



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Biodiesel de girassol ou microalgas em Portugal: Uma avaliação comparativa de ciclo de vida

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

Filipa Daniela Francisco de Figueiredo

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Orientador Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire

Vogal Professor Doutor José Manuel Baranda M. de Silva Ribeiro

Coimbra, Setembro, 2011

Agradecimentos

Expresso o meu agradecimento ao Professor Doutor Fausto Freire pelo apoio prestado no desenvolvimento desta dissertação (mesmo à distância), pelo incentivo e pela crítica construtiva que ajudou ao desenvolvimento desta investigação.

Aos meus Pais e à minha irmã por me apoiarem em todas as escolhas, sem levantar questões sobre elas.

Ao André pelo constante apoio, incentivo e motivação em terminar esta e outras fases da melhor forma.

Ao Rafa pela disponibilidade de leitura, pelo espírito de ajuda e claro apoio na tradução.

Aos amigos de Coimbra, pelos momentos vividos, pelo apoio e partilha de ideias nesta última prova.

Aos amigos de sempre pelo apoio incessante e motivação para que tudo corra da melhor forma.

Agradeço ainda aos colegas do Laboratório de Ecologia Industrial, especialmente ao Carlos, à Rita e ao Pedro, pelos conselhos, motivação e enorme espírito de entreaajuda.

Resumo

A crescente pressão por parte da União Europeia (UE), para que os seus estados membros estabeleçam metas de incorporação de energias provenientes de fontes renováveis, tanto no consumo final bruto de energia, como no sector do transporte, impõe que sejam avaliadas as implicações ambientais relativas à produção de biocombustíveis. A presente dissertação tem como principal objectivo avaliar comparativamente o ciclo de vida (CV) de biodiesel produzido com base em dois tipos distintos de matéria-prima cultivável em Portugal (girassol e microalgas), através da metodologia científica de avaliação de ciclo de vida (ACV).

Neste contexto foi desenvolvido um modelo e inventário de CV para dois sistemas em análise: biodiesel de girassol e biodiesel de microalgas. O modelo avalia os impactes de ciclo de vida (AICV) para os dois tipos de biodiesel utilizando os métodos de avaliação de impactes ambientais ReCiPe e CML. Na ACV do biodiesel de girassol foram consideradas duas formas de cultivo, em regadio e em sequeiro, sendo ainda analisada a influência do método de alocação aos co-produtos (mássica e energética). Os resultados obtidos pelo método ReCiPe, permitiram comparar o biodiesel produzido com girassol cultivado em regadio e sequeiro, tendo-se verificado que, não é possível concluir qual dos tipos de cultivo tem melhor performance ambiental, pois os resultados são diferentes para as diferentes categorias de impacte. Em particular, verificou-se que o biodiesel produzido com girassol cultivado em sequeiro apresenta impactes ambientais superiores para as categorias alterações climáticas (AC), eutrofização marinha (EM) e depleção fóssil (DF) e o em regadio para as categorias acidificação terrestre (AT) e eutrofização de água doce (EAD). A fase de CV que mais contribui para os impactes ambientais é o cultivo. Na ACV do biodiesel de microalgas, consideraram-se duas formas de garantir as necessidades de CO₂: i) com captura de CO₂ da central termoeléctrica de Sines ou ii) sem captura, utilizando o CO₂ atmosférico, com produtividades, respectivamente, 30 g/(m².dia) e 15g/(m².dia), foi ainda avaliada a influência do método de alocação aos co-produtos. Os resultados mostram que o biodiesel com captura de CO₂ apresenta menores impactes ambientais para todas as categorias de impacte ambiental avaliadas (AC, AT, EAD, EM e

DP) e que para a maioria das categorias a fase de CV com maiores impactes ambientais é o cultivo.

Comparando os dois tipos de biodiesel (girassol e microalgas), conclui-se que o biodiesel de microalgas com captura de CO₂ da central apresenta, para todas as categorias, impactes mais reduzidos. Os impactes mais elevados verificam-se para o biodiesel de girassol em sequeiro nas categorias AC, EM e DP e para o biodiesel com cultivo em regadio nas categorias AT e EAD, o biodiesel sem captura de CO₂ obtém sempre resultados intermédios.

Os resultados calculados com o método ReCiPe foram comparados com os resultados obtidos com o método CML tendo-se concluído que nas categorias aquecimento global, não há diferenças significativas (0,1 - 0,33%), nas categorias depleção da camada do ozono e acidificação há algumas variações nos resultados (0,4 - 11,9%) e para as categorias toxicológicas verifica-se uma elevada variação dos resultados (-99,9 – 405%).

Foi ainda elaborada uma análise de sensibilidade relativa às emissões de N₂O para o sistema biodiesel de girassol, avaliando a sensibilidade dos resultados aos factores de emissão e intervalos de incerteza definidos pelo IPCC. Os resultados mostram uma variação entre os factores máximos e mínimos de 35% para o biodiesel de girassol com cultivo em regadio e 26% com cultivo em sequeiro.

Avaliaram-se ainda as quantidades de área necessárias para substituir 10% do consumo de gasóleo no sector rodoviário, por biodiesel de girassol ou microalgas. Verificou-se assim, que a área que Portugal tem disponível para cultivo de girassol ou microalgas representa, entre 0,66% - 5% das necessidades.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida, biodiesel de girassol, biodiesel de microalgas, cultivo da matéria-prima, extracção do óleo, transesterificação.

Abstract

The European Union's (EU) increasing pressure on its member states to set targets for the incorporation of energy from renewable sources, both in the gross final energy consumption and in the transport sector, requires an assessment of the environmental implications of the production of biofuels. This thesis aims to comparatively assess the biodiesel life cycle (LC) produced using two distinct types of raw materials grown in Portugal (sunflower and microalgae), through the life cycle assessment (LCA) scientific methodology.

In this context, a LC model and inventory for the two systems has been developed: sunflower and microalgae biodiesel. For each type of biodiesel, the model assesses the life cycle impacts using ReCiPe and CML environmental impact assessment methods. In the LCA of biodiesel from sunflower two types of cultivation were considered, irrigation and dry land, and the influence of the co-product allocation method (mass and energy) was also analysed. The ReCiPe results allowed to compare the biodiesel produced from sunflower grown under irrigation and under dry land. It was not possible to conclude which type of crop has better environmental performance, because different results were obtained for different impact categories. In particular, it was found that biodiesel produced from sunflower grown in dry land has higher environmental impacts in the categories of climate change (CC), marine eutrophication (ME) and fossil fuel depletion (FD), and the irrigated one in the categories of terrestrial acidification (TA) and fresh water eutrophication (FE). The LC phase that contributes the most to the environmental impacts is the cultivation. In the LCA of biodiesel from microalgae, two ways to ensure the needs of CO₂ were considered: i) CO₂ capture from the Sines power plant and ii) using the atmospheric CO₂ with productivity of 30 g/(m².d) and 15 g/(m².d), respectively. The influence of the co-products allocation method was also evaluated. The results show that the biodiesel with CO₂ capture has lower environmental impacts in all environmental impact categories assessed (CC, TA, FE, ME and FD) and that, for most of the LC categories, the phase with greatest environmental impacts is the cultivation.

Comparing the two types of biodiesel (sunflower and microalgae), it was concluded that for all categories the biodiesel from microalgae with CO₂ capture shows lower impacts. For the dry land sunflower biodiesel, higher impacts were found at the CC, ME and FD categories. For the biodiesel grown under irrigation less impacts were obtained for TA and FE categories. Biodiesel without CO₂ capture always got intermediate results.

The results calculated from the Recipe method were compared with the results obtained with the CML method. It was concluded that the global warming categories do not present significant differences (0.1 - 0.33%), the acidification and ozone layer depletion categories present some variations in the results (0.4 - 11.9%) and there is a high variation of results in the toxicological categories (-99,9 - 405%).

