos de perfuração. De acordo com estudos feitos pela Agência Internacional de Energia (IEA), a produção de petróleo convencional consome entre 10 a 50 kWh por barril, enquanto as operações em areias betuminosas podem exigir até 1.000 kWh (IEA, 2021). De acordo com *BP Statistical Review* (2023), um campo de alto mar, pode produzir de 10.000 a 500.000 barris por dia, que são bombeados para embarcações ou directamente para a costa via ductos submarinos.

Durante a extracção e transporte do petróleo, há libertação de CO₂ e metano. Segundo o relatório do IPCC (2022), a indústria do petróleo é responsável por cerca de 12% das emissões globais de GEE.

Neste estudo, é considerado o transporte do petróleo bruto para a refinaria, embora o gasóleo importado para Moçambique tenha diversas origens, o que dificulta a obtenção de dados reais sobre os métodos de extracção (terra ou alto mar), método de transporte e distância entre os pontos de extracção e a refinaria.

O processo de refinaria do petróleo para produzir gasóleo envolve etapas de destilação, separação, conversão e tratamento. 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 fracções) para obtenção da energia demandada.

A importação do gasóleo para Moçambique é feita exclusivamente por via marítima utilizando navios. O combustível já no solo nacional, é distribuído para diversos pontos do país por meio de camiões-cisternas e por vias ferroviárias utilizando locomotivas com vagões apropriados.

O motor utilizando o gásóleo como combustível provoca emissões poluentes ao meio ambiente, sendo característica dos combustíveis fósseis. Dentre as emissões destacam-se as de CO₂, CO e NO_x.

A imagem a seguir ilustra o esquema do ciclo de vida do sistema do motor utilizando gásóleo.

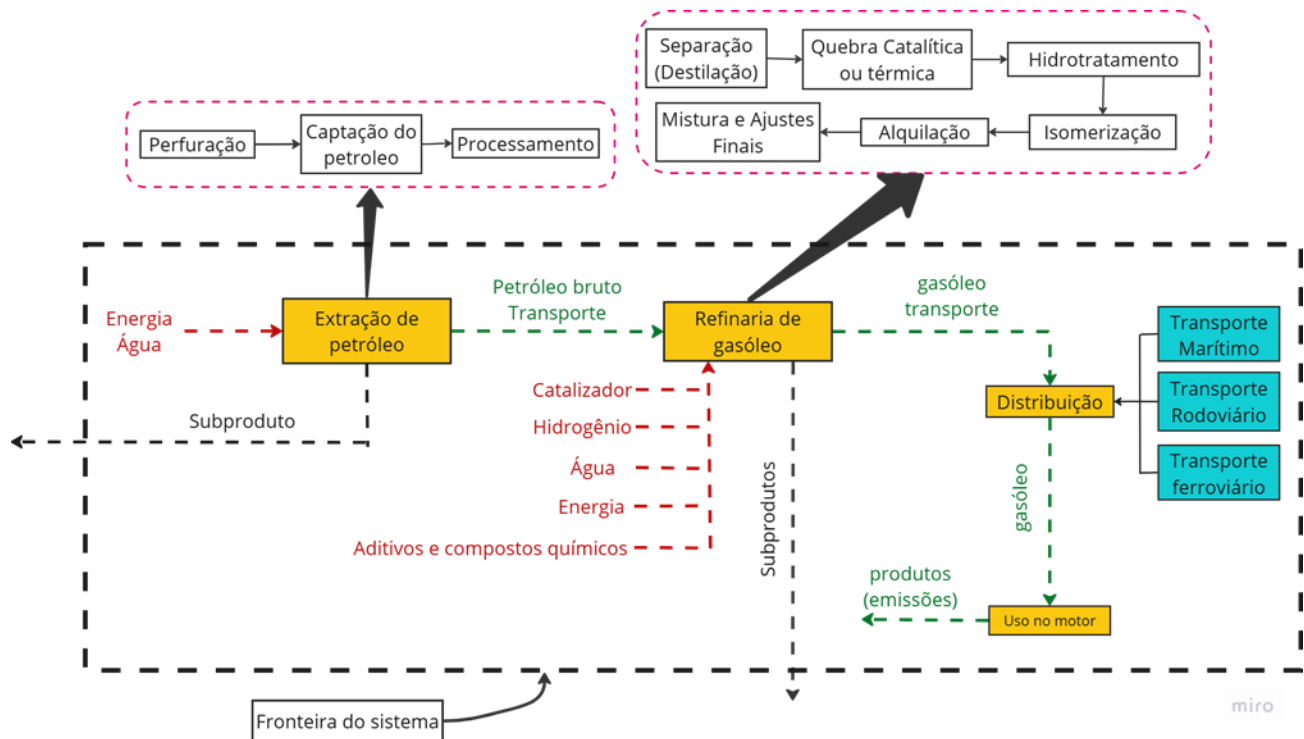


Figura 6: Esquema do ciclo de vida do gásóleo. (Fonte: Autor)

2. Motor a biodiesel de *Jatropha*

O sistema do motor utilizando o biodiesel de *Jatropha* é baseado no ciclo de vida do biodiesel de *Jatropha*, que está dividido em cinco unidades de processo, a saber:

- ✓ Cultivo da planta *Jatropha curcas*;
- ✓ Processo de obtenção do óleo de *Jatropha*;
- ✓ Processo de transformação em biodiesel;
- ✓ Transporte e distribuição;
- ✓ Uso no motor.

O processo de cultivo da planta de *Jatropha curcas*, deve incluir todas as etapas desde a preparação do solo até a extracção das sementes. Considera-se o cultivo desta planta em todos os pontos agro-industriais onde ela se pode produzir em Moçambique.

A obtenção do óleo de *Jatropha*, trata-se de um processo intermediário entre o cultivo e a produção do próprio combustível. Considera-se um processo realizado num único local distinto do de cultivo, tendo em conta múltipla origem das sementes. Este processo necessita de equipamentos específicos que consomem energia eléctrica. Por conta disto, para o estudo de ACV deste produto, vai se considerar este processo como sendo parte do processo de cultivo.

O transporte do óleo para a planta de processamento para a obtenção do combustível, não é incluído neste sistema, por conta da não existência de um ponto específico tanto de cultivo das plantas de *Jatropha curcas*, quanto da planta de processamento, em Moçambique. Devido esta limitação, é importante considerar a distância entre estes dois pontos desprezível.

O processo de transformação do óleo de *Jatropha* em biodiesel (transesterificação) é composto pelas seguintes etapas: preparação do óleo, preparação do álcool e do catalisador, reacção de transesterificação, secagem e purificação do biodiesel e por fim a neutralização e secagem (retirada da humidade presente no combustível). As entradas e saídas para esta unidade de processo serão uma sintetização desses fluxos para cada uma das etapas citadas.

Para a fase da distribuição serão considerados os transportes ferroviário e rodoviário, para uma distância correspondente aos dois pontos mais distantes de Moçambique, no caso a maior distância que se pode percorrer por estrada, que é entre as cidades de Maputo e Cabo delgado, percorrendo cerca de 2.118,9 km (Rome2Rio, SD).

Para a utilização deste combustível no motor determinado, escolhe-se a fracção B100. Assim o motor funciona 100% com biodiesel, não havendo quaisquer influências do combustível fóssil no desempenho e emissões deste motor.

Abaixo encontra-se uma ilustração do esquema do ciclo de vida acima descrito:

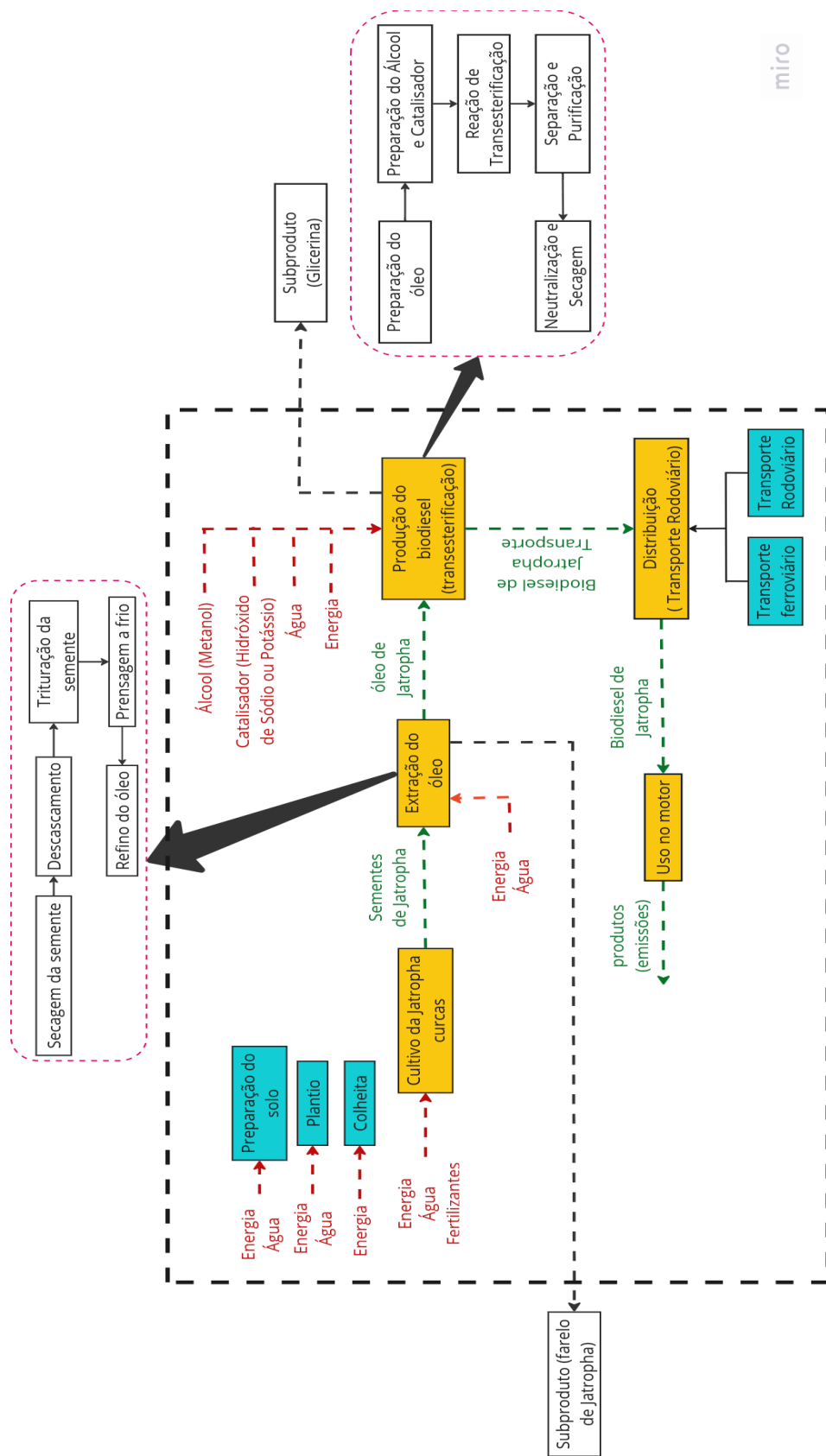


Figura 7: Esquema do ciclo de vida do biodiesel de Jatropha. (Fonte: Autor)

3.3 Análise de inventário

3.3.1 Software e Base de dados

Para a modelagem do estudo, foi usado o programa computacional *SimaPro*¹, onde aplicou-se uma combinação com base de dados *Ecoinvent* (versão 9.6.0.1), por ser uma ampla biblioteca de inventário com valores de cargas ambientais (entradas e saídas de materiais, substâncias e energia) associadas ao ciclo de vida de um grande número de produtos, processos, sistemas de energia, de transporte, de disposição de resíduos considerada referência em termos de bancos de dados para estudos de avaliação de ciclo de vida.

3.3.2 Modelagem

A modelagem consistiu em compor os processos unitários de cada sistema de produto, introduzindo dados de entrada e saídas e as suas respectivas quantidades, com base nos dados do *SimaPro* e diferentes literaturas. Os detalhes serão apresentados posteriormente.

Estes dados foram colocados em tabelas de forma organizada, de modo poder-se registrar essas informações e as tabelas podem ser encontradas no apêndice A, deste trabalho.

Para a modelagem, o *SimaPro* usa a seguinte estrutura:

a) Definição do produto ou processo

A imagem a seguir ilustra um recorte da janela da modelagem no *SimaPro*, na fase de definição do produto ou processo.

¹ O *SimaPro* é um programa computacional comercial desenvolvido pela empresa **PRé Sustainability** amplamente utilizado para Análise de Ciclo de Vida (ACV). Apesar do acesso ao *SimaPro* exigir a compra de uma licença, o programa é considerado uma boa alternativa para reduzir custos de investimento para praticantes de estudos de ACV. Uma das vantagens que ele oferece aos usuários é a possibilidade de trabalhar com diferentes bases de dados de diferentes origens.

Produtos							
Saidas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos	Quantidade	Unidade	Grandeza	Alocação %	Tipo de residuo	Categoria	Comentário
(Insira linha aqui)	0	kg	Mass	100 %	não definido	Minerals\Transformation	
Saidas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Figura 8: Definição de produto ou processo no SimaPro. (Fonte: Autor)

Legenda:

1. Campo de definição do produto ou processo;
2. Campo de quantificação do produto ou processo;
3. Campo de selecção da unidade de medida do produto ou processo;
4. Campo de escolha do tipo de resíduo;
5. Campo de comentários relevantes.

b) Atribuição das entradas

As entradas foram introduzidas, preenchendo os campos ilustrados na imagem a seguir, que é um recorte da janela do *SimaPro* de definição das entradas.

Entradas								
Entradas conhecidas da natureza (recursos)	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)		0		Indefinido				
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)		Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min		
(Insira linha aqui)		0		Indefinido				
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (electricidade/calor)		Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)		0		Indefinido				

Figura 9: Inserção das entradas no SimaPro. (Fonte: Autor)

Legenda:

1. Campo de recursos obtidos directamente da natureza, ou seja, recursos naturais que não tenham sofrido qualquer alteração.
2. Campo de materiais e combustíveis que fazem parte da esfera tecnológica do processo ou produto.
3. Campo da electricidade e calor utilizado ou gasto durante o processo.

c) Atribuição de saídas

As saídas foram introduzidas, tendo em conta diferentes tipos de emissões, como emissões ao ar, água, solo e resíduos e emissões para tratamento.

Saídas								
Emissões para o ar (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Emissões para a água (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Emissões para o solo (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Fluxos finais de resíduo (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Emissões não materiais (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Questões sociais (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Questões económicas (Insira linha aqui)	Sub-compartmento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Resíduos e emissões para tratamento (Insira linha aqui)		Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 eller 2*SD	Min	Máx	Comentário

Figura 10: Inserção das saídas no SimaPro. (Fonte: Autor)

Nota-se, pelas imagens, que em todos campos mantém-se a opção “Insira linha aqui”, com isto é possível colocar uma quantidade ilimitada de dados referentes a um único campo.

3.3.3 Balanço de CO₂

Wani et al. (2012), relatou que uma plantação de *Jatropha* de 3-5 anos adicionou cerca de 1450 kg de carbono por hectare por ano através de folhas, galhos podados e bolo de *Jatropha* sem óleo. Isso equivale aproximadamente a 5323 kg de CO₂ por hectare por ano. A área necessária para a produção de 445,26 kg de sementes é de 1781,04 m², portando neste cultivo são sequestrados 258,25 kg de carbono por ano. Para obter o maior potencial de óleo das sementes, o tempo recomendado para a colheita é quando os frutos estão completamente maduros e começando a secar na planta (Foidl, N., et al., 1996). Considerando o tempo médio de 4 anos para a colheita das sementes obtém-se um sequestro de 1033 kg de carbono que equivale a 3792 kg de CO₂.