For the sunflower biodiesel system, a sensitivity analysis to the NO₂ emissions was also conducted to evaluate the sensitivity of the results to the emission factors and the uncertainty intervals defined by the IPCC. The results show a variation between the maximum and minimum factors of 35% and 26% for sunflower biodiesel grown under irrigation and under dry land, respectively,

The amount of area needed to replace 10% of diesel consumption in the highway sector for sunflower or microalgae biodiesel was also assessed. It was shown that the area available in Portugal for cultivation sunflower or microalgae represents 0,66% to 5% of the needs.

keywords Life cycle assessment, sunflower biodiesel, microalgae biodiesel, cultivation of raw materia, oil extraction, transesterification.

Índice

| | |
|--|------|
| Índice de Figuras | viii |
| Índice de Tabelas | x |
| Siglas | xii |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Enquadramento e motivação | 1 |
| 1.2. Objectivos | 2 |
| 1.3. Estrutura da dissertação | 3 |
| 2. Estado da arte da avaliação de ciclo de vida do biodiesel produzido com base em girassol e microalgas | 4 |
| 2.1. Introdução | 4 |
| 2.1.1. Características principais do biodiesel girassol | 4 |
| 2.1.2. Características principais do biodiesel microalgas | 5 |
| 2.2. Unidade funcional (UF) e fronteiras do sistema | 9 |
| 2.2.1. Biodiesel de girassol | 9 |
| 2.2.2. Biodiesel de microalgas | 10 |
| 2.3. Multifuncionalidade – atribuição de impactes aos co-produtos | 11 |
| 2.3.1. Biodiesel de girassol | 11 |
| 2.3.2. Biodiesel de microalgas | 11 |
| 2.4. Análise de resultados | 12 |
| 2.4.1. Categorias de impacte ambiental avaliadas | 12 |
| 2.4.2. Necessidades energéticas | 13 |
| 2.4.3. Emissão de GEE | 14 |
| 2.5. Notas conclusivas | 16 |
| 3. Modelo e inventário de Ciclo de vida | 20 |
| 3.1. Produção de biodiesel | 20 |
| 3.2. Metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) | 22 |
| 3.3. Fronteiras do sistema e unidade funcional | 22 |
| 3.4. Descrição das fases de CV e inventário | 24 |
| 3.4.1. Biodiesel de girassol | 24 |
| 3.4.2. Biodiesel de microalgas | 30 |
| 3.5. Multifuncionalidade | 35 |
| 4. Análise e discussão dos resultados | 37 |
| 4.1. Avaliação de impactes de CV | 37 |
| 4.2. Biodiesel de girassol | 40 |
| 4.3. Biodiesel de microalgas | 45 |
| 4.4. Multifuncionalidade e análise comparativa entre biodiesel de girassol e microalgas | 49 |
| 4.5. Comparação do método ReCiPe com o CML | 53 |
| 4.6. Análise de sensibilidade às emissões de N ₂ O | 55 |
| 4.7. Área de cultivo necessária para garantir metas de incorporação no sector dos transportes | 57 |

| | |
|---|----|
| 4.8. Comparação com outros estudos | 59 |
| 5. Conclusões..... | 61 |
| 5.1. Limitações e sugestões para investigação futura | 63 |
| 6. Referências bibliográfica..... | 65 |
| 7. Apêndice A – Resultados obtidos com o modelo de avaliação de impactes ambientais ReCiPe..... | 69 |
| 8. Apêndice B – Resultados obtidos com o modelo de avaliação de impactes ambientais CML | 71 |
| 9. Apêndice C – Representação gráfica dos resultados obtidos pelo metodo ReCiPe . | 73 |
| 10. Apêndice D – Representação gráfica dos resultados obtidos pelo metodo CML | 76 |
| 11. Anexo A – Descrição das categorias de impacte ambiental avaliadas | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Necessidades energéticas dos estudos indicados. | 13 |
| Figura 2- Índice de intensidade energética de GEE para os estudos considerados. | 15 |
| Figura 3 - Fluxograma do sistema de produção do biodiesel. | 20 |
| Figura 4 - Reacção de conversão dos óleos vegetais em ésteres (Jungbluth <i>et al.</i> , 2007)... | 21 |
| Figura 5 - Fluxograma do modelo de ciclo de vida da produção de biodiesel de girassol.. | 23 |
| Figura 6 - Fluxograma do modelo de ciclo de vida da produção de biodiesel de microalgas. | 24 |
| Figura 7 - Representação de uma lagoa aberta (adaptado Darzins <i>et al.</i> , 2010). | 32 |
| Figura 8 – Avaliação ambiental comparativa da produção de biodiesel de girassol para 1 kg de biodiesel, para alocação mássica, normalização. | 42 |
| Figura 9 - Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de sementes de girassol em regadio. | 44 |
| Figura 10 - Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de sementes de girassol em sequeiro. | 45 |
| Figura 11 - Avaliação ambiental comparativa da produção de biodiesel de microalgas, para 1 kg de biodiesel de microalgas, alocação mássica, normalização. | 47 |
| Figura 12 – a) Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de microalgas com captura de CO ₂ da central termoelétrica. b) Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de microalgas sem captura de CO ₂ | 48 |
| Figura 13 – Resultados alcançados para a categoria alterações climáticas por kg de biodiesel, para os três cenários de atribuição de impactes aos co-produtos. | 50 |
| Figura 14 – Resultados alcançados por kg de biodiesel para alocação mássica e energética. a) Resultados para a categoria alterações climáticas; b) Resultados para a categoria acidificação terrestre, c) Resultados para a categoria eutrofização de água doce; d) Resultado para a categoria eutrofização marinha; e) Resultados para a categoria depleção fóssil. | 52 |
| Figura 15 – Emissões de GEE para o biodiesel com cultivo em sequeiro e regadio para o cenário de AM, com indicação das emissões máximas e mínimas. | 57 |
| Figura 16 – a) Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em regadio, normalização. ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em regadio, ReCiPe. | 73 |
| Figura 17 - Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em sequeiro, normalização. ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em sequeiro, ReCiPe. | 74 |
| Figura 18 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas CapCO ₂ , normalização, ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas CapCO ₂ , ReCiPe. | 74 |
| Figura 19 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas SCapCO ₂ , normalização, ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas SCapCO ₂ , ReCiPe. | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - a) Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em regadio, normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em regadio, CML. | 76 |
| Figura 21 - Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em sequeiro, normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em sequeiro, CML. | 77 |
| Figura 22 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas CapCO ₂ , normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas CapCO ₂ , CML. | 77 |
| Figura 23 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas SCapCO ₂ , normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas SCapCO ₂ , CML. | 78 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Dados gerais sobre os estudos considerados para o girassol. | 7 |
| Tabela 2 – Dados gerais sobre os estudos considerados para as microalgas..... | 8 |
| Tabela 3 – Apresentação da UF e fronteiras do sistema para o biodiesel de microalgas e girassol..... | 10 |
| Tabela 4 - Categorias de impacte CML 2001 (Goedkoop <i>et al.</i> , 2010). | 12 |
| Tabela 5- Categorias de impacte Eco-Indicator 99 (Goedkoop <i>et al.</i> , 2010). | 12 |
| Tabela 6 - Aspectos gerais e metodológicos do biodiesel com base no girassol..... | 18 |
| Tabela 7 - Aspectos gerais e metodológicos do biodiesel com base em microalgas..... | 19 |
| Tabela 8 – <i>Inputs</i> mássicos do cultivo de girassol em regadio por kg de semente de girassol produzida. | 26 |
| Tabela 9 – Actividades agrícolas e transporte associadas ao cultivo em regadio por kg de semente de girassol produzida. | 26 |
| Tabela 10 – <i>Outputs</i> locais do cultivo de girassol por kg de semente de girassol produzida. | 27 |
| Tabela 11 - <i>Inputs</i> mássicos do cultivo de girassol em sequeiro por kg de semente de girassol produzida. | 28 |
| Tabela 12 - Actividades agrícolas e transporte associadas ao cultivo em sequeiro por kg de semente de girassol produzida. | 28 |
| Tabela 13 – <i>Inputs</i> , <i>outputs</i> e produtos da extracção e tratamento do óleo de girassol por kg de óleo de girassol, inventário sem alocação. | 29 |
| Tabela 14 – Transesterificação do óleo de girassol por UF (1 kg de biodiesel), inventário sem alocação. | 30 |
| Tabela 15- <i>Inputs</i> do cultivo de microalgas por kg _{microalgas} para o cenário de captura de CO ₂ da central. | 32 |
| Tabela 16 - <i>Inputs</i> do cultivo de microalgas por kg _{microalgas} para o cenário de utilização de CO ₂ atmosférico. | 33 |
| Tabela 17 – Inventário da extracção e pré-tratamento do óleo de microalgas, por kg de óleo, sem alocação. | 34 |
| Tabela 18 - Inventário da transesterificação do óleo de microalgas, por UF (1 kg biodiesel), sem alocação. | 34 |
| Tabela 19 – Factores de alocação para os co-produtos do biodiesel de girassol. | 35 |
| Tabela 20 - Factores de alocação para os co-produtos do biodiesel de microalgas. | 36 |
| Tabela 21 – Categorias de impacte avaliadas no método ReCiPe (Goedkoop <i>et al.</i> , 2010). | 38 |
| Tabela 22 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de girassol para os cenários considerados, alocação mássica, caracterização. | 42 |
| Tabela 23 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de microalgas para os cenários considerados, alocação mássica, caracterização. | 47 |
| Tabela 24 – Comparação dos resultados entre os métodos de avaliação de impacte CML e ReCiPe para o biodiesel de girassol e microalgas, por kg de biodiesel para o cenário de alocação mássica. | 54 |