Assim, antes da consolidação do inventário para o motor utilizando biodiesel de *Jatropha* é necessário fazer um balanço de CO₂. Para isso, deve-se somar as emissões de CO₂ de todas as unidades de processo e subtrair o CO₂ sequestrado, segundo a equação:

$$Total\ de\ CO_2\ para\ o\ ambiente = \sum Emissões\ de\ CO_2 - CO_2\ sequestrado \quad (3.0)$$

3.4 Método de avaliação de impacto

O *SimaPro* dispõe de uma série de métodos de avaliação de impacto, como o IMPACT World, LC-IMPACT, CML-IA, EPS 2000 e o ReCiPe. Estes métodos são na maioria utilizados a nível global.

Para este trabalho, o método escolhido foi o ReCiPe que é um método criado pela RIVM, Universidade de Radboud, Universidade de ciências e tecnologias da Noruega e a *PRé Sustainability*.

O ReCiPe 2016 é o sucessor dos métodos Eco-indicator 99 e CML-IA, integrando os sistemas de abordagem de problema (*midpoint*) e abordagem de impacto (*endpoint*). Na abordagem *midpoint* (ponto médio), todas as substâncias referentes ao ACV possuem características que não representam as consequências finais sobre o percurso ambiental das emissões listadas no inventário do ciclo de vida (ICV), mas são indicadores de impacto em potencial. Já a modelagem *endpoint* (ponto final), consiste basicamente em caracterizar a gravidade ou as consequências de categorias de impacto de ponto médio, ou seja, quantificar as consequências finais das externalidades nas respectivas áreas de protecção: danos aos ecossistemas, saúde humana e recursos protecção (Montesanti, B. e Carelli, G., 2021).

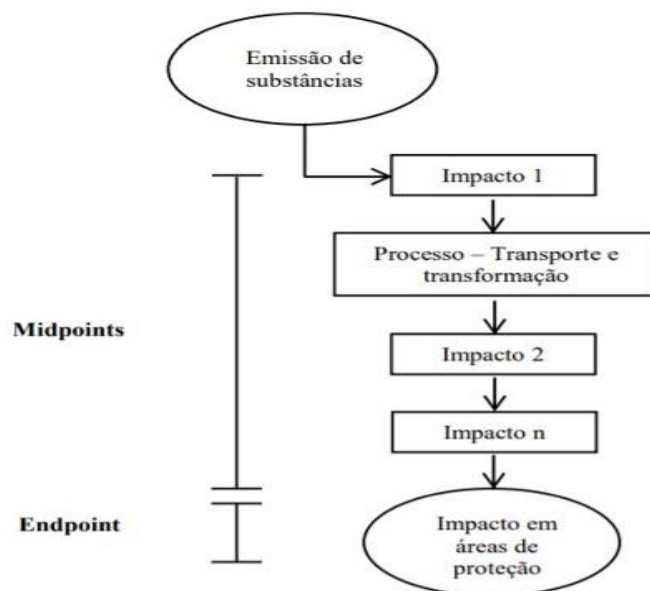


Figura 11: Representação esquemática de um mecanismo ambiental subjacente à modelagem Avaliação de Impactos. (Fonte: Montesanti, B. e Carelli, G., 2021)

A abordagem *midpoint* contém 18 categorias de impacto que entrelaçam ambas as abordagens (Montesanti, B. e Carelli, G. 2021) e além disso conta com todas as etapas obrigatórias (selecção 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.

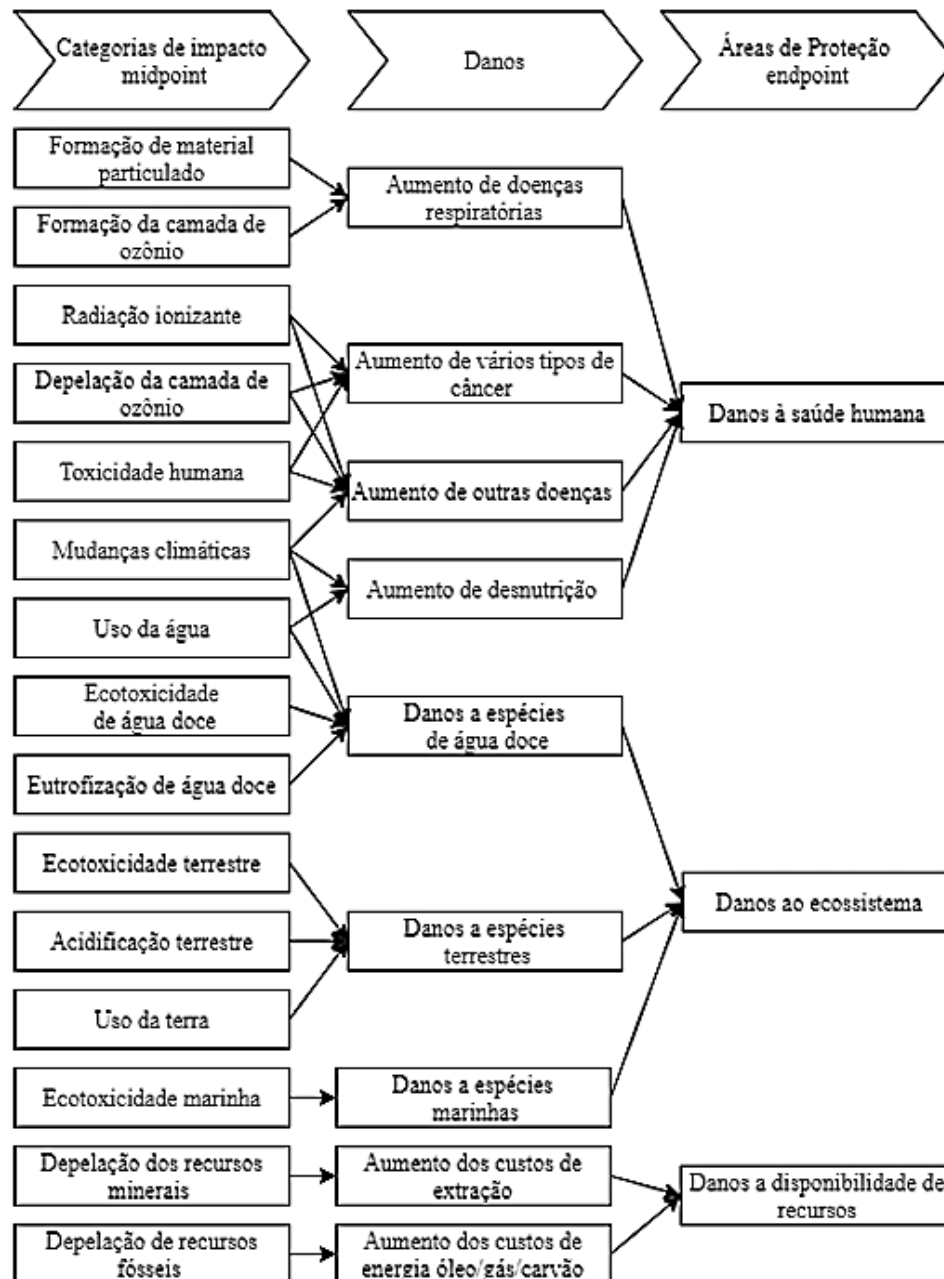


Figura 12: Categorias de avaliação de impacto. (Fonte: Montesanti, B. e Carelli, G. 2021)

Estas categorias de impacto podem ser resumidas em 12 categorias gerais, como apresentado na tabela seguinte.

Tabela 3: Categorias de impacto. (Fonte: Adaptado de Ferreira, G. e Carvas, R., 2014).

Categoria de impacto	Unidade (abordagem de problema)	Factor de caracterização
Aquecimento global	kg CO ₂ eq (no ar)	Potencial de aquecimento global
Depleção da camada de ozono	kg CFC-11 eq (no ar)	Potencial de depleção de ozono
Acidificação	kg SO ₂ eq (no ar)	Potencial total de acidificação
Eutrofização	kg N eq (marítimo)	Potencial de eutrofização de água fresca
	kg P eq (água potável)	
Ecotoxicidade	kg de 1,4-DCB (no ar)	Potencial de toxicidade para o ecossistema
	kg de 1,4-DCB (na água)	
	kg de 1,4-DCB (no solo)	
Dano à saúde humana por particulados e ozono	kg NO ₃ eq	Potencial de formação de ozono
	kg PM2.5 eq	
Radiação ionizante	kg Urânio-235 eq (no ar)	Potencial de radiação ionizante
Toxicidade humana	kg de 1,4-DCB	Potencial de intoxicação cancerígena
Uso do solo	m ² eq	Potencial de uso de solo agrícola
Consumo de água	m ³	Potencial de depleção de água
Depleção de recursos minerais	kg cobre eq	Potencial de depleção mineral
Depleção de combustíveis fósseis	kg óleo eq	Potencial de depleção de fósseis

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 (Carvas, F. e Ferreira, G., 2014).

3.4.1 Modelos matemáticos

A seguir são apresentados os modelos matemáticos utilizados pelo método ReCipe para calcular e quantificar as categorias de impacto ambiental.

3.4.1.1 Classificação *midpoint*

Através do método de contribuição, todos componentes que colaboram para uma categoria de impacto são agregados através do cálculo de um *eco factor* (*eco-point/gr*) para cada tipo de intervenção, multiplicando este *eco factor* por uma contribuição e depois agrega-se os resultados de cada contribuição. Isso é expresso pela seguinte fórmula (Heijungs et. al. 1992):

$$Ecofactor_i = \frac{1}{Fc_i} \times \frac{F_i}{Fc_i} \times c \quad (3.1)$$

Onde:

Fc_i representa o fluxo crítico de uma substância (i);

F_i é o volume actual da contribuição na Suíça (i);

c é um número adimensional usado para aumentar o resultado.

O número de *ecopontos* é determinado pela multiplicação da contribuição pelo *eco factor* e pela agregação das contribuições:

$$Total (ecopontos) = \sum_i ecofactor_i \times m_i \quad (3.2)$$

A agregação das contribuições m_i é definida em quilogramas (kg).

1) Aquecimento global

O GWP (*Global Warming Potential*) de uma substância é a razão entre a contribuição para a absorção de radiação térmica resultante da liberação instantânea de 1 kg de um gás de efeito estufa (GEE) e uma emissão igual de dióxido de carbono (CO₂) integrada ao longo do tempo (Heijungs et. al. 1992):

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} [CO_2 equivalente] \quad (3.3)$$

Onde:

GWP_i – Representa o potencial de aquecimento global de uma substância;

a_i – Absorção de radiação térmica por unidade de aumento de concentração de um GEE (i);

$c_i(t)$ – Concentração do GEE no instante t após a libertação;

T – Número total de anos ou horizonte temporal;

a_{CO_2} – Absorção de radiação térmica por unidade de aumento de concentração da substância de referência (CO₂).

$c_{CO_2}(t)$ – Concentração de CO₂ no instante t após a liberação

O aquecimento global é dado pela seguinte expressão:

$$Aquecimento\ Global = \sum_i GWP_i \times m_i \ [kg\ de\ CO_2\ equivalente] \quad (3.4)$$

Onde m_i é massa da substância emitida (i).

2) Depleção da camada de ozono

O potencial de depleção do ozono ODP (*Ozone Depletion Potential*) é definido como a relação entre a decomposição do ozono no estado de equilíbrio devido a emissões anuais (fluxo em kg.ano⁻¹) de uma quantidade de substância emitida para a atmosfera e a decomposição do ozono no estado de equilíbrio devida a uma quantidade igual de CFC-11 (Heijungs et al. 1992):

$$ODP_i = \frac{\delta[O_3]_i}{\delta[O_3]_{CFC-11}} \ [CFC - 11\ equivalente] \quad (3.5)$$

Onde:

ODP_i – Representa o potencial de depleção da camada de ozono de uma substância;

$\delta[O_3]_i$ – Mudança na coluna de ozono no estado de equilíbrio devido às emissões anuais de uma substância (i);

$\delta[O_3]_{CFC-11}$ – É a mudança na coluna de ozono no estado de equilíbrio devido às emissões anuais de CFC-11.

O efeito de depleção da camada de ozono é quantificado pela seguinte expressão:

$$Depleção\ do\ ozono = \sum_i ODP_i \times m_i \quad [kg\ de\ CFC - 11\ equivalente] \quad (3.6)$$

Onde m_i é a massa da substância emitida (i).

3) Acidificação

O potencial de deposição de ácido no solo e na água é o objecto da classificação para acidificação. As substâncias que mais contribuem para a acidificação são o SO₂, NO_x e NH_x (Cavenaghi, V., 2015).

Segundo Heijungs et al. (1992) um potencial de acidificação (AP – *Acidification potential*) pode ser desenvolvido por analogia ao GWP e ODP. Nestes modos, o potencial de acidificação pode ser expresso da seguinte maneira:

$$AP_i = \frac{v_i/M_i}{v_{SO_2}/M_{SO_2}} \quad [SO_2\ equivalente] \quad (3.7)$$

Onde:

AP_i – Indicador do potencial de acidificação de uma substância (i);

v_i – Número de potencial H⁺ equivalente de uma substância (i);

M_i – Unidade de massa da substância (i);

v_{SO_2} e M_{SO_2} – Parâmetros correspondentes ao dióxido sulfúrico SO₂ que é a substância de referência.

As substâncias de acidificação podem ser agrupadas com o potencial de acidificação pela expressão:

$$Acidificação = \sum_i AP_i \times m_i \quad [kg\ de\ SO_2\ equivalente] \quad (3.8)$$

Onde m_i é a massa da substância emitida (i).

4) Eutrofização

Segundo Heijungs et al. (1992) eutroficação, é o enriquecimento da água ou solo em nutrientes, azoto (N) e fósforo (P), que podem causar uma indesejável mudança na composição de espécies nos ecossistemas e uma redução na diversidade ecológica. Nas águas superficiais a mudança na gama de espécies é geralmente evidente pelo rápido crescimento das algas, o que pode levar a um déficit de oxigénio, com os consequentes efeitos na flora e fauna.

O potencial de eutroficação (NP – *Nutrifcation Potential*) pode ser derivado para todas substâncias com potencial de eutrofização. Este factor é definido pela seguinte expressão:

$$NP_i = \frac{v_i/M_i}{v_{PO_4^{3-}}/M_{PO_4^{3-}}} \quad [N \text{ equivalente}] \quad (3.9)$$

Onde:

NP_i – Indica o potencial de eutrofização do ambiente aquático de uma substância(i);

v_i – Potencial de biomassa em equivalentes de azoto (N);

M_i – Quantidade emitida de substância

$v_{PO_4^{3-}}$ e $M_{PO_4^{3-}}$ – São os parâmetros correspondentes a uma substância de referência, como o PO_4^{3-} .

O potencial de eutrofização é usado para agregar emissões de substâncias com potencial de eutrofização da seguinte forma:

$$Eutrofização = \sum_i NP_i \times m_i \quad [kg \text{ de } N \text{ equivalente}] \quad (3.10)$$

Onde m_i é a massa da substância (i).

Por analogia, pode-se usar a mesma expressão para a eutrofização por fósforo, alterando o factor v_i para um indicador do potencial de biomassa em equivalentes de fosforo e a unidade passa a ser quilograma de fósforo equivalentes (kg P eq.).

5) Radiação ionizante

A radiação ionizante é expressa como o número de átomos desintegrando por unidade de tempo. Diferentes formas de radiação podem ser libertas pela desintegração radioactiva: raios alfa, beta, gama, raios X e radiação de neutrões (Heijungs et al. 1992).

A classificação deste aspecto será impossível enquanto os dados de emissão de substâncias radioactivas não forem incluídos na análise do inventário.

A dose colectiva causada pela emissão de um radionuclídeo é também o ponto a partir do qual o factor de caracterização no nível do ponto médio é derivado. No seu relatório de caracterização do ReCipe em 2016, apresentam um factor de caracterização do ponto médio, denominado Potencial de Radiação Ionizante (*IRP – Ionizing Radiation Potential*), relativo à emissão da substância de referência Cobalto-60 para o ar, produzindo um factor de ponto médio em equivalentes de Co-60 para o ar, de acordo com a seguinte equação:

$$IRP = \frac{CD_{x,i}}{CD_{Co-60,ar}} \quad [Co - 60 \text{ equivalentes}] \quad (3.11)$$

Onde:

IRP é o potencial de radiação ionizante de 1kBq de uma substância emitida para o compartimento (i);

$CD_{x,i}$ é a dose colectiva causada pela libertação da substância para o compartimento;

$CD_{Co-60,ar}$ é a dose colectiva causada pela libertação de um 1kBq de C0-60 para o ar.