| | |
|--|----|
| Tabela 25 – Parâmetros para o cálculo das emissões de N ₂ O. | 55 |
| Tabela 26 – Factores de emissão considerados no cálculo das emissões de N ₂ O. | 56 |
| Tabela 27 – Formulas de cálculo seguido e resultados das emissões de N ₂ O, em regadio e em sequeiro. | 56 |
| Tabela 28 – Consumo anual de gasóleo. | 58 |
| Tabela 29 – Produtividades e nº de ha necessários para garantir a substituição de 10% de gasóleo por biodiesel. | 58 |
| Tabela 30 – Emissões de CO ₂ eq/MJ _{biodiesel} , comparação com outros estudos, biodiesel girassol. | 60 |
| Tabela 31 - Emissões de CO ₂ eq/MJ _{biodiesel} , comparação com outros estudos, biodiesel de microalgas. | 60 |
| Tabela 32 – Impactes ambientais associados a 1 kg de biodiesel de girassol, através do modelo ReCiPe. | 69 |
| Tabela 33 - Impactes ambientais associados a 1 kg de biodiesel de microalgas, cenário CapCO ₂ , através do método ReCiPe. | 70 |
| Tabela 34 - Impactes ambientais associados a 1 kg de biodiesel de microalgas, cenário SCapCO ₂ , através do modelo ReCiPe. | 70 |
| Tabela 35 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de girassol para os cenários considerados, método CML. | 71 |
| Tabela 36 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de microalgas para os cenários considerados, método CML. | 72 |
| Tabela 37 – Descrição das categorias ambientais referidas na dissertação para o modelo CML. | 79 |
| Tabela 38 - Descrição das categorias ambientais referidas na dissertação para o modelo ReCiPe. | 79 |

SIGLAS

- ACV – Avaliação de ciclo de vida
- AC – Alterações climáticas
- A.En – Alocação energética
- AICV – Avaliação de impactes de ciclo de vida
- A.M – Alocação mássica
- AT – Acidificação terrestre
- CapCO₂ – Captura de CO₂
- CV – Ciclo de vida
- DALY's – Disability adjusted life years
- DCO – Depleção da camada do ozono
- DF – Depleção fóssil
- EAD – Eutrofização de água doce
- EM – Eutrofização marinha
- GEE – Gases com efeito de estufa
- GWP – Global warming potential
- IPCC – Intergovernmental panel on climate change
- ISO – International organization for standardization
- PCI – Poder calorífico inferior
- Reg – Regadio
- S.A – Sem alocação
- SCapCO₂ – Sem captura de CO₂
- Seq – Sequeiro
- UE – União Europeia
- UF – Unidade funcional
- VKT – Vehicle kilometers traveled

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

O aquecimento global e a depleção dos recursos petrolíferos são principais preocupações das agendas internacionais, sendo a bioenergia considerada como uma opção chave para a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa e para substituir os combustíveis fósseis.

Em particular os biocombustíveis para o sector dos transportes foram desenvolvidos, introduzidos no mercado e suportados por políticas públicas como uma alternativa aos combustíveis fósseis, por várias razões, nomeadamente:

- Para aumentar a segurança no abastecimento de energia, diversificando a produção de combustíveis com vista em instabilidades geopolíticas e antecipando futuras rupturas nos combustíveis fósseis;
- Para estimular a economia desenvolvendo áreas rurais; e
- Para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) mitigando o aquecimento global (adaptado de van der Voet *et al*, 2010).

Desta forma, os biocombustíveis estão a ser promovidos com o objectivo de contribuir para a resolução destes problemas, conforme é evidenciado pela publicação da directiva 2009/28/CE na Europa, a qual refere metas de 20% para a quota global de energias provenientes de fontes renováveis e 10% de fontes de energia renovável no consumo final de energia no sector dos transportes até ao ano 2020, introduz critérios de sustentabilidade para os biocombustíveis de forma a garantir a disponibilidade comercial dos mesmos.

Neste contexto o Governo Português, através do decreto-lei 117/2010 de 25 de Outubro, apresenta os critérios para a qualificação dos biocombustíveis e biolíquidos como sustentáveis e cria um novo mecanismo de apoio à incorporação dos biocombustíveis no cabaz de combustíveis consumidos no sector dos transportes, dando assim cumprimento à directiva 2009/28/CE que refere que caberá aos Estados-Membros melhorar

significativamente a eficiência energética em todos os sectores, a fim de atingir mais facilmente os seus objectivos em matéria de energia proveniente de fontes renováveis.

De forma a garantir a produção de biodiesel por parte de Portugal, será necessário que se aposte na produção de biodiesel através de matérias-primas endógenas (isto é, cultivadas e processadas em Portugal), como é o caso do girassol e das microalgas. O girassol é cultivado em Portugal, o seu cultivo é feito maioritariamente no Alentejo, havendo ainda uma pequena produção no Centro. Segundo Gírio *et al.* 2010, no ano de 2009 houve uma produção de aproximadamente 27000 t, esta informação foi prestada pelos agricultores ao Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas (IFAP). Desta forma o girassol poderá servir como matéria-prima para produção de biodiesel.

Uma área onde tem havido forte investimento (por todo o Mundo e em Portugal) é no estudo da produção de microalgas, devido à sua elevada potencialidade como matéria-prima para biodiesel. No âmbito nacional a empresa algafuel (www.algafuel.pt) tem mais de 10 anos de experiência no desenvolvimento de projectos com microalgas.

Para que se possa avaliar ambientalmente os dois sistemas de biodiesel, elaborando uma comparação entre ambos, recorreu-se à metodologia científica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), visto que, esta tem demonstrado ser uma ferramenta importante para avaliar os potenciais impactes ambientais dos produtos (Comissão Europeia, 2003). De acordo com a International Organisation for Standardisation (ISO), a ACV estuda as intervenções no ambiente e potenciais impactes associados à vida de um produto, desde a extracção da matéria-prima, uso, até à sua deposição final.

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo efectuar uma avaliação comparativa de ciclo de vida de dois sistemas para produção de biodiesel, utilizando dois tipos de matérias-primas cultivadas em Portugal: o girassol e as microalgas.

O objectivo principal pode ser dividido nos seguintes objectivos específicos:

- Desenvolver um modelo e inventário de ciclo de vida para os dois sistemas de biodiesel (girassol e microalgas);

- Avaliar comparativamente os impactes ambientais de ciclo de vida, com base nos métodos CML 2000 e ReCiPe, procurando efectuar uma análise robusta aos dois sistemas em avaliação;
- Análise de diferentes cenários de cultivo e processamento para os dois sistemas, nomeadamente: para o biodiesel de girassol, dois regimes de cultivo (regadio e sequeiro) e para o biodiesel de microalgas considera-se a captura ou não de CO₂ proveniente de uma central termoeléctrica;
- Avaliar a influência nos resultados de diferentes métodos de atribuição dos impactes ambientais, realizando uma análise de sensibilidade a três métodos de alocação: mássica, energética e sem alocação;
- Identificar a(s) fase(s) de CV que mais contribuem para os impactes ambientais e quais os processos e entradas materiais ou energéticas mais relevantes, identificando oportunidades de melhoria nos dois sistemas em estudo;
- Descrever as simplificações metodológicas adoptadas, analisando a sua influência nos resultados.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos. No primeiro capítulo, onde se encontra esta secção, é feito um enquadramento ao problema e são apresentadas as principais motivações do estudo, sendo também definidos os objectivos. No segundo capítulo é feita uma análise crítica dos estudos publicados sobre a temática, identificando as principais características e resultados. O terceiro capítulo apresenta o modelo e inventário de ciclo de vida (CV), a definição dos cenários considerados e a descrição e inventário das fases de CV para os dois tipos de biodiesel estudados. No quarto capítulo é feita a descrição do método ReCiPe utilizado na avaliação de impactes de ciclo de vida (AICV), e são analisados comparativamente os resultados para os dois sistemas em estudo, sendo ainda feita uma comparação entre os resultados obtidos com o método ReCiPe e CML. Por fim é elaborada uma análise de sensibilidade às emissões de N₂O e são determinadas as áreas de cultivo necessárias para garantir a substituição de 10% do gasóleo no sector do transporte por biodiesel. No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões finais, incluindo recomendações e sugestões para investigações futuras.

2. ESTADO DA ARTE DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DO BIODIESEL PRODUZIDO COM BASE EM GIRASSOL E MICROALGAS

Neste capítulo apresenta-se uma revisão de estudos de ACV do biodiesel produzido com base em girassol e microalgas. Primeiramente será feita uma selecção bibliográfica e uma análise às principais características dos dois tipos de biodiesel. Proceder-se-á a uma análise individual para o biodiesel de girassol e microalgas a parâmetros como a UF, fronteiras do sistema e multifuncionalidade (atribuição de impactes aos co-produtos). Seguidamente analisam-se conjuntamente, para os dois sistemas, os principais resultados obtidos. Por último, apresentam-se umas notas conclusivas e um resumo dos aspectos gerais e metodológicos do biodiesel de girassol e microalgas.

2.1. Introdução

Foi efectuada uma pesquisa em bases de dados científicas, como, science-direct e b-on, e directamente nos motores de busca do Google e Google académico, com base na qual foram seleccionados oito estudos referentes à produção de biodiesel com base em girassol e oito estudos em microalgas, tabela 1 e 2. Esta selecção teve em conta alguns critérios, como a data de publicação dos artigos, estes são de 2008 em diante, a temática do estudo, seleccionando os que abordavam a ACV do biodiesel de girassol e microalgas ou a ACV das matérias-primas em estudo. Houve apenas duas excepções, Kallivroussis *et al.*, 2002 por se tratar de uma análise energética, que data a 2002 e Batan *et al.*, 2010 que aborda as necessidades energéticas e emissões de GEE de biodiesel de microalgas.

2.1.1. Características principais do biodiesel girassol

Através da tabela 1, pode fazer-se uma análise relativamente às principais características do girassol. Como se pode verificar, o horizonte geográfico (que nos indica a localidade, região ou país para onde o estudo está a ser elaborado), representa na sua maioria a Europa, especificamente países Mediterrânicos. A produtividade desta cultura

tem algumas oscilações dependendo do país e até mesmo dentro do mesmo país. Este facto torna-se claro ao analisar as produtividades de Balafoutis *et al.*, 2010, Kallivroussis *et al.*, 2002 e Tsoutsos *et al.*, 2009, estudos realizados para a Grécia. Quando as produtividades são excessivamente baixas, estão geralmente associadas a cultivos em sequeiro e este tipo de cultivo associado à utilização de poucos fertilizantes para que não se desenvolvam plantas invasoras. A produtividade média dos estudos é de 2200 kg/(ha.ano).

Relativamente ao óleo contido nas sementes de girassol, segundo os estudos analisados varia entre 40-49% em relação ao peso seco da semente, no entanto, isto não representa a quantidade de óleo extraída. Geralmente associado a uma extracção mecânica menores quantidades de óleo são recolhidas (Tsoutsos *et al.*, 2009 Viana, 2008), pois a eficiência do processo é baixa. Balafoutis *et al.* 2010, é uma excepção, pois, apesar de uma extracção mecânica alcança valores bastante superiores aos estudos mencionados anteriormente. Por norma as extracções por solvente, como têm níveis de eficiência bastante elevadas, alcança extracções na ordem de 0,44 kg_{óleo}/kg_{semente}, (Requena *et al.*, 2010 e Cotana *et al.*, 2010). A transesterificação é na maioria dos casos feita por via metélica no entanto Viana, 2008, considera a rota etélica.

2.1.2. Características principais do biodiesel microalgas

Os dados gerais recolhidos nos estudos de biodiesel de microalgas encontram-se descritos na tabela 2, mediante os dados analisam-se os diferentes estudos. O horizonte geográfico, diz respeito na maioria dos casos aos Estados Unidos da América. Estes estudos apresentam duas opções de cultivo, em lagoas abertas ou bioreactores, a ultima opção apenas é considerada por dois autores, Stephenson *et al.*, 2010 que compara energética e ambientalmente os dois modos de cultivo e Batan *et al.*, 2010, que apenas considera os bioreactores, os restantes optam pelo cultivo em lagoas abertas.

As lagoas abertas normalmente são sistemas mais económicos quer em construção quer em operação, mais duráveis e com maior capacidade de produção comparando com sistemas fechados (bioreactores), no entanto, geralmente também se encontram mais susceptíveis às condições climáticas, não permitindo o controlo das temperaturas, evaporação e iluminação, além disto estão mais susceptíveis a contaminações (Mata *et al.*, 2009).

Os bioreactores são sistemas flexíveis que podem ser otimizados de acordo com as características biológicas e fisiológicas das espécies de algas (Mata *et al.*, 2009), no entanto apresentam maior encargo e energia nos materiais de construção (Scott *et al.*, 2010), segundo Stephenson *et al.*, 2010 os bioreactores apresentam maiores necessidades energéticas e maiores emissões de GEE.

A espécie de microalga definida para cada situação depende essencialmente das quantidades de lípidos/óleo que contêm, do crescimento e da água utilizada no tipo de cultivo. Geralmente quando se utiliza água doce a espécie escolhida é a *Chlorella Vulgaris*, no caso de água salgada varia o tipo de microalga considerada. A dependência da quantidade de óleo e da taxa de crescimento na escolha da espécie de microalga, como se depreende é importante, pois, quanto maior for a taxa de crescimento, maior produção haverá e quanto maior for o seu conteúdo de óleo, maior quantidade haverá para extrair. No entanto, importa referir que existe uma grande gama de valores para o conteúdo teórico de óleo de cada microalga e mesmo que estas conseguissem alcançar a quantidade máxima teórica, não significa que a sua extracção seja completa. Como se pode observar na tabela dois a quantidade de óleo extraída apresentada pelos estudos varia 0,175 kg óleo/kg microalga (Lardon *et al.*, 2009) e 0,41 kg óleo/kg microalga (Campbell *et al.*, 2010). Há autores que apontam como valor médio de óleo (com triglicerídeos para produção de biodiesel) 25% (Benemann., 2008).

A quantidade de fertilizantes aplicada varia substancialmente consoante o autor, podendo até ser suprimida quando se considera a utilização de águas provenientes de estações de tratamento, sendo considerado que a água possui as quantidades de fertilizantes necessárias (Sander *et al.*, 2010). Da mesma forma a produtividade avançada em cada estudo tem variações por vezes dez vezes superior, varia de 15-150 g/(m².dia), como se pode verificar na tabela dois.

No que toca à extracção do óleo e sua transesterificação as informações permanecem iguais de estudo para estudo. A extracção do óleo é feita por solvente e a transesterificação por via metílica. Consideram também que estas duas técnicas se aplicam às microalgas de forma semelhante à soja ou à colza.