Assim, a radiação ionizante é definida pela seguinte expressão:

$$Radiação\ ionizante = \sum_i IRP_i \times m_i \quad [kg\ de\ Co - 60\ equivalente] \quad (3.12)$$

Onde m_i é a quantidade da substância emitida em kg.

6) Formação de material particulado

Material particulado fino com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM2,5) representa uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas. O PM2,5 causa problemas de

saúde humana, pois atinge a parte superior das vias aéreas e dos pulmões quando inalado. Aerossóis secundários de PM_{2,5} são formados no ar a partir de emissões de dióxido de enxofre (SO₂), amónia (NH₃) e óxidos de nitrogénio (NO_x), entre outros elementos (ReCipe, 2016).

De acordo com ReCipe (2016), partículas com diâmetros de 2,5 a 10 µm (PM₂ – PM₁₀) estão relacionadas à morbidade respiratória.

O potencial de formação de material particulado (PMFP – *Particulate matter formation potentials*) é obtido através da seguinte expressão (ReCipe, 2016):

$$PMFP_{x,i} = \frac{iF_{x,i}}{iF_{PM2,5,world}} [PM2,5 \text{ equivalente}] \quad (3.13)$$

Onde:

$PMFP_{x,i}$ – Indica o potencial de formação de material particulado de uma substância (i);

$iF_{x,i}$ – É a taxa de ingestão de material particulado fino devido as emissões na região (i) determinada pela substância (x);

$iF_{PM2,5,world}$ – É a média mundial ponderada pelas emissões de PM_{2,5}.

A taxa de ingestão pode ser definida como a soma da variação na taxa de ingestão de uma substância precursora uma região. Este factor é calculado de acordo com a seguinte fórmula (ReCipe, 2016):

$$iF_{x,i} = \frac{\sum_j dC_j \cdot N_j \cdot BR}{dM_{x,i}} \quad (3.14)$$

Onde:

dC_j – É a variação da concentração de PM_{2,5} em cada região receptora;

N_j – Indica a população na região receptora (j);

BR – É a taxa média respiratória por pessoa;

$dM_{x,i}$ – É a variação da emissão de uma substância precursora na região (i).

7) Ecotoxicidade

Os ecossistemas terrestres e aquáticos são o ponto final na classificação da ecotoxicidade (Heijungs et al., 1992).

Segundo ReCipe (2016) o potencial de toxicidade expresso em kg 1,4-diclorobenzeno equivalente (kg 1,4DCB-eq) é usado como factor de caracterização para o nível de ponto médio para a ecotoxicidade terrestre, da água e marinha. O factor de caracterização específico do compartimento consiste em um factor de destino (FF) e um factor de efeito (EF):

$$ETP_{x,i,j,c} = \sum_g \frac{FF_{x,i,j,g,c} \times EF_{x,j,c}}{FF_{DCB,ref,j,g,c} \times EF_{DCB,j,c}} \quad (3.15)$$

Onde:

$ETP_{x,i,j,c}$ – É o potencial de toxicidade ecológica para o comportamento receptor j (água doce, marinho ou terrestre) do produto químico x emitido no compartimento i, transportado para o compartimento receptor j, relacionado a perspectiva cultural c [(kg 1,4DCB-eq para água doce para a ecotoxicidade da água, para o mar para a ecotoxicidade marinha e para o solo para a ecotoxicidade do terrestre)/kg];

$FF_{x,i,j,g,c}$ – É o factor de destino, definido como a mudança marginal na massa em estado estacionário da substância x em um comportamento ambiental j na escala g devido a uma emissão marginal no comportamento i para a perspectiva cultural c (em anos);

$EF_{x,j,c}$ – É o factor de efeito (m^3/kg para a ecotoxicidade marinha e de água doce e m^2/kg para ecotoxicidade terrestre), representando a mudança na Fracção Potencialmente Desaparecida de espécies devida a mudança na concentração ambiental da substância x no compartimento receptor j para a perspectiva cultural c.

$FF_{DCB,ref,j,g,c}$ e $EF_{DCB,j,c}$ – São os factores acima descritos relativos a substância de referência diclorobenzeno.

Assim a ecotoxicidade é definida pela seguinte expressão:

$$Ecotoxicidade = \sum_x ETP_{x,i,j,c} \times m_x \text{ [kg 1,4DCB - eq]} \quad (3.16)$$

Onde m_x é a quantidade da substância x emitida (em kg).

A Toxicidade humana

De acordo com Heijungs et al., (1992) o Homem é o fim último da classificação da toxicidade humana. O factor de efeito E, é dividido em E_a , E_w e E_s , para efeitos de ingestão directa através do ar e da água e indirecta através do solo. Estes factores de efeito são calculados utilizando valores do *ADI (Acceptable Daily Intake)*, que são definidos pela WHO e valores de *TDI (Tolerable Daily Intake)*. Além disso, o nível máximo tolerável de risco toxicológico humano é utilizado para substâncias tóxicas cancerígenas.

Os factores de classificação taxológicos humanos para o ar, água e solo (*HCA*, *HCW* e *HCS*) são definidas como se segue:

$$HCA = B_a \times E_a \quad (3.17)$$

$$HCW = B_w \times E_w \quad (3.18)$$

$$HCS = B_s \times E_s \quad (3.19)$$

Onde B_a , B_w e B_s são Factores de exposição para o ar, água e solo, respectivamente.

Estes factores representam a quantidade relativa de uma substância à qual os seres humanos são expostos através de cada meio (ar, água e solo).

Em um estudo de produto, os factores de classificação para ar, água e solo podem ser usados para calcular uma pontuação única de efeito para toxicidade humana para cada produto, independentemente do meio. Baseado nas emissões da substância, a pontuação única de efeito para toxicidade humana é definida pela seguinte expressão (Heijungs et al., 1992):

$$Toxicidade\ humana = \sum_i \left((HCA_i \times m_{a,i}) + (HCW_i \times m_{w,i}) + (HCS_i \times m_{s,i}) \right) \quad (3.20)$$

Onde:

$m_{a,i}$, $m_{w,i}$ e $m_{s,i}$ – São emissões de uma substância (i) para a atmosfera, água e solo, respectivamente;

HCA_i , HCW_i e HCS_i – São Os factores de classificação taxológicos humanos para o ar, água e solo, respectivamente.

A toxicidade humana é medida em kg de peso do corpo.

8) Utilização do solo

Esta categoria de impacto concentra-se na perda relativa de espécies devido ao uso local de terra, que abrange os processos de transformação, ocupação e relaxamento da terra (ReCipe, 2016), como ilustrado no gráfico abaixo.

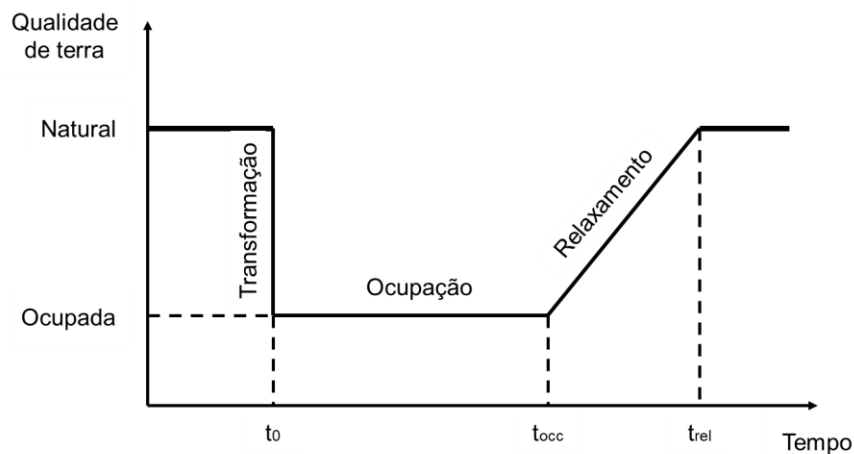


Figura 13: Esquema geral das três fases do uso de terra. (Fonte: Adaptado de ReCipe, 2016).

Na fase da transformação a terra é adequada para a sua nova função, por exemplo, removendo a vegetação original. Durante a fase da ocupação, a terra é utilizada por um determinado período. Depois que a terra deixa de ser usada, entra a fase do relaxamento, durante a qual a terra pode retornar a um estado natural (ou seminatural), (ReCipe, 2016).

O factor de caracterização é medido em cultivos anuais equivalentes (*crop-eq*) e é proporcional a perda de espécies resultante da produção agrícola anual. Este factor pode ser calculado utilizando a seguinte expressão:

$$FCm_{occ,x} = \frac{S_{rel,x}}{S_{rel,anualcrop}} \quad [crop\ equivalente] \quad (3.21)$$

Onde:

$FCm_{occ,x}$ – É o factor de caracterização para a ocupação da terra;

$S_{rel,x}$ – É a perda relativa das espécies causada pelo tipo de uso de terra;

$S_{rel,anualcrop}$ – É a perda relativa das espécies resultantes da produção agrícola.

Segundo ReCipe (2016) o factor $S_{rel,x}$ é calculado comparando dados de campo sobre as riquezas das espécies locais em tipos específicos de coberturas de terra naturais e artificiais, usando a relação lineais descrita por Köllner et al (2007):

$$S_{rel,x} = 1 - \frac{S_{LU,x,i}}{S_{ref,i}} \quad (3.22)$$

Onde:

$S_{LU,x,i}$ – É o número de espécies observadas sob o tipo de uso de terra (x);

$S_{ref,i}$ – É o número de espécies observadas da cobertura de terra de referência na região (i).

A uso do solo é medida utilizando a seguinte expressão:

$$Uso\ de\ Solo = \sum_x FCm_{occ,x} \cdot A_x \quad [crop\ m^2\ equivalente] \quad (3.23)$$

Onde A_x é a área ocupada (m²).

9) Depleção de recursos fósseis

A categoria de impacto é avaliada a partir da comparação entre a actual matriz de combustíveis fósseis comparada com uma matriz fóssil não convencional, economicamente mais cara, mas ecologicamente mais correcta (ReCipe, 2008).

Segundo ReCipe (2008) o factor de caracterização do ponto médio é baseado no conteúdo energético (maior poder calorífico).

$$CF_{midpoint,i} = \frac{CED_i}{CED_{ref}} \quad (3.24)$$

Onde:

$CF_{midpoint,i}$ – É o factor de caracterização de um recurso não renovável i (em kg equivalentes de petróleo/unidade de recurso i);

CED_i – É o indicador de demanda cumulativa de energia do recurso não renovável i (em MJ/unidade de recurso i);

CED_{ref} – É o indicador de demanda cumulativa de energia do recurso petrolífero de referência (em MJ/kg de petróleo).

Esta categoria de impacto é medida através da seguinte expressão:

$$Depleção\ de\ recursos\ fósseis = \sum_i CF_{midpoint,i} \cdot m_i \ [kg\ de\ óleo\ equivalente] \quad (3.25)$$

Onde m_i é a massa de petróleo extraído.

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

10) Depleção de recursos minerais

O factor de caracterização para a escassez de recursos minerais é o Potencial Excedente de Minério (SOP – *Surplus Ore Potential*). Este factor expressa a quantidade extra média de minério a ser produzida no futuro devido à extracção de 1 kg de um determinado mineral, considerando toda produção futura desse recurso mineral em relação à quantidade extra média de minério produzida no futuro devida a extracção de 1 kg de Cobre (Cu), considerando toda produção futura do cobre (ReCipe, 2016). Este factor pode ser definido de acordo com a seguinte expressão:

$$SOP_{x,R} = \frac{ASOP_{x,R}}{ASOP_{Cu,R}} \quad [kg\ de\ Cu\ equivalente] \quad (3.26)$$

Onde:

$ASOP_{x,R}$ – É o potencial absoluto excedente de minério no mineral (x) na reserva (R) (kg minério/kg x);

$ASOP_{Cu,R}$ – É o potencial absoluto excedente de cobre na reserva (R) (kg Cu/kg x).

O impacto da escassez de recursos minerais é obtido através da expressão a seguir:

$$Depleção\ de\ recursos\ minerais = \sum_x SOP_{x,R} \quad [kg\ de\ Cu\ equivalente] \quad (3.27)$$

Sendo $SOP_{x,R}$ o potencial excedente de um minério (x) numa reserva (R).

11) Consumo de Água

A água é um recurso escasso em muitas partes do mundo, mas também um recurso muito abundante em outras partes. Ao contrário de outros recursos, não existe um mercado global que garanta uma distribuição global.

ReCipe 2008 propõe ter um indicador de ponto médio que simplesmente expresse a quantidade total de água utilizada. O factor de caracterização (FC) é m³ de água consumida por m³ de água extraída.

$$FC = \begin{cases} 1 & \text{se o inventário está em } m^3 \text{ consumidos} \\ Taxa\ necessária\ de\ água & \text{se o inventário está em } m^3 \text{ consumidos} \end{cases} \quad (3.28)$$

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo segue-se com a apresentação dos resultados obtidos na pesquisa e suas interpretações. Os resultados estão divididos nas duas abordagens do método *ReCipe* descritas no terceiro capítulo. Estes resultados estão apresentados em forma de gráficos contendo os impactos e danos gerados pelos dois sistemas de produto (motor utilizando gásóleo e motor utilizando biodiesel de *jatropha*), acompanhados das suas respectivas interpretações.

4.1 Relevância dos resultados

Como visto no terceiro capítulo, a metodologia *Endpoint* permite normalizar os impactos ambientais relacionados a macro segmentos como saúde humana, biodiversidade e uso de recursos finitos. Com base nos resultados a nível desta abordagem, torna-se possível identificar quais são os impactos mais relevantes de maneira a priorizá-los para efeitos de comparação.

4.1.1 Saúde humana

O gráfico a seguir relaciona os impactos de cada sistema de produto aos anos de vida ajustados por incapacidade. A unidade DALY utilizada nesta categoria de dano relaciona os anos de vida perdidos por morte precoce e anos vividos com incapacidade por conta da exposição a agentes poluentes.

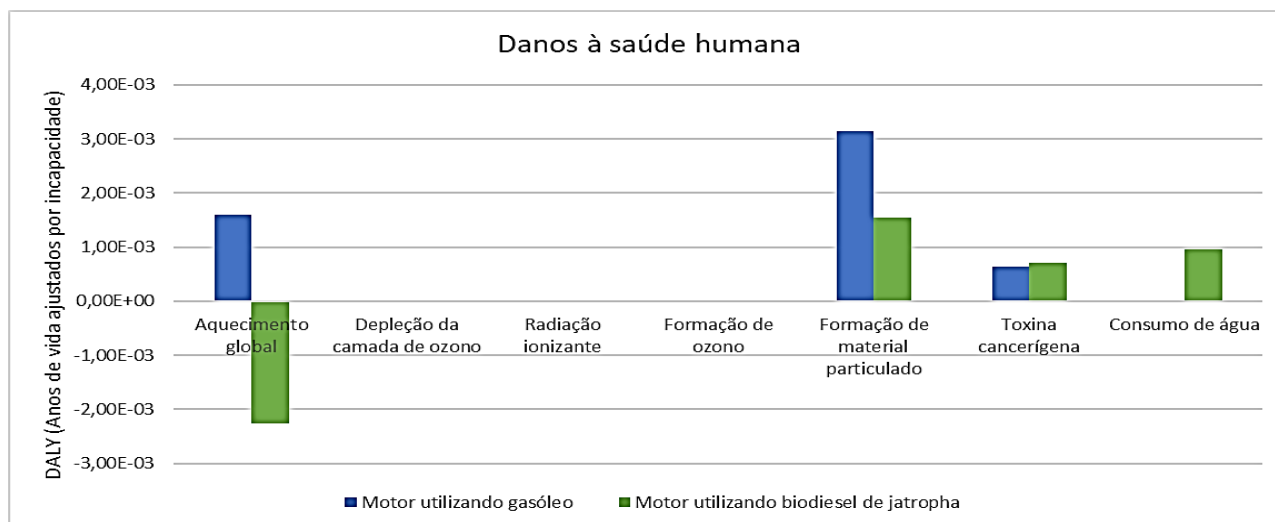


Gráfico 1: Resultados dos danos à saúde humana. (Fonte: Autor)

O uso de biodiesel de *jatropha* reduz as emissões de gases de efeito estufa em comparação com o gásóleo, o que contribui para mitigar o aquecimento global e seus efeitos indirectos na saúde, como ondas de calor e doenças respiratórias.