Tabela 1 – Dados gerais sobre os estudos considerados para o girassol.

| Autor/Ano | Produtividade kg _{semt} /(ha.ano) | Óleo extraído kg óleo/kg semt | Tipo extraçã o | Tipo transeste- rificação | Quantidade de fertilizantes | | | | | | | Quant. Pesticidas kg/(ha.ano) | País | | |
|---|---|--|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|---|--|-------------------------------------|------------------|--------|------------------|
| | | | | | N kg/(ha.ano) | P ₂ O ₅ kg/(ha.ano) | K ₂ O kg/(ha.ano) | CaCO ₃ kg/(ha.ano) | Ureia kg/(ha.ano) | Diammo- nium phosphate kg/(ha.ano) | Monoamo- nium phosphate kg/(ha.ano) | | | | |
| Balafoutis <i>et al.</i> , 2010 | 1800 ^a | 0,41 ^a | Extração mecânica | n.a | 60 ^a | 100 | 30 ^a | 0 ^a | | | | | 2,5 ^a | Grécia | |
| | 4550 ^b | 0,38 ^b | | | 60 ^b | 100 | 100 ^b | 200 ^b | 0 | | | | | | 1,5 ^b |
| | 4160 ^c | 0,36 ^c | | | | 0 ^c | 200 ^c | | | | | | | | |
| Cotana <i>et al.</i> , 2010 | 2250 | 0,435 | Extração solvente | - | - | - | - | - | 300 | 200 | 20 | 0,5 | Itália | | |
| Requena <i>et al.</i> , 2010 | 826 | 0,44 | Extração solvente | Via metilica | - | - | - | - | - | - | - | - | Espanha | | |
| Iriarte <i>et al.</i> , 2009 | 2200 | 0,49 ^d | n.a | n.a | 160,04 | 100,1 | 71,94 | 300,08 | - | - | - | 1,03 | Chile | | |
| Kallivroussi <i>et al.</i> , 2002 | 1800 | 0,4-0,42 ^d | Extração mecânica | - | 60 | 30 | - | - | - | - | - | 2,5 | Grécia | | |
| Viana, 2008 | 1400 | 0,23 | Extração mecânica | Via etilica | 29 | 55 | 55 | - | (incluido N) | - | - | 7,45 | Brasil | | |
| Tsoutsos <i>et al.</i> , 2009 | 834 kg _{BD} /ha | 0,1 | Extração mecânica | Via metilica | 70 | - | - | - | - | - | - | 1 | Grécia | | |
| Biograce, 2011 | 2440 | 0,435 | Extração solvente | Via metilica | 39 | 30 | 22 | - | - | - | - | 2 | UE | | |

^{a, b, c} – Representam três diferentes fazendas consideradas no estudo, respectivamente, Orestidia, Palamas, Lygaria; ^d – Quantidade de óleo teórica contido nas sementes.
Semt – Abreviatura de semente; BD – Abreviatura de biodiesel.

Tabela 2 – Dados gerais sobre os estudos considerados para as microalgas.

| Autor/Ano | Cultivo | Alga | Produtividade (g/(m ² .dia)) | Quantidade de fertilizantes | | | | | | | Quantidade óleo | Extracção óleo | Transesterificação | País |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|--|--|--|------------------|-------------------|------------------|----------------|---|--------------------------|------------------------------|---|
| | | | | Ureia | N | P ₂ O ₅ | Mg | P | K | S | | | | |
| Lardon <i>et al.</i> , 2009 | Lagoa aberta | <i>Chlorella Vulgaris</i> | 24,75 ^a 19,25 ^b | - | 46 g/kg MA | - | 3,8 g/kg MA | 9,9 g/kg MA | 8,2 g/kg MA | 2,2 g/kg MA | 0,175 ^a 0,385 ^b kg óleo/kg MA | Solvente ^{h, i} | Via metilica ^{h, i} | França |
| Clarens <i>et al.</i> , 2010 | Lagoa aberta | n.m | 20 | - | 23 ^c 140 ^d 70 ^e (mg/l) | 10 ^c 102 ^d 29 ^e (mg/l) | - | - | - | - | - | - | - | USA (Virgínia, Califórnia, Iowa) |
| Sander <i>et al.</i> , 2010 | Lagoa aberta | n.m | - | Considera-se que a água residual contém as quantidades suficientes de fertilizantes. | | | | | | | 0,288 kg óleo/kg MA | Solvente ^h | Via metilica ^h | USA |
| Yang <i>et al.</i> , 2010 | Lagoa aberta | <i>Chlorella Vulgaris</i> | 35 | - | 0,33 kg/kg BD | - | 0,15 kg/kg BD | 0,71 kg/kg BD | 0,58 kg/kg BD | - | 0,3 kg óleo/kg MA | n.d ^h | n.d ^h | USA |
| Stephenson <i>et al.</i> , 2010 | Bioreactores; Lagoa aberta | <i>Chlorella Vulgaris</i> | 150 (BR) ^f 30 (LA) ^g | - | 0,059 kg/kg BD | - | - | - | - | - | 0,4 ^l | Solvente ⁱ | n.d ⁱ | UK |
| Batan <i>et al.</i> , 2010 | Bioreactores | <i>Nanno Chloropsis</i> | 25 | - | 147 g/kg MA | 20 g/kg MA | - | - | - | - | 0,5 ^l | Solvente ^h | Via metilica ^h | USA |
| Campbell <i>et al.</i> , 2010 | Lagoa aberta | <i>Dunaliella Tertiolecta</i> | 30 ^j 15 ⁱ | 896 kg/ha/a | 196,8 kg/ha/a ^k | - | - | 61,5 kg/(ha.a) | - | - | 0,41 kg óleo/kg MA | - | Via metilica ⁱ | Austrália |
| Clarens <i>et al.</i> , 2011 | Lagoa aberta | n.m | 27,9 | - | 6,2 ^m 6,1 ⁿ 7,6 ^o | - | - | - | - | - | 0,196 | Solvente | Via metilica | USA |

^a – Cultivo em condições normais de N; ^b – Cultivo em baixas concentrações de N; ^c – Quantidade mínima de N e P₂O₅ determinada; ^d – Quantidade máxima de N e P₂O₅ determinada; ^e – Quantidades prováveis determinadas de N e P₂O₅; ^f – Bioreactores; ^g – Lagoas abertas; ^h – Idêntico à soja; ⁱ – Idêntico à colza; ^j – Produtividades optimistas e realistas, respectivamente 30 e 15 g/(m².dia); ^k – A unidade kg/(ha.a), significa o numero de kg por ha e por ano; ^l – Quantidade teórica óleo; ^m – Quantidade requerida para o cenário em que há digestão anaeróbia da massa total de microalgas. ⁿ – Quantidade requerida quando há extracção de lipidos para biodiesel e DA da massa residual. ^o – Quantidade requerida quando há produção de biodiesel e combustão directa da massa residual ou combustão directa de toda a biomassa. MA - Microalgas; BD – Biodiesel.

2.2. Unidade funcional (UF) e fronteiras do sistema

A unidade funcional (UF) é uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema de produto, que constitui a referência para a qual as entradas e as saídas são relacionadas. Esta referência é necessária para assegurar que a comparabilidade dos resultados ACV é feita numa base comum, sendo particularmente crítica quando diferentes sistemas estão a ser avaliados (Ferreira, 2004). Nos estudos considerados a UF representa duas diferentes bases, a energética e a mássica.

Quando se avalia um sistema de produto, os limites do sistema em estudo devem ser claramente definidos. Devem ser demarcados os limites entre o sistema de produto e o ambiente, e entre o sistema de produto investigado e outros sistemas de produto, citado por Assies, 1992, referido por Ferreira, 2004. Assim, as fronteiras do sistema em estudo dependem do objectivo do estudo, deste modo, é necessário analisar com algum cuidado as fronteiras, pois, por vezes diferentes designações indicam iguais fronteiras.