A queima de gásóleo gera maior quantidade de partículas finas (PM2.5), que são associadas a doenças respiratórias e cardiovasculares. O biodiesel, embora também gere partículas, emite menos material particulado prejudicial.

A respeito dos danos à saúde humana por formação de toxinas cancerígenas ambos os combustíveis têm impacto semelhante, mas o gásóleo ainda é ligeiramente pior. Combustíveis fósseis liberam compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), com potencial carcinogénico. O biodiesel conter menos desses compostos.

O sistema do motor utilizando biodiesel de *jatropha*, consome muita água o que cria uma escassez e competição pelo recurso com as comunidades locais, reduzindo o acesso a água potável. Nesta categoria de impacto o sistema do motor utilizando gásóleo não causa nenhum dano significativo à saúde humana.

Quanto a depleção da camada de ozono, a radiação ionizante e a formação de ozono, nenhum dos dois combustíveis mostra impacto significativo nestas categorias. Assim, as categorias que têm maior relevância na comparação entre os dois sistemas de

produto são o aquecimento global, a formação de material particulado, formação de toxinas cancerígenas humanas e o consumo de água.

4.1.2 Biodiversidade

Abaixo encontra-se o gráfico que ilustra os impactos gerados pela utilização dos dois combustíveis em relação ao número de espécies biológicas afectadas em função dos anos de exposição.

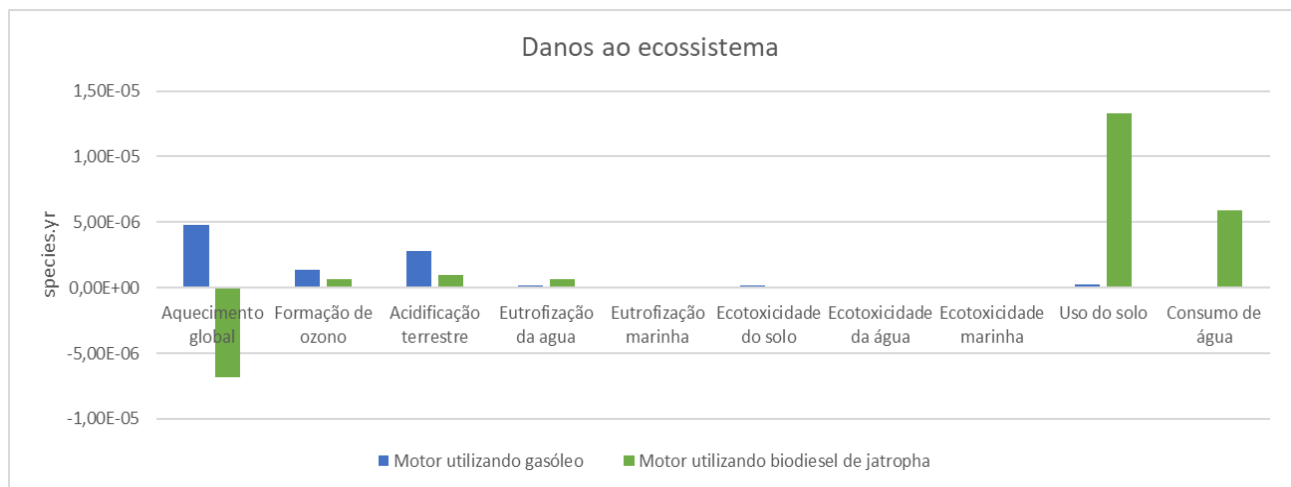


Gráfico 2: Resultados dos danos ao ecossistema. (Fonte: Autor)

O motor utilizando biodiesel de *jatropha* emite menos gases de efeito estufa que o gasóleo fóssil, contribuindo para mitigar mudanças climáticas que afectam habitats e a sobrevivência de espécies.

O biodiesel de *jatropha* causa menos dano à biodiversidade relacionado à formação de ozono troposférico que a utilização do gasóleo. O ozono em baixa altitude é tóxico para plantas e animais, afectando directamente os ecossistemas, especialmente florestas e plantações.

A chuva ácida altera o pH do solo e da água, prejudicando a vegetação, microorganismos e vida aquática. O biodiesel de *jatropha* emite menos óxidos de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogénio (NO_x) responsáveis pela acidificação do solo e da água, o que favorece a preservação de espécies sensíveis ao pH.

A utilização do biodiesel de *jatropha* resulta em maior eutrofização da água doce, comprometendo a qualidade dos corpos d'água e a biodiversidade aquática. Este resultado é causado pela fase agrícola deste sistema.

O cultivo de *jatropha* requer grandes áreas de terra, o que pode levar ao desmatamento, degradação de habitats naturais e substituição de ecossistemas nativos por monoculturas, afectando directamente a biodiversidade.

A irrigação do cultivo da *jatropha* consome grandes volumes de água, impactando a disponibilidade hídrica de ecossistemas aquáticos e terrestres e comprometendo a biodiversidade.

A ecotoxicidade da água e do solo, eutrofização marinha e ecotoxicidade marinha não têm impactos expressivos à biodiversidade. Assim é apenas relevante considerar o aquecimento global, formação de ozono, formação de chuvas ácidas, eutrofização da água doce, o uso do solo e consumo de água na comparação dos impactos dos dois sistemas.

4.1.3 Escassez de recursos esgotáveis

Os impactos aos recursos não renováveis dos dois sistemas de produto, associados aos custos ambientais ou impactos monetizados dos dois ciclos de vida, são ilustrados no gráfico a seguir. A unidade USD2013 refere-se ao valor monetário de danos ambientais ou custos externos expressos em dólares americanos corrigidos para o ano de 2013.

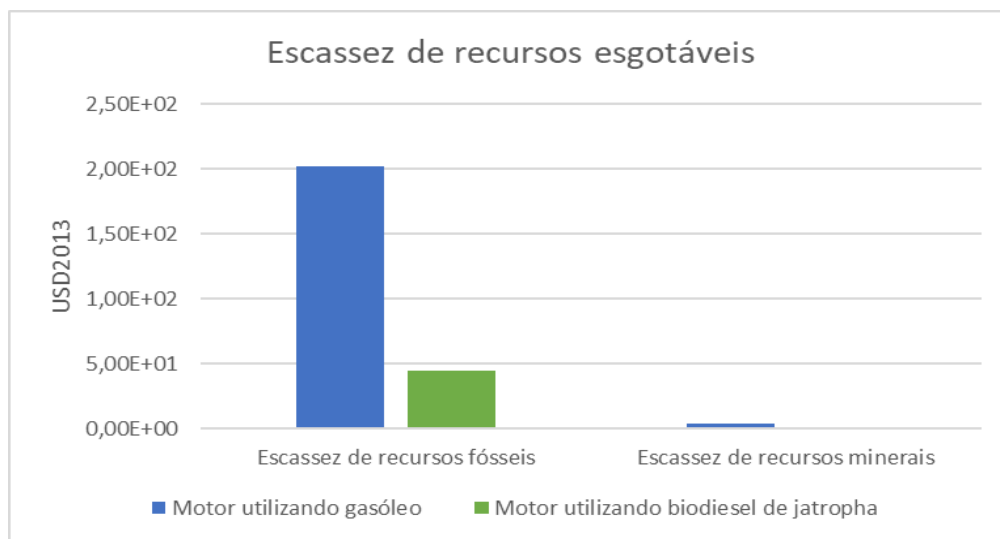


Gráfico 3: Resultados da escassez dos recursos esgotáveis. (Fonte: Autor)

Com base nos resultados, percebe-se que o único impacto relevante no aspecto de escassez de recursos é a depleção fóssil. Como é destacado, esse resultado é esperado principalmente para o sistema do motor utilizando gasóleo, tendo em conta que sua matéria-prima, o petróleo, é um recurso natural e não-renovável. O sistema do motor utilizando o biodiesel de *jatropha* contribui para a escassez de recursos fósseis por conta da utilização de combustível fóssil durante o transporte e distribuição para os postos de abastecimento.

4.2 Análise comparativa

De acordo com a análise de relevância das categorias de impacto, a análise comparativa do motor utilizando gasóleo e utilizando biodiesel de *jatropha* será feita considerando 10 das 18 categoria de impacto, a saber: aquecimento global, depleção da camada de ozono, formação do ozono, formação de material particulado, toxinas cancerígenas humanas, acidificação terrestre, eutrofização da água doce, uso do solo, escassez de recursos fósseis e consumo de água.

No gráfico a seguir faz-se uma comparação percentual dos impactos dos dois sistemas de produto, através da caracterização no *SimaPro*.

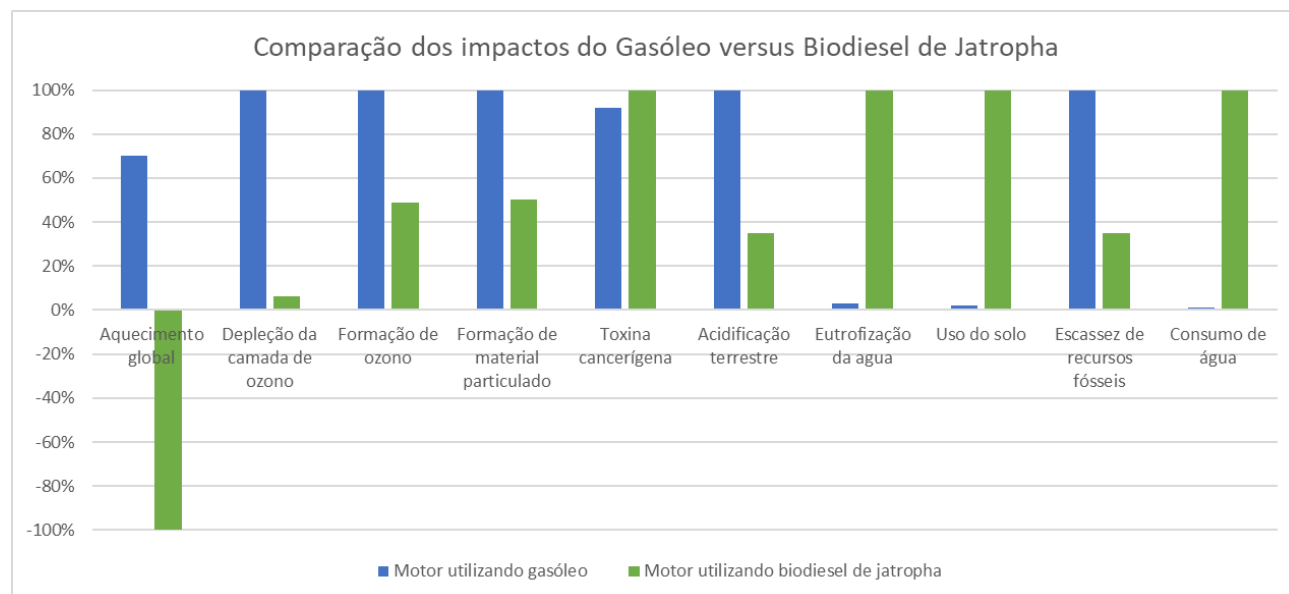


Gráfico 4: Resultados da comparação dos impactos ambientais do motor utilizando gasóleo e biodiesel de *jatropha*. (Fonte: Autor)

A seguir, faz-se a análise dos resultados desta comparação.

I. Aquecimento global

Quanto a pegada do carbono o motor funcionando com biodiesel de *Jatropha* é muito melhor que o motor funcionando com o gasóleo, pois este sistema consegue não só sequestrar toda quantidade de CO₂ equivalente de todo o seu ciclo de vida, como consegue sequestrar cerca de 2920 kg de CO₂ adicionais, contribuindo positivamente nesta categoria de impacto, ou seja, a aposta nesta alternativa muda o actual cenário de aumento de temperaturas para um cenário mais ameno (-100%). O sequestro de CO₂ é feito pela planta *Jatropha curcas* durante o período do cultivo.

II. Depleção da camada de ozono

Na depleção da camada de ozono o motor utilizando o gasóleo tem maior impacto que o utilizando o biodiesel de *jatropha*. Observa-se que a utilização do biodiesel causa apenas cerca de 10% de impacto em relação ao causado pela utilização do gasóleo. O ciclo do gasóleo tem as etapas de extracção do petróleo e de refinaria responsáveis pela maior parte da contribuição, devido às emissões de NO_x na extracção e CFCs indirectamente na refinaria, principalmente pelo uso de sistemas de refrigeração antigos.

III. Formação de ozono e material particulado

Quanto ao impacto à saúde humana pela formação de matérias particulados e de agentes formadores de ozono, verifica-se uma redução de cerca de 50% pela utilização do biodiesel de *jatropha* em detrimento da utilização do gasóleo. Em relação à formação de composto de formação de ozono em baixas altitudes, o ciclo do motor utilizando gasóleo destaca-se como resultado de dois principais factores: a queima de combustível na etapa de transporte marítimo do gasóleo e a queima do gasóleo no motor, que resultam na formação de NO_x e compostos orgânicos voláteis sem metano (COVSM), que através de uma reacção fotoquímica formam o ozono. Quanto a emissões de particulados pelo motor utilizando gasóleo tem maior impacto pelas mesmas razões indicadas na formação de ozono. Por isso os resultados são parecidos.

IV. Formação de toxinas cancerígenas

Quanto a formação de toxinas cancerígenas os dois sistemas de produto têm níveis de impacto muito similares, onde a utilização do biodiesel de *Jatropha* se destaca em cerca de 10% a mais. Este destaque deve-se principalmente pela utilização de pesticidas para a protecção contra pragas da plantação, que resulta na emissão de compostos de benzeno, organofosforados e carbonatos que são substâncias reconhecidamente cancerígenas. Estas substâncias podem contaminar o solo e águas subterrâneas ou o ar atmosférico pela volatilidade dos pesticidas.

O sistema do motor utilizando gasóleo tem grande contribuição, nesta categoria pois a extracção do petróleo emite uma série de compostos orgânicos voláteis (COVs) e subprodutos perigosos, incluindo benzeno, naftaleno, entre outros hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), que estão associados a efeitos cancerígenos.

V. Acidificação terrestre

Com relação à formação de chuvas ácidas, a utilização do gasóleo tem maior impacto, sendo mais do que o dobro do causado pela utilização do biodiesel. Esta contribuição deve-se mais ao processo de transporte marítimo, onde queima-se primordialmente o gasóleo. O gasóleo contém enxofre como contaminante e a combustão desta substância gera óxidos de enxofre que ocasionalmente podem formar chuva ácida.

O sistema do biodiesel de *Jatropha* contribui nesta categoria primordialmente durante a distribuição, pois nesta etapa tem-se a queima de combustíveis fósseis como o gasóleo. Pequena parte provem da queima do biodiesel no motor, que resulta na formação de pequenas quantidades de óxidos de enxofre que podem reagir com água da atmosfera e retornar ao solo em forma de chuva ácida.

VI. Eutrofização da água doce

Pelos resultados apresentados no gráfico, nota-se que o ciclo do motor utilizando biodiesel de *Jatropha* causa cerca de 95% a mais de impacto do que o ciclo do motor utilizando gasóleo no aumento de nutrientes em águas doces. A eutrofização da água doce é também conhecida como eutrofização por fonte de fósforo (eutrofização P).