2.2.1. Biodiesel de girassol

Como se pode verificar na tabela 3, a UF considerada no caso dos estudos do girassol tanto é de base energética, como, mássica, ou seja, os dados são apresentados em função da energia ou da quantidade de biodiesel e/ou sementes.

Para o biodiesel de girassol são utilizados dois sistemas diferentes “cradle-to-gate” e “well-to-wheels”. O sistema mais empregado para a definição das fronteiras do estudo no caso do girassol é “cradle-to-gate” (Iriarte *et al.* 2009, Viana, 2008, Cotana *et al.* 2010, Requena *et al.* 2010) em que as entradas em cada processo são consideradas desde o ponto em que são extraídos os recursos da natureza, sendo as saídas seguidas até à saída do produto do local de fabrico. Balafoutis *et al.* 2010 considera um sistema “well-to-wheels”, que difere do sistema anterior pois considera que as saídas são seguidas até à utilização do óleo de girassol e Biograce, 2011, considera um sistema “well-to-pump” em que as saídas são contabilizadas no processo até que o biodiesel se encontre num ponto de venda pronto a utilizar.

2.2.2. Biodiesel de microalgas

Relativamente ao biodiesel de microalgas à semelhança do de girassol considera as mesmas bases (energética e mássica) para a UF, como se pode verificar na tabela 3.

Nos estudos do biodiesel de microalgas encontram-se sistemas diferentes dos encontrados no girassol, além de sistemas “cradle-to-gate”, “well-to-pump” e “well-to-wheels” há também “cradle-to-combustion”. Clarens *et al.* 2009 e Yang *et al.* 2010 consideram um sistema “cradle-to-gate”, dois autores consideram um sistema “cradle-to-combustion” (Lardon *et al.* 2009 e Stephenson *et al.* 2010) que considera todas as saídas até à combustão do biodiesel. Batan *et al.* 2010 e Sander *et al.* 2010 consideram um sistema “well-to-pump” e Clarens *et al.*, 2011 considera um sistema “well-to-wheels”. Campbell *et al.*, 2010 elaboram um sistema “cradle-to-grave”, nesta situação as saídas do sistema são seguidas até à descarga final do resíduo no ambiente.

Na tabela 3 encontra-se um resumo de todos os sistemas utilizados nos estudos analisados.

Tabela 3 – Apresentação da UF e fronteiras do sistema para o biodiesel de microalgas e girassol.

| Biodiesel girassol | | | Biodiesel microalgas | | |
|------------------------------------|---|--------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|
| Artigo | Fronteiras do sistema | UF | Artigo | Fronteiras do sistema | UF |
| Balafoutis <i>et al.</i> , 2010 | <i>Well-to-Wheels (well-to-tank + tank-to-wheels)</i> | 1 MJ oleo girassol | Lardon <i>et al.</i> , 2009 | <i>Cradle-to-combustion (combustivel) cradle-to-grave (instalação)</i> | Combustão de 1 MJ combustivel |
| Cotana <i>et al.</i> , 2010 | <i>Cradle-to-gate</i> | 1 MJ biodiesel | Clarens <i>et al.</i> , 2010 | <i>Cradle-to-gate</i> | 317 GJ energia biomassa |
| Requena <i>et al.</i> , 2010 | <i>Cradle-to-gate</i> | 1 kg biodiesel | Sander <i>et al.</i> , 2010 | <i>Well-to-pump</i> | 1000 MJ biodiesel |
| Iniarre <i>et al.</i> , 2010 | <i>Cradle-to-gate</i> | 1 t sementes | Jia Yang <i>et al.</i> , 2011 | <i>Cradle-to-gate</i> | 1 kg biodiesel |
| Kallivroussis <i>et al.</i> , 2002 | <i>n.a</i> | <i>n.a</i> | Stephenson <i>et al.</i> , 2010 | <i>Cradle-to-combustion</i> | 1 t biodiesel |
| Viana, 2008 | <i>Cradle-to-gate</i> | 39,1 MJ biodiesel | Batan <i>et al.</i> , 2010 | <i>Well-to-pump</i> | <i>n.d</i> |
| Tsoutsos <i>et al.</i> , 2009 | <i>Cradle-to-gate</i> | 971 kg biodiesel | Campbell <i>et al.</i> , 2010 | <i>Cradle-to-grave</i> | 1 tkm |
| Biograce, 2011 | <i>Well-to-pump</i> | 1 MJ biodiesel | Clarens <i>et al.</i> , 2011 | <i>Well-to-wheel</i> | VKT/ha Impacte/VKT |

VKT – vehicle kilometers traveled; impactes – uso de energia util, gases com efeito de estufa (GEE) e água utilizada por VKT.

2.3. Multifuncionalidade – atribuição de impactes aos co- produtos

Um processo multifuncional é um processo unitário ao qual está associado mais do que um fluxo funcional, onde se incluem a co-produção, o processamento combinado de resíduos e a reciclagem (Guinée *et al*, 2009). Tal é o que se verifica em sistemas de produção de biodiesel. A forma de atribuição dos impactes ambientais aos co-produtos varia consoante o estudo. Segundo as ISO 14040 (2006), a alocação sempre que possível deve ser evitada, devendo assim, proceder-se à divisão de um processo unitário em um ou mais sub-processos ou proceder-se à expansão das fronteiras do sistema (método de substituição de impactes ambientais, em que um co-produto vai substituir um produto existente no mercado). Quando estes procedimentos não são passíveis de aplicação, então, como refere Garcia, 2010, os *inputs* e *outputs* devem, ser alocados entre os co-produtos na proporção de parâmetros físicos e termodinâmicos (como massa ou conteúdo energético) ou de acordo com o valor económico dos produtos.

2.3.1. Biodiesel de girassol

Apenas três estudos apresentam definidos os métodos de atribuição de impactes considerado. Balafoutis *et al.*, 2010, considera uma alocação energética, Viana., 2008, uma alocação mássica e Biograce, 2011, considera uma alocação energética, os factores de alocação considerados encontram-se detalhadamente na tabela 6.

2.3.2. Biodiesel de microalgas

Para o biodiesel de microalgas são seis os estudos que têm definido os métodos de atribuição de impacte. Desta forma, cinco estudos consideram o método de substituição de impactes ambientais (Sander *et al.*, 2010, Stephenson *et al.*, 2010, Campbell *et al.*, 2010, Batan *et al.* 2010 e Clarens *et al.*, 2011) e Lardon *et al.*, 2009, considera uma alocação energética. Na tabela 7, encontram-se definidos os métodos de substituição e factor de alocação atribuído.

2.4. Análise de resultados

2.4.1. Categorias de impacte ambiental avaliadas

As categorias de impacte ambiental avaliadas num estudo vão de encontro com o seu objectivo. Existem métodos de avaliação de impacte que podem ser utilizados na avaliação dos impactes ambientais, como CML 2001 e Eco-Indicator 99, referidos nos estudos avaliados. Na tabela 4 encontram-se as categorias de impacte definidas pelo modelo CML 2001 e na tabela 5 do Eco-Indicator 99.