Este resultado é causado pelo processo do cultivo da planta de *Jatropha curcas*. Isso deve-se ao uso de fertilizantes, normalmente baseados em alguma fórmula NPK (Nitrogénio-Fósforo-Potássio) para facilitar o crescimento das plantas. Nem todo o fertilizante é efectivamente consumido pela planta, podendo essa fonte de fósforo entrar no lençol freático ou atingir um curso de água, resultando na eutrofização de rios e lagos. O gasóleo tem pequenas contribuições de fósforo, pois utiliza esse elemento apenas na refinaria do petróleo.

VII. Uso do solo

É notório que o ciclo de vida do biodiesel de *jatropha* acarreta muito mais ocupação e transformação do solo do que o do gasóleo. Esta contribuição deve-se maioritariamente à fase do cultivo das sementes da *Jatropha*, onde é necessário cerca de 1781,04 m² do solo plantado para obter 445,26 kg de sementes. Este cenário leva a utilização do gasóleo a impactar apenas em cerca de 2% em comparação com a utilização do biodiesel de *jatropha*.

VIII. Escassez de recursos fósseis

Quanto a escassez de recursos fósseis a utilização do gasóleo é mais impactante, pois o gasóleo é essencialmente um combustível fóssil, pois deriva do petróleo que é um recurso fóssil. A utilização do biodiesel de *Jatropha* apenas contribui nas etapas de transporte, onde são utilizados combustíveis fósseis.

A utilização do biodiesel de *jatropha* reduz em cerca de 65% a problemática com a depleção dos combustíveis fósseis pela utilização do gasóleo.

IX. Consumo de água

Conforme os resultados, o biodiesel de *jatropha* consome muito mais água que o gasóleo a nível do seu ciclo de vida. Este resultado explica-se pela etapa agrícola que necessita de cerca de 35,98 m³ de água para irrigação considerando os 4 anos necessários para que a plantação cresça adequadamente, até a colheita das sementes. Embora a planta *Jatropha curcas* seja resistente a solos secos, ela precisa de uma boa irrigação para garantir condições mais saudáveis de desenvolvimento das sementes, garantindo maior potencial oleaginoso.

No entanto, nesta categoria o motor utilizando gasóleo tem menor contribuição atendendo que o consumo de água é considerável na etapa da extracção, onde é introduzida nos poços para forçar a saída do petróleo. Cerca de 0,052 m³ de água é utilizada para extrair 266 L de petróleo bruto.

4.3 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 (Ferreira. G. e Carvas. R., 2014).

O método de normalização implica na multiplicação dos valores obtidos para as diversas categorias de impacto por um factor 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. Através da ponderação dos resultados normalizados das categorias de impacto, é possível atribuir pontuações às categorias de impacto consoante o seu peso ou nível de impacto.

A relevância dos impactos é subjectiva à percepção ou interesse de cada individuo ou entidade, assim, é importante atribuir pontos ou pesos de modo a reduzir essa subjectividade e determinar ao todo, qual dos sistemas tem maior impacto ambiental e quais categorias têm mais influência.

O gráfico abaixo ilustra, em pontuações das categorias de impacto, o resultado geral dos impactos dos ciclos de vida dos sistemas do motor utilizando o gasóleo e do motor utilizando biodiesel de *jatropha*.

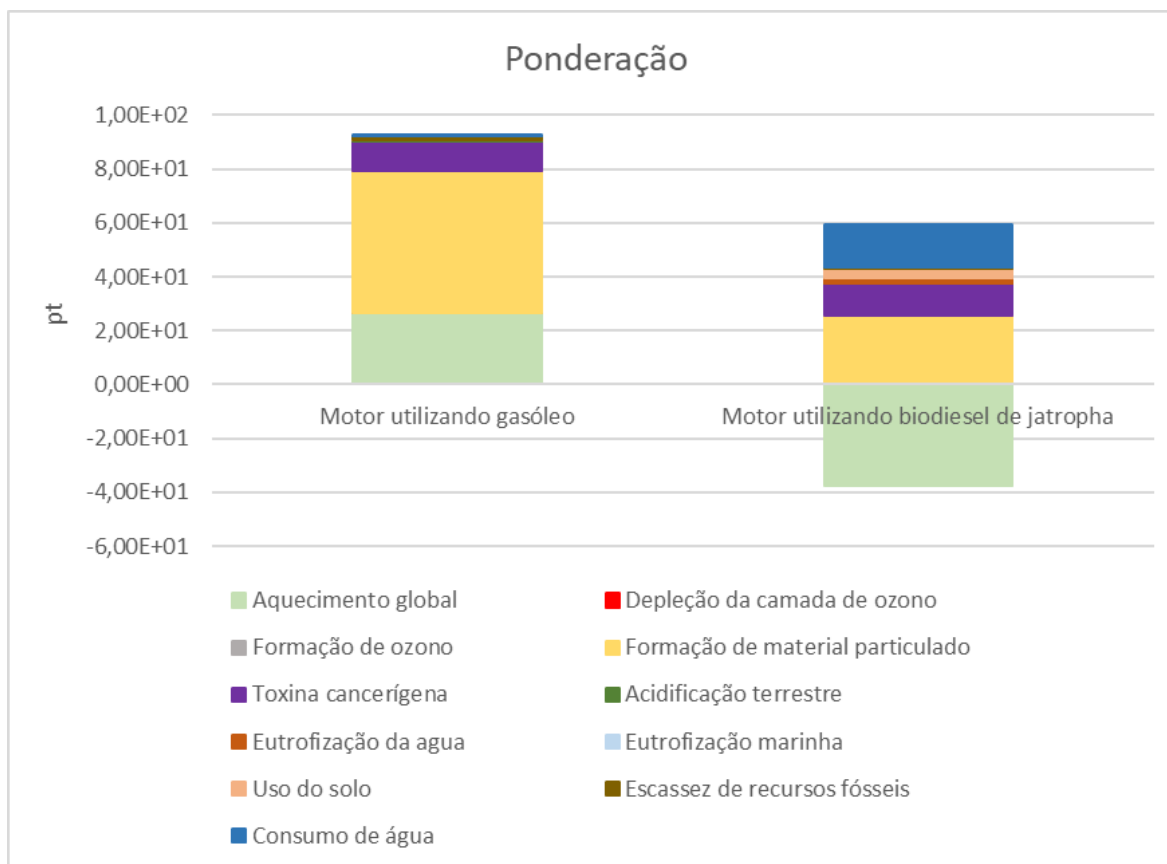


Gráfico 5: Comparação geral dos impactos ambientais do motor utilizando gásóleo e biodiesel de jatropha. (Fonte: Autor)

Analisando as pontuações obtidas após ponderação, 92,47 pontos do motor utilizando gásóleo e 59,49 pontos do motor utilizando biodiesel de *jatropha*, verifica-se que o ciclo de vida do biodiesel de *jatropha* reduz em cerca de 37% os impactos ambientais em comparação com o ciclo de vida do gásóleo.

Este resultado é verificado pois o impacto do ciclo de vida do gásóleo é maior em 7 das 10 categorias de impacto consideradas na comparação dos dois sistemas de produto. O sistema do motor utilizando gásóleo tem três categorias mais afectadas, o aquecimento global, a formação de material particulado e de toxinas cancerígenas, devido a emissão de grandes quantidades de CO₂, NO_x, COVSM e durante todo ciclo de vida e substâncias com efeito cancerígeno como o benzeno e o naftaleno durante a extracção do petróleo.

O motor utilizando biodiesel de *jatropha* tem mais impacto em quatro categorias: uso de solo, consumo de água, formação de material particulado e de toxinas cancerígenas. Pode-se, também, observar que a nível da formação de material particulado e toxinas

cancerígenas, a utilização do biodiesel de *jatropha* não apresenta nenhuma ou significativa vantagem, pois têm pontuações parecidas em relação aos níveis de contribuições gerados pelo sistema do motor utilizando gasóleo.

CAPÍTULO V

5 ANÁLISE ECONÓMICA

A avaliação económica de alternativas energéticas é fundamental para complementar a análise ambiental, especialmente em contextos onde os recursos financeiros e a infraestrutura são limitados. Neste capítulo, será realizada uma comparação económica entre o uso de gasóleo e biodiesel de *Jatropha curcas* no motor de combustão interna, nas mesmas condições assumidas na análise ambiental.

5.1 Objectivo da Análise Económica

O principal objectivo desta análise é estimar e comparar os custos associados ao ciclo de vida de ambos os combustíveis.

5.2 Metodologia da avaliação económica

Esta análise económica é feita com base no custo por unidade de energia útil, isso é possível através da conversão dos custos para um valor por unidade de energia útil (por MJ ou kWh), considerando o poder calorífico inferior (PCI) de cada combustível e o rendimento do motor em cada caso.

5.3 Estimativa de custo dos combustíveis

Para se poder estimar o custo considerou-se os aspectos descritos abaixo, para o gasóleo e o biodiesel de *jatropha*.

✓ Gasóleo

Para o gasóleo em Moçambique, não é necessário estimar o preço considerando o custo de cada etapa, visto que, este já existe no seu preço final. Assim importa considerar apenas o preço final ao consumidor e custos operacionais por litro consumido.

Este dado pode ser obtido directamente através de endereços oficiais da Autoridade Reguladora de Energia (ARENE), entidade reguladora do preço de combustíveis em Moçambique.

✓ **Biodiesel de Jatropha**

Uma vez que este combustível ainda não é produzido em Moçambique, é necessário fazer uma estimativa do seu custo. Esta estimativa terá em consideração os custos por cada etapa:

- ✓ Custo de cultivo por hectare (incluindo sementes, fertilizantes, irrigação, mão de obra);
- ✓ Custos de colheita e extracção de óleo;
- ✓ Custo do processo de transesterificação (incluindo reagentes, energia e equipamentos);
- ✓ Custo de transporte e distribuição;
- ✓ Preço por litro de biodiesel no ponto de consumo.

Na tabela abaixo, apresentam-se os custos com base nas principais etapas do ciclo de vida do biodiesel de Jatropha. Estes custos são adaptados de *Econergy International Corporation, et al* (2008) e FUNAE (2011).

Tabela 4: Estimativa de custos de cada etapa do ciclo de vida do biodiesel de jatropha. (Fonte: Autor)

Etapas	Custo estimado	Observações
Cultivo da Jatropha	0,35 (USD/semente)	Inclui preparação do solo (fertilização), plantio, irrigação, manutenção e colheita; produtividade média: 2 ton sementes/ha/ano.
Extracção do óleo	0,30 (USD/L)	Inclui prensagem mecânica; rendimento médio de 30% de óleo por massa de semente.
Transesterificação	0,45 (USD/L)	Inclui metanol, catalisadores (KOH ou NaOH), energia, água e mão-de-obra.
Transporte e distribuição	0,15 (USD/L)	Transporte até ponto de venda ou uso.

Custos indirectos	0,25 (USD/L)	Depreciação de máquinas, gestão e perdas, margens.
Total (base)	1,50 (USD/L)	Preço base do biodiesel de Jatropha sem considerar os impostos e margem do revendedor.

Para obter o custo final estimado do biodiesel deve-se incluir os impostos e margens dos retalhistas obtidos em função do litro de combustível.

$$Custo\ final = Custo\ base + Impostos + Margem \quad (5.01)$$

Em Moçambique, os impostos sobre os combustíveis são calculados em função do Imposto sobre Consumos Específicos (ICE) e do Imposto sobre o Valor Adicionado (IVA). Além disso, há um Imposto sobre a Rentabilidade (IR). O ICE é um imposto fixo por litro, enquanto o IVA é calculado sobre o preço final do combustível (CIP, 2022).

A margem de lucros dos retalhistas em Moçambique é regulamentada pelo governo e é fixada por litro de combustível (CIP, 2022). Este valor corresponde a uma produção em pequena escala e pode ser reduzido com economias de larga escala, mecanização e infraestrutura.

5.4 Cálculo da energia útil por litro

A energia útil considera o poder calorífico do combustível (energia bruta por litro) e a eficiência do motor ao converter essa energia em trabalho mecânico.

$$Energia\ útil = PCI \times \eta_e \text{ (MJ/L)} \quad (5.02)$$

Onde:

PCI – É o poder calorífico inferior do combustível;

η_e – É a eficiência energética do motor.

Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, o poder calorífico inferior (PCI) do gasóleo automotivo é de ordem de 43 MJ/L.

O PCI do biodiesel de *Jatropha curcas* é em média de 37 MJ/L, como descrito no segundo capítulo deste trabalho.

A eficiência térmica de motores Diesel modernos varia entre 35% e 42%, dependendo de diversos factores como design do motor, sistema de injeção, turbo alimentação e condições de operação. Considerando as especificações do motor escolhido (B57D30) e sua aplicação em um veículo ligeiro, a eficiência estima-se em 35% (Revista Auto, 2024).

5.5 Custo por unidade útil de energia

O custo por unidade útil de energia pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$\text{Custo por MJ útil} = \frac{\text{Custo por litro}}{\text{Energia útil por litro}} (\text{MZN/MJ}) \quad (5.03)$$

5.6 Resultados da análise económica

Os resultados da análise económica estão apresentados na seguinte tabela:

Tabela 5: Resultados da análise económica (Fonte: Autor)

Combustível	Gasóleo	Biodiesel de Jatropha
Custo por litro (MZN/L)	86,66	129,36
PCI (MJ/L)	43	37
Eficiência do motor	35%	35%
Energia útil (MJ/L)	15,05	12,95
Custo por MJ útil (MZN/MJ)	5,74	10,20
Custo para a unidade funcional de 1000 km (MZN)	8.666,31	14.371,43

O gasóleo apresenta um custo estimado por energia útil aproximadamente 42,7% menor que o biodiesel de Jatropha. Isso significa que por cada unidade de energia aproveitada pelo motor, o uso do biodiesel de Jatropha é mais caro que o gasóleo.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo principal realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre a utilização de gasóleo e biodiesel produzido na base da *Jatropha curcas* como combustíveis em motor de combustão interna, utilizando o programa computacional *SimaPro* e com base nas directrizes estabelecidas pela norma ISO 14040. A partir da aplicação dessa metodologia, foi possível modelar os dois sistemas de produto, quantificar e comparar os impactos ambientais associados a cada um dos sistemas. Adicionalmente, foi realizada uma análise económica comparativa baseada no custo por unidade energética útil.

Através do método *ReCipe* na abordagem *midpoint* definiram-se as categorias de impacto mais relevantes para a análise comparativa, a saber: aquecimento global, depleção da camada de ozono, formação do ozono, formação de material particulado, toxinas cancerígenas humanas, acidificação terrestre, eutrofização da água doce, uso do solo, escassez de recursos fósseis e consumo de água. O método de avaliação *ReCiPe midpoint* foi fundamental para evidenciar as diferenças nos impactos ambientais, permitindo uma caracterização clara dos pontos críticos de cada sistema.

Os resultados obtidos indicam que o biodiesel de *Jatropha* apresenta vantagens ambientais significativas em diversas categorias de impacto, especialmente na relacionada às mudanças climáticas, devido às menores emissões de gases de efeito estufa durante o seu ciclo de vida e capacidade de sequestro de CO₂ durante o cultivo da *jatropha*. A utilização do biodiesel de *Jatropha* reduz significativamente os impactos ambientais no geral.

A produção e utilização do biodiesel de *Jatropha* também apresentam desafios, como impactos associados à ocupação e transformação de solo, o uso de fertilizantes, além de uma dependência considerável das condições agrícolas e logísticas locais. Este sistema

mostrou-se, também, com maior potencial de formação de toxinas cancerígenas principalmente por conta da utilização de pesticidas na fase agrícola de produção do biodiesel.

Do ponto de vista económico, o gasóleo ainda se mostra vantajoso em termos de custo por unidade energética útil, devido ao seu maior poder calorífico (43 MJ/L) e menor custo por litro (1.36 USD/L) o que pode condicionar a viabilidade da utilização do biodiesel de *Jatropha*.

Conclui-se, portanto, que o biodiesel de *Jatropha* constitui uma alternativa ambientalmente mais sustentável ao gasóleo, especialmente em contextos onde a planta pode ser cultivada de forma eficiente.

6.2 Recomendações

Com vista uma melhor sustentabilidade da implementação do biodiesel de *jatropha* em Moçambique, melhorar a abordagem do tema desenvolvido adequando a uma realidade distinta, seguem-se as seguintes recomendações:

- ✓ Associar as vantagens ambientais aos aspectos económicos e sociais, para que o uso do biodiesel seja expandido de forma sustentável;
- ✓ Promover uma cadeia de cultivo da *jatropha* mais eficiente que acarreta menor uso de fertilizantes e pesticidas de modo a reduzir as emissões de substâncias cancerígenas;
- ✓ Melhorar a qualidade dos dados de inventário utilizados, através de estudos mais detalhados, para aumentar a precisão dos resultados obtidos;
- ✓ Adaptar os dados do inventário dos sistemas de produto às condições da época e local em que estiver a ser feito o estudo, pois os dados utilizados podem se tornar obsoletos ao longo do tempo ou não serem aplicáveis ao local de estudo;

Como recomendações tecnológicas associadas à utilização do biodiesel de *jatropha*, seguem-se as seguintes recomendações:

- ✓ Reprogramar o tempo de injeção ou alterar o diâmetro do bico de injeção de modo a manter inalterada a mistura estequiométrica, devido a maior viscosidade do biodiesel o que resulta em menor vazão;
- ✓ Alterar componentes do sistema de alimentação que sejam susceptíveis a corrosão por contacto com o biodiesel.

7 REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

7.1 Referências

1. ACHTEN W. M. J. *et al.* *Life cycle assessment of Jatropha biodiesel as transport fuel. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 12, n. 9, p. 1067–1084, 2008.
2. AUTOSSUSTENTÁVEL (2015). Disponível em <https://www.autossustentavel.com/2015/12/analise-do-ciclo-de-vida-uma-ferramenta-para-calcular-impactos-ambientais.html>. Acesso: Março de 2025.
3. CAVENAGHI, V., (2015). *Análise de Ciclo de Vida (ACV)*, Bauru, São paulo.
4. ENERGY INSTITUTE (2023) - *BP Statistical Review*, disponível em <https://www.energyinst.org/statistical-review/about>. Acesso: Maio de 2025.
5. FOIDL, N. *et al.*, (2011) *Jatropha curcas L. as a source for the production of biofuel in Mozambique: sustainability aspects and technological requirements. FUNAE Technical Report*, Maputo: Fundo Nacional de Energia.
6. FERREIRA, G. e CARVAS, R., (2024). *Análise comparativa do ciclo de vida do biodiesel obtido a partir do óleo dendê e etanol versus diesel de petróleo*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
7. FUNAE – Fundo Nacional de Energia. *Relatório de Avaliação de Sustentabilidade de Culturas Energéticas: Jatropha em Moçambique*. Maputo: FUNAE, 2011.
8. GALP (2009). *Projecto de desenvolvimento de biocombustíveis de 2ª geração*.
9. GMÜNDER, S. M. *et al.* *Life cycle assessment of village electrification based on straight jatropha oil in Chhattisgarh, India. Biomass and Bioenergy*, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 347–355, 2010.
10. HEIJUNGS *et al* (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of Products*.
11. HEYWOOD, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals McGraw-Hill*.
12. <https://www.cipmoz.org/en/2022/03/22/aumento-do-preco-de-combustiveis/#:~:text=Cerca%20de%2026%%20do%20valor%20pago%20por,seja%20o%20dobro%20do%20custo%20de%20aquisi%C3%A7%C3%A3o>. Acesso: Julho de 2025.
13. <https://www.raizen.com.br/blog/biocombustiveis/#:~:text=Diferentemente%20dos%20combust%C3%ADveis%20f%C3%B3sseis%20e%20tradicionais%2C%20o,recursos>

- [%20que%20podem%20ser%20reaproveitados%20ou%20repostos](#). Acesso: Março de 2025.
14. https://www.revistaauto.com.br/ficha-tecnica-bmw-x5-xdrive30d-3-0-2020/?utm_source=chatgpt.com. Acesso: Abril de 2025.
 15. <https://www.rome2rio.com/pt/s/Maputo/Cabo-Delgado>, Acesso: Maio de 2025.
 16. <https://www.seedsolution.com.br/analise-do-ciclo-de-vida-uma-abordagem-completa-para-avaliacao-ambiental/>. Acesso: Março de 2025.
 17. IPCC (2022). *Report Climate Change*.
 18. IIAM et al (SD). Revisão sobre *Jatropha curcas*, seus usos e seu potencial para a produção em Moçambique, editado.
 19. ISO 14040 (1997). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. 1st edition.
 20. Krishnakumar et al (2013). *Biodiesel production from Jatropha oil and Castor oil by Transesterification reaction – Experimental and Kinetic studies*.
 21. Knothe, G. (2006). *Biodiesel and renewable diesel: A comparison*. *Progress in Energy and Combustion Science*.
 22. M.A.J. HUIJBREGTS et al (2016). *ReCipe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. RIVM Report 2016-0104.
 23. MONTESANTI, B. e CARELLI G., (2021) - Avaliação de ciclo de vida de embalagens de entrega de comida no brasil. Universidade federal, Rio de Janeiro.
 24. PETROBRAS (2024). Óleo diesel – Informações Técnicas.
 25. SILVA, L. (2014). Processos de produção de biodiesel e análise de parâmetros de qualidade. Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.
 26. VIANNA, F. (2006). Análise de eco-eficiência: Avaliação do desempenho económico-ambiental do biodiesel e petrodiesel. Universidade de São Paulo.
 27. WANI, S. P. et al. *Carbon sequestration and land rehabilitation through Jatropha curcas (L.) plantation in degraded lands*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 161, p. 112–120, out. 2012.

7.2 Bibliografia

1. SZYBIST, J. P., et al. (2014). *Biodiesel performance, toxicity, and emissions. Environmental Science & Technology*.
2. SILVA, L. L. et al. "Propriedades do biodiesel de jatropha (*Jatropha curcas* L.) produzido a partir do óleo da planta." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 10, p. 1071-1077, 2013.
3. U.S. Energy Information Administration (EIA), (SD). "*Petroleum & Other Liquids: Diesel Fuel*".
4. ALMEIDA, A. et al. "Análise de perdas no transporte de combustíveis." *Revista Brasileira de Logística*, v. 15, n. 4, 2017.
5. MÜLLER, J., et al. "Produção de biodiesel a partir de óleos vegetais: O caso do óleo de *Jatropha*." *Revista Brasileira de Engenharia e Tecnologia*, 2016.
6. Kumar, A., et al. "*Characterization and properties of Jatropha curcas oil and its potential for biodiesel production.*" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
7. JELSEN, F., et al. (2009). *Jatropha curcas oil production for local development in Mozambique*.
8. BARBOSA JÚNIOR, et al. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. *Revista Ibero-Americana de Estratégia*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 39–44, 2008.
9. GUIHUA TANG, et al. (2013) — "*Production of Biodiesel from Jatropha Oil and Study of Its Properties*", *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 794–797.

Apêndices

APÊNDICE A - Análise de Inventário

Motor utilizando Gasóleo

1. Extracção do petróleo

Tabela A1 – Inventário da extracção de 252,7kg de petróleo bruto.

Entradas		
Recursos naturais	Quantidade	Unidade
Petróleo (crude) 43,4 MJ por kg	252,71	Kg
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Químicos inorgânicos	1,4489E-1	Kg
Químicos orgânicos	1,1052E-1	Kg
Gás natural	2,6331E+0	m ³
Gasóleo	42,454E+0	MJ
Óleos pesados	7,9348E+0	MJ
Gás (usado em turbinas)	311,09E+0	MJ
Água	52,183E+0	Kg
Esfera tecnológica (electricidade/calor)	Quantidade	Unidade
Electricidade (média voltagem)	1,335E+00	kWh
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
CO ₂	75,81E+00	Kg
CO	7,455E-02	Kg
CH ₄	2,527E+00	Kg
NOx	5,54E+00	Kg
SO ₂	1,221E-02	Kg
Material particulado	2,805E-02	Kg
Emissões para a água	Quantidade	Unidade
Halogénio orgânico absorvível (AOX)	6,039E-08	kg
Carbono orgânico dissolvido (DOC)	5,084E-03	kg
Óleos não especificados	5,878E-03	kg
Nitrogénio atmosférico	4,538E-03	kg
Demanda de oxigénio químico (DOQ)	1,851E-02	kg

Demanda de oxigénio biológico (BOD5)	1,851E-02	kg
Sulfuro	1,574E-05	kg
Efluentes líquidos não especificados	5,084E-03	kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Resíduos perigosos não especificados	5,238E-02	kg
Resíduos sólidos	2,618E-02	kg
Água descarregada	1,334E+02	kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

2. Transporte do petróleo bruto para a refinaria

Tabela A2 – Inventário do transporte do petróleo bruto para a refinaria

Entradas		
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Petróleo	251,7E+00	Kg
Gás natural	5,4233E-03	m ³
Água	3,285E-06	Kg
Esfera tecnológica (electricidade/calor)	Quantidade	Unidade
Energia	1,706E-01	MJ
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
CO ₂	4,0E-01	Kg
CO	9,424E-04	Kg
NO _x	8,0E-03	Kg
Componentes orgânicos voláteis não especificados	5,0E-04	Kg
Hidrocarbonetos	1,303E-04	Kg
Aldeídos	3,348E-07	Kg
CH ₄	2,0E-03	Kg
N ₂ O	4,018E-07	Kg
SO ₂	4,943E-03	Kg
SO _x	8,93E-06	Kg
Efluentes líquidos	Quantidade	Unidade
Hidrocarbonetos	1,877E-06	Kg

Óleos não especificados	5,773E-07	Kg
lões metálicos	4,9755E-07	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

3. Refinaria do petróleo

Tabela A3 – Inventário da refinaria de 250,173kg de petróleo para a obtenção do gasóleo.

Entradas		
Recursos naturais	Quantidade	Unidade
Água (origem não especificada)	8,598E-3	m ²
Esfera tecnológica (materiais e combustíveis)	Quantidade	Unidade
Petróleo bruto	1,744E+0	Kg
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	5,889E-5	Kg
Cobalto (Co)	1,227E-6	Kg
Ácido clorídrico (HCl)	1,0088E-4	Kg
Óxido de lantânio (La ₂ O ₃)	1,2269E-6	Kg
Trióxido de molibdénio (MoO ₃)	8,66E-4	Kg
Gás natural	6,209E-5	Kg
Níquel (Ni)	1,226E-6	Kg
Platina (Pt)	1,840E-8	Kg
Silicone	1,226E-5	Kg
Hidróxido de sódio (SO ₂)	5,044E-5	Kg
Pó de zeólito	3,435E-5	Kg
Esfera tecnológica (Electricidade e calor)	Quantidade	Unidade
Electricidade de baixa voltagem	12,0E+0	kWh
Electricidade de média voltagem	28,0E+0	kWh
Óleo combustível pesado queimado	41,0E+0	MJ
Calor (através de gás natural)	50,0E+0	MJ
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
CO ₂ biogénico	9,668E-5	Kg
CO ₂ fóssil	0,1934E+0	Kg
CO fóssil	7,362E-5	Kg

Material particulado (abaixo de 2,5 um)	4,497E-5	Kg
Material particulado (acima de 10 um)	2,065E-4	Kg
Material particulado (de 2,5 um até 10 um)	1,879E-5	Kg
NO _x	2,388E-4	Kg
Compostos orgânicos voláteis não especificados	2,539E-4	Kg
CH ₄ fóssil	1,958E-5	Kg
Sulfureto de hidrogénio (H ₂ S)	1,656E-7	Kg
Fluoreto de hidrogénio (HF)	3,849E-7	Kg
NO	6,795E-6	Kg
Aldeídos	7,933E-7	Kg
Platina (Pt)	3,657E-10	Kg
SO ₂	1,091E-4	Kg
Vanádio (V)	3,738E-6	Kg
Zn	1,075E-7	Kg
Efluentes líquidos	Quantidade	Unidade
Hidrocarbonetos não especificados	1,877E-6	Kg
Óleos não especificados	5,773E-7	Kg
Iões metálicos	4,9755E-7	Kg
Água	8,430E-3	Kg
Carbono orgânico total (COT)	4,860E-6	Kg
Carbono orgânico dissolvido (COD)	4,763E-6	Kg
Sólidos suspensos não especificados	5,208E-6	Kg
Demanda de oxigénio químico (DOQ)	2,291E-5	Kg
Demanda de oxigénio biológico (BOD5)	3,472E-6	Kg
Halogénio orgânico absorvível (AOX)	6,944E-8	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Resíduos perigosos para incineração	2,997E-4	Kg
Resíduos perigosos para depósito subterrâneo	1,200E-4	Kg
Lama de refinaria	5,791E-4	Kg
Resíduos de gesso	6,883E-4	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

4. Transporte e distribuição

Tabela A4 – Inventário do transporte de distribuição do gasóleo.

Entradas		
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Óleo combustível pesado	1,208E-3	Kg
Gasóleo	3,08E-2	Kg
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
Amónia	1,036E-6	Kg
CO ₂	1,149E-1	Kg
CO	2,293E-4	Kg
NO	2,570E-7	Kg
Ácido clorídrico	9,448E-8	Kg
Hidrogénio fluorídrico (HF)	9,448E-9	Kg
CH ₄	1,60E-7	Kg
NO _x	1,571E-4	Kg
Componentes orgânicos voláteis não especificados	6,566E-6	Kg
Aldeídos	1,506E-7	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	3,119E-6	Kg
Material particulado (acima de 10 um)	3,751E-6	Kg
Material particulado (de 2,5 um até 10 um)	3,00E-6	Kg
Propano (C ₃ H ₄)	4,941E-7	Kg
Dióxido sulfúrico (SO ₂)	5,667E-7	Kg
Efluentes líquidos	Quantidade	Unidade
Demanda de oxigénio biológico (BOD5)	2,86E-4	Kg
Demanda de oxigénio químico (DOQ)	2,86E-4	Kg
Carbono orgânico dissolvido (COD)	7,85E-7	Kg
Hidrocarbonetos não especificados	2,54E-8	Kg
Óleos não especificados	9,09E-5	Kg
Carbono orgânico total (COT)	7,87E-5	Kg
Compostos de tributilstanho	3,17E-11	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade

Óleo de porão	5,411E-6	Kg
Emissões do desgaste dos travões	2,216E-5	Kg
Emissões de desgaste da estrada	1,908E-5	Kg
Emissões do desgaste dos pneus	2,196E-4	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

Azul – Exclusivo ao transporte marítimo.

Verde – Exclusivo ao transporte terrestre.

5. Utilização no motor

Tabela A5 – Utilização do gasóleo no motor.

Entradas		
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Gasóleo	8,53E-2	Kg
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
Amónia	8,904E-7	Kg
CO ₂	1,7473E-1	Kg
CO	2,0E-3	Kg
NO	2,782E-6	Kg
Hidrocarbonetos não especificados	1,619E-7	Kg
CH ₄	3,0E-5	Kg
NO _x	6,7726E-4	Kg
Componentes orgânicos voláteis não especificados	1,32E-5	Kg
Aldeídos não especificados	1,611E-6	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	3,0E-4	Kg
Propano (C ₃ H ₄)	2,739E-8	Kg
Dióxido sulfúrico (SO ₂)	3,0E-4	Kg
Butano	2,739E-8	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Emissões do desgaste dos travões	7,5525E-6	Kg
Emissões de desgaste da estrada	1,662E-5	Kg

Emissões do desgaste dos pneus	9,716E-5	Kg
--------------------------------	----------	----

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

Biodiesel de *Jatropha*

1. Cultivo da semente de *Jatropha*

Tabela A6 – Inventário para o cultivo de 445,26kg de semente de *Jatropha curcas*.