Tabela 4 - Categorias de impacte CML 2001 (Goedkoop *et al.*, 2010).

| Categoria de Impacte | Terminologia Inglesa | Unidade equivalente |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Depleção abiótica | <i>Abiotic depletion</i> | kg Sb _{eq} |
| Efeito de estufa | <i>Global warming (GWP 100)</i> | kg CO ₂ eq |
| Depleção da camada do azono | <i>Ozone layer depletion</i> | kg CFC -11 _{eq} |
| Toxicidade humana | <i>Human toxicity</i> | kg DCB _{eq} |
| Ecotoxicidade de recursos freáticos | <i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i> | kg DCB _{eq} |
| Ecotoxicidade de recursos marinhos | <i>Marine aquatic ecotoxicity</i> | kg DCB _{eq} |
| Ecotoxicidade terrestre | <i>Trrestrial ecotoxicity</i> | kg DCB _{eq} |
| Oxidação fotoquímica | <i>Photochemical oxidation</i> | kg C ₂ H ₂ eq |
| Acidificação | <i>Acidification</i> | kg SO ₂ eq |
| Eutrofização | <i>Eutrophication</i> | kg PO ₄ eq |
| Criação de ozono fotoquímico | <i>Photochemical ozone creation</i> | kg C ₂ H ₄ eq |
| Radiação radioactiva | <i>Radioactive radiation</i> | disability adjusted life years |

Tabela 5- Categorias de impacte Eco-Indicator 99 (Goedkoop *et al.*, 2010).

| Categorias principais | Categorias específicas | Unidade equivalente |
|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Human Health | <i>Carcinogens</i> | DALY |
| | <i>Respiratory Organics</i> | |
| | <i>Respiratory Inorganics</i> | |
| | <i>Climate Change</i> | |
| | <i>Radiation</i> | |
| Ecosystem quality | <i>Ozone Layer</i> | PDF*m ² yr |
| | <i>Ecotoxicity</i> | |
| | <i>Acidification/Eutrophication</i> | |
| Resources | <i>Land Use</i> | MJ surplus |
| | <i>Minerals</i> | |
| | <i>Fossil Fuels</i> | |

Dois estudos consideram os impactes ambientais com base no modelo Eco-indicator 99, Requena *et al.* 2010 avalia tanto as categorias principais como as específicas e Cotana *et al.* 2010 avalia apenas as categorias específicas. O modelo CML 2001 é utilizado por dois autores, Lardon *et al.* 2009 e Iriarte *et al.* 2009, este último além das

categorias definidas pelo modelo avalia também as necessidades de energia e água. Os restantes autores focalizam apenas algumas das categorias individualmente, para mais detalhe consultar tabela 6 e 7.

2.4.2. Necessidades energéticas

Relativamente às necessidades de energia e emissão de GEE (abordado em detalhe na subsecção seguinte), é necessário proceder a uma análise cuidada dos dados, pois, em muitos casos não são apresentados claramente e dependendo do objectivo geral do estudo, pode não contemplar a análise destes indicadores. Outro problema, relacionado com a análise destes dados é a forma como estes são apresentados na avaliação de impactes ambientais, pois, quando estes se encontram apenas na forma normalizada não é possível obter os valores reais em cada categoria de impacte (Cotana *et al.* 2010, Requena *et al.* 2010). O mesmo acontece quando os dados são apresentados graficamente na fase de caracterização, pois estes são apresentados percentualmente por categoria de impacte.

De todos os estudos analisados apenas seis definem as suas necessidades energéticas, como se pode verificar na figura 1. Torna-se difícil fazer uma comparação entre o girassol e as microalgas, pois, os autores não se focam nas mesmas fases do processamento do biodiesel.

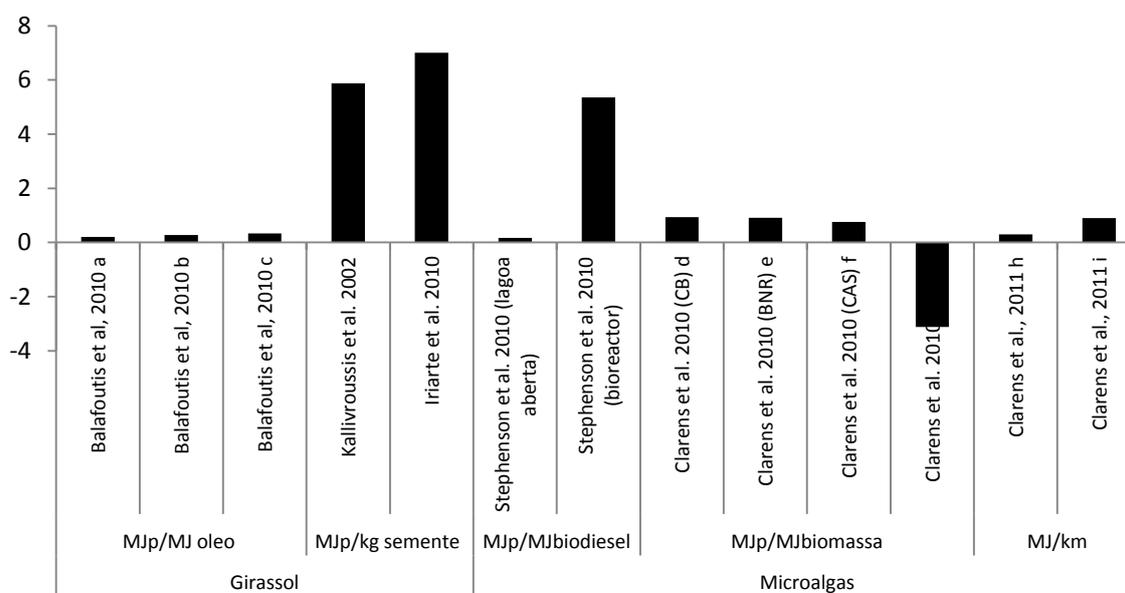


Figura 1- Necessidades energéticas dos estudos indicados.

a, b, c - Representam três diferentes fazendas na Grécia, Orestiada, Palamas, Lygaria, respectivamente.

^d - Caso base considerado no estudo. ^{e, f, g} – Representam três tipos de águas parcialmente tratadas. ^h - Energia necessária para a produção de biodiesel de microalgas e bioelectricidade. ⁱ – Energia necessárias para a produção de bioelectricidade através de microalgas.

2.4.3. Emissão de GEE

O índice de intensidade GEE ($\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}_f$) representa a quantidade de emissões, por unidade de energia final de biocombustíveis, (Malça e Freire, 2011). Nos estudos analisados este parâmetro varia consideravelmente. Como se pode observar na figura 2 os valores encontram-se no intervalo de -75,29 e 320 $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}_f$, para o biodiesel de microalgas e no intervalo de 13 e 65,4 $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}_f$ para o de girassol. Para o biodiesel de girassol os valores encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza, no entanto se analisarmos com atenção o estudo Iriarte *et al.*, 2009, verificamos como o nível de emissões pode variar consoante as considerações feitas. Ao aplicar os factores de emissão definidos pelo IPCC para as emissões de N_2O é necessário ter em conta o intervalo de incerteza que lhe está associado, pois, como se pode verificar na figura 2, considerando o factor de emissão associado ao menor valor do intervalo de incerteza ou ao maior obtêm-se variações significativas, variando entre 23 e 65 $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}_f$, respectivamente. Outro importante parâmetro referido e analisado por este autor é a alteração no uso dos solos (land use change - LUC), que pretende quantificar o impacto global LUC e as emissões relacionadas com os vários cenários de expansão agrícola dos biocombustíveis (Lange, 2011). A análise de sensibilidade elaborada a este parâmetro demonstrou que os valores de emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ variam entre 31,5 e 53,8 $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}_f$, ver figura 2. Relativamente ao biodiesel de microalgas, existe uma grande oscilação nos valores do índice de intensidade de GEE encontrados, isto, deve-se tanto a parâmetros técnicos (tipo de cultivo considerado), como a parâmetros metodológicos (atribuição de impactes aos co-produtos), pois, como se pode analisar na figura 2, as maiores emissões estão associadas ao cultivo em bioreactores e as menores à utilização do farelo de microalgas para aquicultura.

Torna-se importante referir que a unidade MJ_f não representa a mesma fonte de energia final para todos os estudos apresentados na figura 2. Para Clarens *et al.*, 2009 representa a energia final associada à biomassa, Viana, 2008, Stephenson *et al.*, 2010, Batan *et al.*, 2010 e Biograce, 2011 à energia final associada ao biodiesel, Iriarte *et al.*,

2009 e Cotana *et al.*, 2010 a energia final associada às sementes e Balafoutis *et al.*, 2010, considera a energia final associada ao óleo de girassol.