Entradas		
Recursos naturais	Quantidade	Unidade
CO ₂	9,028E+00	Kg
Energia de biomassa	8,135E-01	MJ
Ocupação (colheita permanente)	1781,04E+00	m ²
Transformação da colheita anual	89,05E+00	m ²
Transformação para a colheita permanente	89,05E+00	m ²
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Fertilizante de fósforo inorgânico	144,31E+00	Kg
Irrigação	35,98E+00	m ³
Componentes organofosforados não especificados	1,58E-01	Kg
Embalagem para fertilizantes	216,52E+00	Kg
Embalagem para pesticidas	3,166E-01	Kg
Plantação	1,068E-01	Há
Cloreto de potássio	22,64E+00	Kg
Ureia	84,85E+00	Kg
Aplicação de protecção da planta (fumigação)	1781,04E+00	m ²
Gasóleo	74,80E+00	Kg
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
Amónia	5,935E+00	Kg
NO	7,188E-01	Kg
NO _x	1,509E-01	Kg
Água/m ³	22,30E+00	m ³
Emissões para a água	Quantidade	Unidade
Nitratos (subterrânea)	7,22E+00	Kg
Fosfato (subterrânea)	3,82E-02	Kg

Fósforo (rio)	1,77E-01	Kg
Água (subterrânea)	12,55E+00	m³
Água (rio)	3,138E+00	m³
Emissões para o solo	Quantidade	Unidade
Cloro (Cl)	3,202E-02	Kg
Cádmio (Cd)	2,753E-03	Kg
Cobre (Cu)	4,259E-03	Kg
Chumbo (Pb)	2,684E-03	Kg
Níquel (Ni)	5,221E-03	Kg
Zinco (Zn)	3,219E-03	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Resíduos perigosos não especificados	9,230E-02	Kg
Resíduos sólidos	4,613E-02	Kg
Água descarregada	235,0E+00	Kg

Fonte: Dados adaptados do Relatório da Galp e Econergy International corporation

2. Colheita e Transporte das sementes

Tabela A7 – Inventário para o transporte das sementes de *Jatropha*.

Entradas		
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Gasóleo	3,971E-2	Kg
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
Amónia	9,128E-7	Kg
CO ₂	1,491E-1	Kg
CO	1,2715E-4	Kg
NO	1,2715E-4	Kg
CH ₄	9,4209E-8	Kg
NO _x	6,3829E-5	Kg
Componentes orgânicos voláteis não especificados	3,112E-6	Kg
Aldeídos	1,751E-7	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	5,991E-7	Kg
Propano (C ₃ H ₄)	3,8312E-9	Kg

Dióxido sulfúrico (SO ₂)	7,3987E-7	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Emissões do desgaste dos travões	2,2949E-5	Kg
Emissões de desgaste da estrada	1,97596E-5	Kg
Emissões do desgaste dos pneus	2,2738E-4	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

3. Produção do óleo combustível

Tabela A8 – Inventário da extracção de 1L de óleo de *jatropha*.

Entradas		
Recursos naturais	Quantidade	Unidade
Água (origem não especificada)	1,2999E+0	m ³
Energia	1,37E-2	MJ
Esfera tecnológica (materiais e combustíveis)	Quantidade	Unidade
Semente de Jatropha	3,3E+0	Kg
Esfera tecnológica (Electricidade e calor)	Quantidade	Unidade
Electricidade de média voltagem	2,5E+0	kWh
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
CO ₂	2,68E-2	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	2,65E-4	Kg
Material particulado (de 2,5 um até 10 um)	4,56E-5	Kg
NO _x	8,80E-4	Kg
Compostos orgânicos voláteis não especificados	2,0E-5	Kg
Dióxido sulfúrico (SO ₂)	5,8E-3	Kg
Água	1,053E-2	Kg
Efluentes líquidos	Quantidade	Unidade
Ácidos não especificados	4,79E-4	Kg
Nitrogénio atmosférico	4,42E-5	Kg
Óleos não especificados	4,42E-3	Kg
Água	1,947E-2	Kg
Carbono orgânico total (COT)	5,11E-3	Kg
Carbono orgânico dissolvido (COD)	5,11E-3	Kg

Sólidos suspensos não especificados	4,16E-2	Kg
Demanda de oxigénio químico (DOQ)	1,38E-4	Kg
Demanda de oxigénio biológico (BOD5)	1,38E-4	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Misturas de cinzas	6,3686E-4	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

4. Produção de Biodiesel

Tabela A9 – Inventário para a produção de 97,77 kg de biodiesel.

Entradas		
Recursos naturais	Quantidade	Unidade
Água (origem não especificada)	2,0E+0	m ³
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Óleo de <i>Jatropha</i>	1,4	L
Metanol	1,48E-1	Kg
Hidróxido de sódio	9,2E-3	Kg
Esfera tecnológica (Electricidade e calor)	Quantidade	Unidade
Electricidade média voltagem	2,9E+0	kWh
Calor	5,0E-1	MJ
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
CO ₂	5,7E-2	Kg
CO ₂ biogénico	0,1	Kg
NO _x	2,0E-2	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	3,0E-3	Kg
Compostos orgânicos voláteis não especificados (não metano)	5,0E-3	Kg
Compostos orgânicos voláteis não especificados	3,0E-2	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Glicerol	9,78E+00	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

5. Transporte e distribuição

Tabela A10 – Inventário para transporte do biodiesel de Jatropha para os postes de abastecimento.

Entradas		
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Gasóleo	1,919E-2	Kg
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
Aldeídos	7,5014E-8	Kg
Amónia	1,8797E-7	Kg
CO ₂	5,753E-2	Kg
CO	5,2425E-5	Kg
NO	3,1337E-6	Kg
CH ₄	4,0364E-8	Kg
NO _x	2,6291E-5	Kg
Componentes orgânicos voláteis não especificados	1,3334E-6	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	2,3725E-7	Kg
Propano (C ₃ H ₄)	1,64145E-9	Kg
Dióxido sulfúrico (SO ₂)	3,12742E-7	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Emissões do desgaste dos travões	1,5262E-5	Kg
Emissões de desgaste da estrada	1,31404E-5	Kg
Emissões do desgaste dos pneus	1,5121E-4	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

6. Utilização no motor

Tabela A11 – Inventário da utilização do biodiesel de *jatropha* no motor.

Entradas		
Esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade
Biodiesel	1,11111	L
Saídas		
Emissões atmosféricas	Quantidade	Unidade
Amónia (NH ₃)	1,04E-5	Kg
CO ₂	4,970E-1	Kg
CO	1,5E-3	Kg
CH ₄	3,0E-1	Kg
NO _x	4,40E-4	Kg
Componentes orgânicos voláteis não especificados	3,0E-4	Kg
Aldeídos não especificados	5,0E-4	Kg
Material particulado (abaixo de 2,5 um)	5,0E-5	Kg
Dióxido sulfúrico (SO ₂)	5,4E-6	Kg
Resíduos e emissões para tratamento	Quantidade	Unidade
Emissões do desgaste dos travões	9,33254E-6	Kg
Emissões de desgaste da estrada	2,0532E-5	Kg
Emissões do desgaste dos pneus	1,20067E-4	Kg

Fonte: Dados adaptados do Ecoinvent (*SimaPro*)

APÊNDICE B – Resultados

Avaliação de impactos

1. Motor utilizando gasóleo

Tabela B1 – Resultados obtidos dos impactos ambientais gerados pela utilização de 100 L de gasóleo na operação de motor de combustão interna de um veículo percorrendo 1000 km, utilizando o método *ReCipe Midpoint H*.

Categoria de impacto	Total	Unidade
Aquecimento global	1,71E+03	kg CO2 eq
Depleção da camada de ozono	6,70E-03	kg CFC11 eq
Radiação ionizante	5,07E+01	kg Urânio-235 eq
Acidificação	1,32E+01	kg SO2 eq
Eutrofização (P)	3,03E-01	kg P eq
Eutrofização (N)	2,72E-01	kg N eq
Danos a saúde humana por formação de ozono	1,04E+01	kg NOx eq
Danos ao ecossistema terrestre por formação de ozono	1,07E+00	kg NOx eq
Danos a saúde humana por formação de particulados	5,02E+00	kg PM2.5 eq
Ecotoxicidade do mar	7,89E+00	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade da água doce	5,26E+00	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade do solo	1,24E+04	kg 1,4-DCB
Toxinas cancerígenas humanas	1,94E+02	kg 1,4-DCB
Toxinas não-cancerígenas humanas	9,41E+02	kg 1,4-DCB
Uso do solo	2,95E+01	m2a eq
Depleção dos recursos minerais	1,46E+01	kg Cu eq
Depleção de combustíveis fósseis	5,29E+02	kg Óleo eq
Consumo de água	4,71E+00	m3

Tabela B2 – Contribuições de cada processo unitário do sistema, para cada uma das categorias de impacto.

Categoria de impacto	Extracção de petróleo	Transporte do petróleo bruto	Refinaria do gasóleo	Distribuição	Uso no motor
Aquecimento global (kg CO2 eq)	1,50E+02	1,07E+02	1,90E+02	9,21E+00	1,77E+02
Depleção da camada de ozono (kg CFC11 eq)	3,85E-05	0,00E+00	6,38E-03	0,00E+00	3,06E-05
Radiação ionizante (kg Urânio-235 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Acidificação (kg SO2 eq)	1,64E+00	1,78E+00	4,35E+00	3,07E-01	5,46E-01
Eutrofização P (kg P eq)	0,00E+00	0,00E+00	1,81E-04	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofização N (kg N eq)	4,08E-06	0,00E+00	7,01E-05	0,00E+00	0,00E+00
Danos a saúde humana por formação de ozono (kg NOx eq)	4,54E+00	1,82E+00	2,43E-02	8,53E-01	8,49E-01
Danos ao ecossistema terrestre por formação de ozono (kg NOx eq)	4,54E+00	1,83E+00	2,67E-02	8,53E-01	9,54E-01
Danos a saúde humana por formação de particulados (kg PM2.5 eq)	5,02E-01	5,26E-01	1,27E+00	3,07E-01	4,62E-01
Ecotoxicidade do mar (kg 1,4-DCB)	0,00E+00	4,57E-06	7,38E-02	0,00E+00	5,78E-02
Ecotoxicidade da água doce (kg 1,4-DCB)	0,00E+00	1,89E-06	3,73E-03	0,00E+00	3,17E-03
Ecotoxicidade do solo (kg 1,4-DCB)	0,00E+00	1,08E-03	1,06E+02	0,00E+00	1,25E+2

Toxinas cancerígenas humanas (kg 1,4-DCB)	0,00E+00	3,18E-03	6,49E-02	0,00E+00	2,26E+00
Toxinas não-cancerígenas humanas (kg 1,4-DCB)	0,00E+00	2,58E-03	1,07E+00	0,00E+00	9,5E+00
Uso do solo (m2a eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção dos recursos minerais (kg Cu eq)	6,56E+00	0,00E+00	2,03E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de combustíveis fósseis (kg Óleo eq)	2,28E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Consumo de água (m3)	4,69E-02	0,00E+00	1,43E-02	0,00E+00	0,00E+00

2. Motor utilizando biodiesel de jatropha

Tabela B3 – Resultados obtidos dos impactos ambientais gerados pela utilização de 111,1 L de gasóleo na operação de motor de combustão interna de um veículo percorrendo 1000 km, utilizando o método *ReCipe Midpoint H*.

Categoria de impacto	Total	Unidade
Aquecimento global	-2,43E+03	kg CO2 eq
Depleção da camada de ozono	4,31E-04	kg CFC11 eq
Radiação ionizante	6,88E+01	kg Urânio-235 eq
Acidificação	4,53E+00	kg SO2 eq
Eutrofização (P)	1,01E+01	kg P eq
Eutrofização (N)	4,45E-02	kg N eq
Danos a saúde humana por formação de ozono	5,08E+00	kg NOx eq
Danos ao ecossistema terrestre por formação de ozono	5,21E+00	kg NOx eq
Danos a saúde humana por formação de particulados	2,45E+00	kg PM2.5 eq
Ecotoxicidade do mar	8,01E+00	kg 1,4-DCB

Ecotoxicidade da água doce	5,69E+00	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade do solo	1,1E+04	kg 1,4-DCB
Toxinas cancerígenas humanas	2,11E+02	kg 1,4-DCB
Toxinas não-cancerígenas humanas	4,13E+03	kg 1,4-DCB
Uso do solo	1,50E+03	m ² a eq
Depleção dos recursos minerais	3,00E+00	kg Cu eq
Depleção de combustíveis fósseis	1,93E+02	kg Óleo eq
Consumo de água	4,55E+02	m ³

Tabela B4 – Contribuições de cada processo unitário do sistema, para cada uma das categorias de impacto.

Categoria de impacto	Cultivo da semente	Extracção do óleo	Produção do biocombustível	Distribuição	Uso no motor
Aquecimento global (kg CO₂ eq)	-3,27E+03	0,00E+00	6,33E+00	2,86E+00	8,82E+01
Depleção da camada de ozono (kg CFC11 eq)	1,48E-04	0,00E+00	0,00E+00	3,40E-05	0,00E+00
Radiação ionizante (kg Urânio-235 eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Acidificação (kg SO₂ eq)	1,06E-01	9,52E-01	8,00E-01	2,06E-02	2,58E-01
Eutrofização P (kg P eq)	9,66E+00	3,12E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofização N (kg N eq)	1,65E-02	2,04E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Danos a saúde humana por formação de ozono (kg NO_x eq)	1,74E-01	1,37E-01	2,32E+00	2,98E-03	6,49E-01
Danos ao ecossistema terrestre	1,74E-01	1,38E-01	2,38E+00	4,8E-03	6,51E-01

por formação de ozono (kg NOx eq)					
Danos a saúde humana por formação de particulados (kg PM2.5 eq)	2,45E-02	3,18E-01	5,78E-01	2,73E-03	1,25E-01
Ecotoxicidade do mar (kg 1,4-DCB)	4,33E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,49E-04
Ecotoxicidade da água doce (kg 1,4-DCB)	2,71E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,24E-04
Ecotoxicidade do solo (kg 1,4-DCB)	7,85E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-01
Toxinas cancerígenas humanas (kg 1,4-DCB)	6,35E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,52E-01
Toxinas não-cancerígenas (kg 1,4-DCB)	3,19E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,73E-02
Uso do solo (m2a eq)	1,44E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção dos recursos minerais (kg Cu eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Depleção de combustíveis fósseis (kg óleo eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Consumo de água (m3)	1,81E+01	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00

3. Normalização e ponderação

Tabela B5 – Resultados da ponderação dos impactos, atribuindo pontos a cada categoria de impacto pelo método *ReCipe endpoint* H.

Categoria de impacto	Motor utilizando gasóleo	Motor utilizando biodiesel de <i>Jatropha</i>
Aquecimento global	2,65E+01	-3,77E+01
Depleção da camada de ozono	5,93E-02	3,81E-03
Radiação ionizante	7,17E-03	9,73E-03
Acidificação	7,57E-01	2,6E-01
Eutrofização (P)	5,49E-02	1,82E+00
Eutrofização (N)	1,25E-04	2,04E-05
Danos a saúde humana por formação de ozono	1,57E-01	7,71E-02
Danos ao ecossistema terrestre por formação de ozono	3,73E-01	1,82E-01
Danos a saúde humana por formação de particulados	5,26E+01	2,57E+01
Ecotoxicidade do mar	2,24E-03	2,28E-03
Ecotoxicidade da água doce	9,84E-03	1,07E-02
Ecotoxicidade do solo	3,83E-02	3,39E-02
Toxinas cancerígenas humanas	1,07E+01	1,17E+01
Toxinas não-cancerígenas humanas	3,58E+00	1,57E+01
Uso do solo	7,09E-02	3,61E+00
Depleção dos recursos minerais	2,41E-02	4,95E-03
Depleção de combustíveis fósseis	1,44E+00	3,16E-01
Consumo de água	9,73E-02	1,60E+01
TOTAL	9,78E+01	3,75E+01

Avaliação de danos

1. Danos à saúde humana

Tabela B6 – Resultados dos danos à saúde humana, pelo uso do gásóleo e do biodiesel de *Jatropha*.

Categoria de impacto	Motor utilizando gásóleo	Motor utilizando biodiesel de <i>Jatropha</i>	Unidade
Aquecimento global	1,59E-03	-2,26E-03	DALY
Depleção da camada de ozono	3,56E-06	2,29E-07	
Radiação ionizante	4,3E-07	5,83E-07	
Danos a saúde humana por formação de ozono	9,44E-06	4,62E-06	
Danos a saúde humana por formação de particulados	3,15E-03	1,54E-03	
Toxinas cancerígenas humanas	6,43E-04	7,00E-04	
Toxinas não-cancerígenas humanas	2,15E-04	9,43E-04	
Consumo de água	5,84E-06	9,62E-04	

2. Danos ao ecossistema

Tabela B7 – Resultados dos danos causados a biodiversidade.

Categoria de impacto	Motor utilizando gásóleo	Motor utilizando biodiesel de <i>Jatropha</i>	Unidade
Aquecimento global	4,79E-06	-6,82E-06	Species.yr
Danos ao ecossistema terrestre por formação de ozono	1,38E-06	6,72E-07	
Acidificação	2,8E-06	9,60E-07	
Eutrofização (P)	2,03E-07	6,74E-06	
Eutrofização (N)	4,63E-10	7,56E-11	

Ecotoxicidade do mar	8,30E-09	8,42E-09	
Ecotoxicidade da água doce	3,64E-08	3,94E-08	
Ecotoxicidade do solo	1,42E-07	1,25E-07	
Uso do solo	2,62E-07	1,33E-05	
Consumo de água	3,87E-08	5,92E-06	

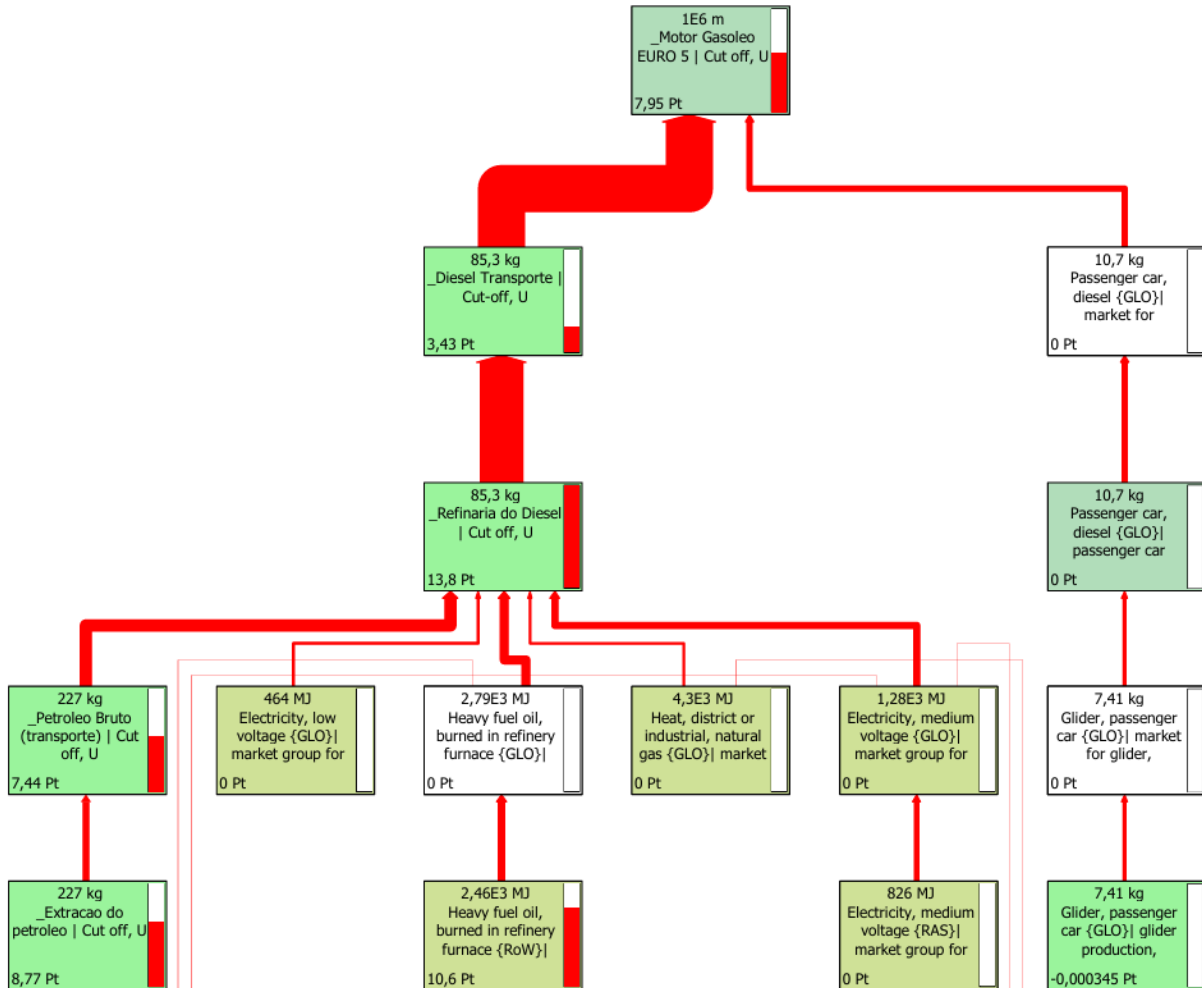
3. Escassez de recursos

Tabela B8 – Resultados referentes à escassez dos recursos minerais e dos combustíveis fósseis.

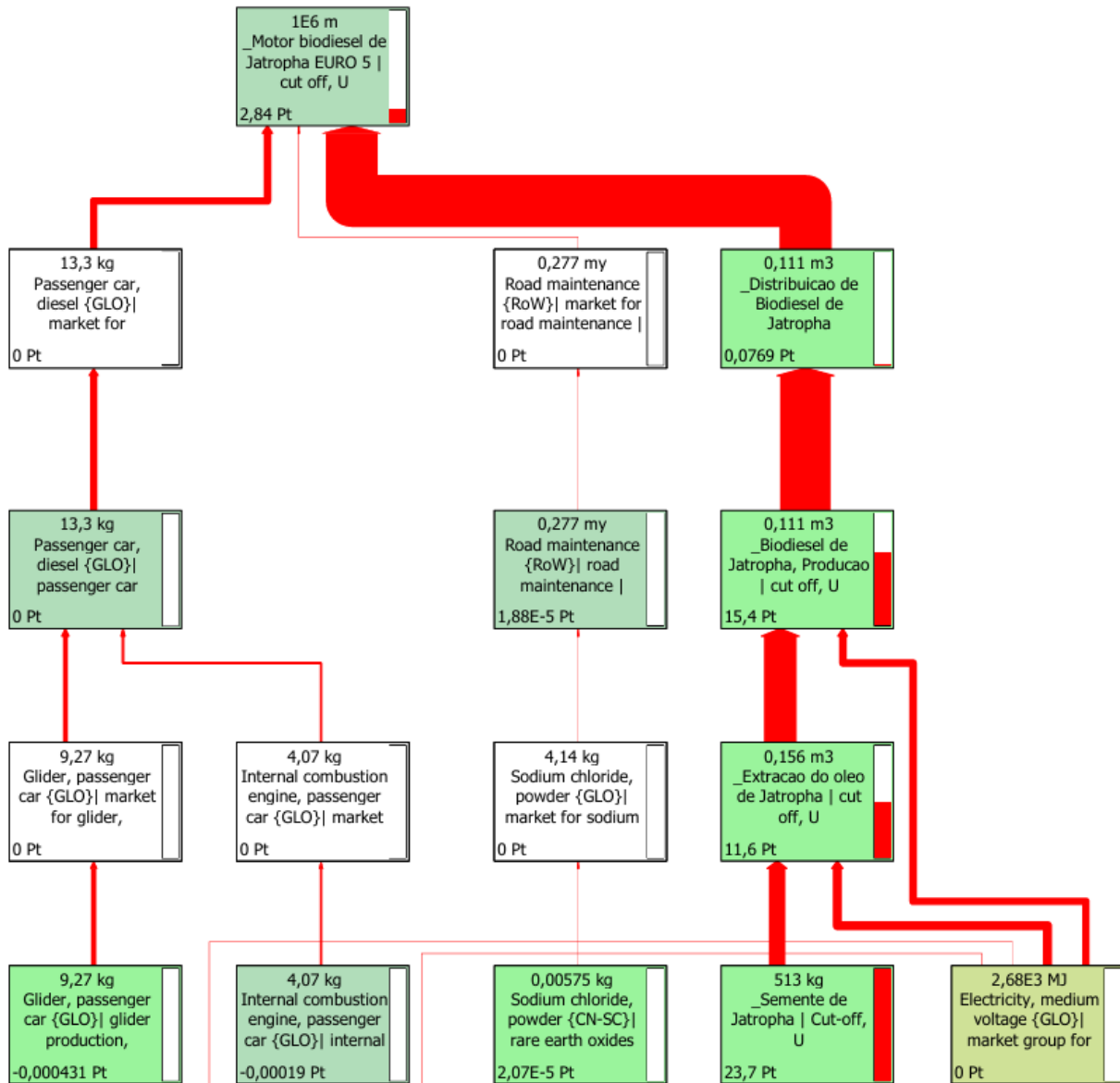
Categoria de impacto	Motor utilizando gasóleo	Motor utilizando biodiesel de <i>Jatropha</i>	Unidade
Depleção dos recursos minerais	3,37E+00	6,94E-01	USD2013
Depleção de combustíveis fósseis	2,02E+02	4,42E+01	

APÊNDICE C – Árvores de impacto

Motor utilizando Gasóleo



Motor utilizando biodiesel de Jatropha



Anexos

ANEXO A – Avaliação de biocombustíveis em Moçambique

Tabela SE 2. Sumário da análise das matérias primas para biocombustíveis

<i>Matéria Prima</i>	<i>Adequação Agro-ecológica</i>	<i>Impacto Socio-económico and ambiental</i>	<i>Custo de produção, de oportunidade e produtividade por hectare</i>	<i>Outros factores</i>	<i>Conclusões (avaliação Capítulos 4 e 6)</i>
<i>Etanol</i>					
Milho	+	-	0	+	Não avaliado
Mandioca	+	0	+	+	Avaliado
Cana de açúcar e melaços	+	+	+	0	Avaliado
Sorgo doce	+	+	+	+	Avaliado
<i>Biodiesel</i>					
Girassol	NA	0	0	+	Avaliado
Gergelim	NA	0	-	+	Não avaliado
Soja	+	0	0	+	Avaliado
Amendoim	+	0	-	+	Não avaliado
Côco	+	+	0	+	Avaliado
Algodão	+	0	-	+	Não avaliado
Mafurra	NA	NA	NA	+	Não avaliado
Rícino	+	NA	-	NA	Avaliado
Jatropha	+	+	0	+	Avaliado
Palmeira africana	NA	0	0	NA	Avaliado

Legenda: - denota “baixo” or “desfavorável;” + denota “alto” or “favorável;” 0 denota “moderado,” and NA denotes “não disponível.”

Fonte: *Econergy International Corporation, et al (2008).*

ANEXO B – Condições de cultivo da *jatropha* em Moçambique

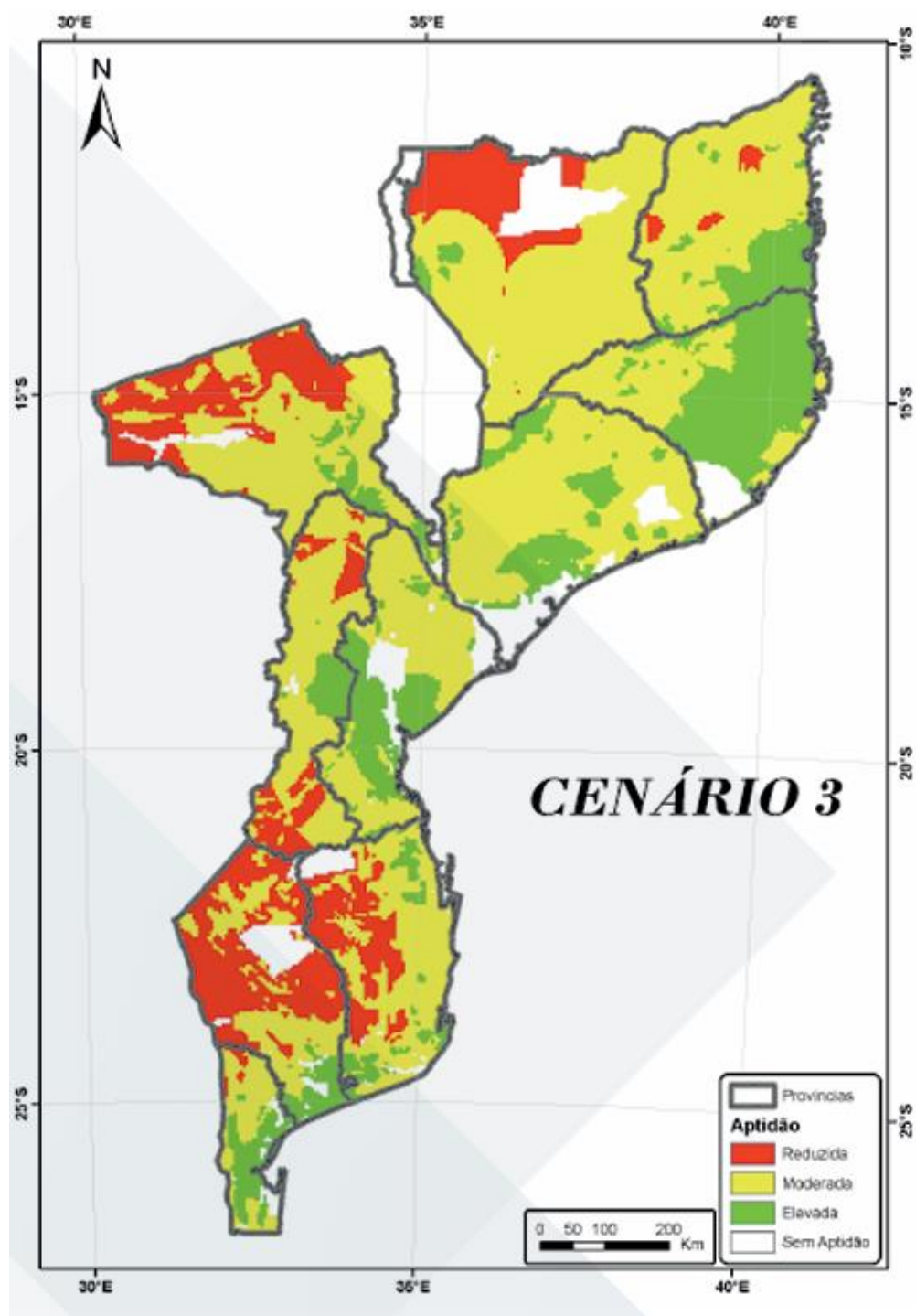


Imagem B1: Potencial de cultivo da *jatropha* em diferentes regiões de Moçambique (Fonte: Galp, 2016)

ANEXO C – Comparação entre as propriedades do óleo de *jatropha*, biodiesel de *jatropha* e gasóleo

Property	Unit	Jatropha oil	Jatropha oil methyl ester	Diesel	ASTM D6751-02	DIN EN 14214
Density at 288 K	kg/m ³	918	880	850	875-900	860-900
Viscosity at 313 K	mm ² /s	35.4	4.84	2.60	1.9-6.0	3.5-5.0
Flash point	K	459	435	343	>403	>393
Pour point	K	267	267	253	-	-
Water content	%	5	Nil	0.02	<0.03	<0.05
Ash content	%	0.7	Nil	0.01	<0.02	<0.02
Carbon residue	%	0.3	0.025	0.17	-	<0.3
Sulfur content	%	0.02	Nil	-	0.05	-
Acid value	mg KOH/g	11.0	0.24	0.35	<0.8	<0.50
Iodine value	-	101	104	-	-	-
Saponification value	-	194	190	-	-	-
Calorific value	MJ/kg	33	37.2	42	-	-
Cetane number	-	23	51.6	46	-	-

Fonte: *World Bioenergy Association* (2013).