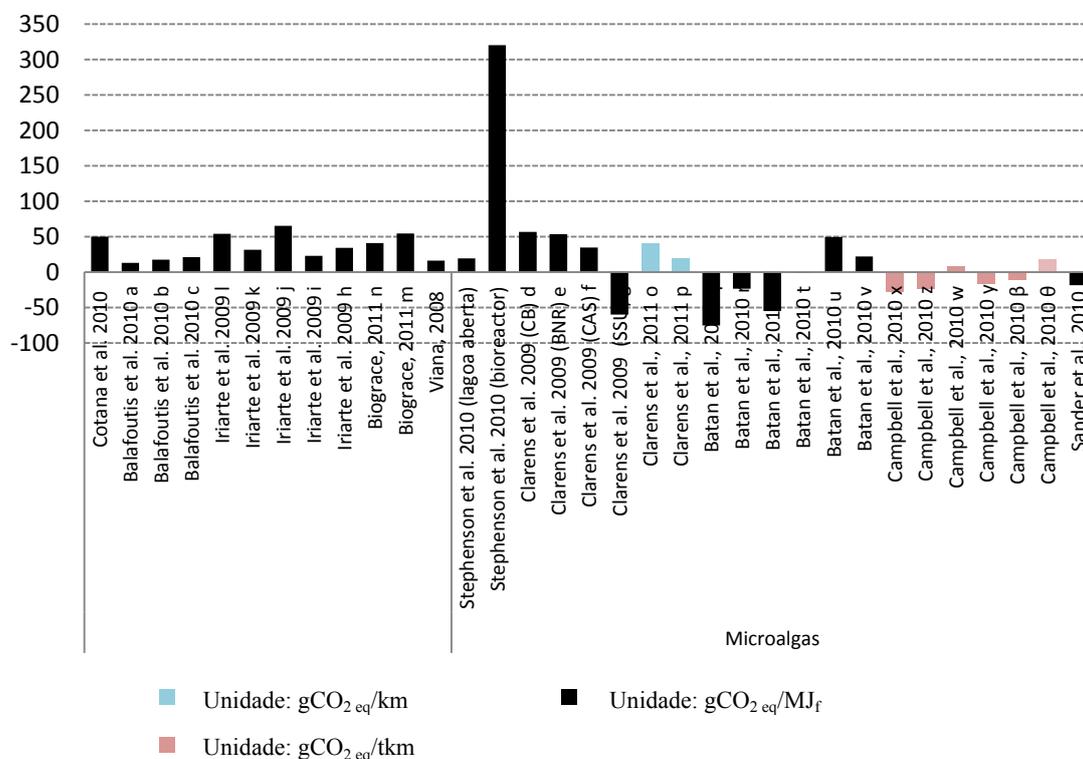


Figura 2- Índice de intensidade energética de GEE para os estudos considerados.

- a, b, c - Representam três diferentes fazendas na Grécia, Orestiada, Palamas, Lygaria, respectivamente.
d - Caso base considerado no estudo; e, f, g - Representam três tipos de águas parcialmente tratadas;
h - Caso base cultivo das sementes girassol; i - Análise de sensibilidade às emissões de N₂O, emissões de CO₂eq com base no valor mais baixo admitido pelo intervalo de incerteza aplicado aos factores do IPCC;
j - Análise de sensibilidade às emissões de N₂O, emissões de CO₂eq com base no valor mais alto admitido pelo intervalo de incerteza aplicado aos factores do IPCC; k - Análise de sensibilidade à alteração no uso dos solos, cenário 1, que considera a utilização de terra de pastos severamente degradada para o cultivo do girassol; l - Análise de sensibilidade à alteração no uso dos solos, cenário 2 que considera o aproveitamento de pastos para o cultivo de terra. n - Emissões quando é aplicada alocação energética. m - Emissões quando não qualquer tipo de alocação. o - Emissões quando há produção de biodiesel e bioelectricidade. p - Emissões quando há apenas produção de bioelectricidade. q - Emissões para sistema well-to-pump para o cenário de substituição. r - Emissões para o sistema well-to-pump para o cenário de alocação energética. s - Emissões para o sistema well-to-pump para o cenário de alocação económica. t - Emissões para sistema well-to-wheels para o cenário de substituição. u - Emissões para o sistema well-to-wheels para o cenário de alocação energética. v - Emissões para o sistema well-to-wheels para o cenário de alocação económica. x - Emissões por tkm quando CO₂ provem fabrica amoníaco, para uma produtividade de 30 g/(m².dia); w - Emissões por tkm quando o CO₂ provem dos gases de combustão central eléctrica, para uma produtividade de 30 g/(m².dia); z - Emissões por tkm com CO₂ entregue em camião, para uma produtividade de 30 g/(m².dia); y - Emissões por tkm quando CO₂ provem fabrica amoníaco, para uma produtividade de 15 g/(m².dia); β - Emissões por tkm quando o CO₂ provem dos gases de combustão central eléctrica, para uma produtividade de 15 g/(m².dia); θ - Emissões por tkm com CO₂ entregue em camião, para uma produtividade de 15 g/(m².dia).

2.5. Notas conclusivas

Este capítulo permite obter uma visão geral do que já foi estudado na produção de biodiesel com base em girassol e microalgas. Como se pode verificar o horizonte geográfico destes estudos na sua maioria diz respeito ao Continente Europeu e Americano. Verifica-se que existe uma grande diferença no cultivo da matéria-prima, visto, que se analisa uma cultura terrestre e uma cultura aquática, no entanto, quanto à extracção e transesterificação do óleo conclui-se que o processo é idêntico. Apesar de se extrair uma maior quantidade de óleo por kg de matéria-prima para o girassol, a produtividade das microalgas é bastante superior, o que revela uma maior quantidade de óleo por ha para as microalgas.

Verifica-se que o girassol pode ser cultivado tanto em regadio como em sequeiro, estando normalmente a este último associada uma menor produtividade e menor fertilização, verifica-se que são aplicadas extracções mecânicas e por solvente. O cultivo de microalgas é feito em lagoas abertas ou bioreactores, a este último encontram-se normalmente maiores gastos energéticos associados. A espécie de microalga, varia consoante o meio de cultura, em água doce usa-se normalmente a *Chorella Vulgaris* para água salgada há uma variação na espécie considerada. A extracção definida nos estudos é sempre por solvente.

As escolhas metodológicas, como a definição das fronteiras do sistema, UF e categorias de impacte ambientais avaliadas não variam significativamente entre os dois sistemas. São definidas fronteiras idênticas, por vezes com diferentes terminologias, a UF tem por base os mesmos parâmetros (mássicos e energéticos). Os métodos considerados para análise dos impactes ambientais são os mesmos para os dois tipos de biodiesel, CML 2001 e Eco-Indicator99. Verifica-se que para ambos os sistemas há estudos que consideram a análise individual de determinadas categorias de impacte ambiental, como emissão GEE e análises energéticas. É importante referir que a forma de atribuição de impactes aos co-produtos, difere um pouco, nas algas é essencialmente efectuado o método de substituição de impactes enquanto no girassol são efectuadas diferentes tipos de alocação.

Como se pode aferir ao longo do capítulo consoante as escolhas metodológicas efectuadas, obtêm-se resultados bastante distintos, tal verifica-se claramente nas emissões de GEE e nas necessidades energéticas.

Tabela 6 - Aspectos gerais e metodológicos do biodiesel com base no girassol.

| País | Autor/Ano | Biomassa/combustível | Unidade Funcional | Limites do sistema | Atribuição de impactes | Categorias de impacto incluídas |
|---------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|---|---|--|
| Grécia | Balafoutis <i>et al.</i> , 2010 | Girassol | 1 MJ oleo girassol | <i>Well-to-Wheels (dividido em well-to-tank + tank-to-wheels)</i> | Alocação energética: 55,1% oleo girassol e 44,9% farelo | Emissões de GEE e E _{req} |
| Itália | Cotana <i>et al.</i> , 2010 | Girassol e colza/biodiesel | 1 MJ biodiesel | <i>Cradle-to-gate</i> | n.d | Respiração orgânicos e inorgânicos, alterações climáticas, radiação, depleção camada do ozono, ecotoxicidade, acidificação/eutrofização, uso de terra, minerais e combustíveis fósseis |
| Espanha | Requena <i>et al.</i> , 2010 | Girassol, colza e soja/biodiesel | 1 kg biodiesel | <i>Cradle-to-gate</i> | n.d | Cancirogeneos, respiração orgânica e inorgânica, alterações climáticas, radiação, camada do ozono, ecotoxicidade, acidificação/eutrofização, uso de terra, minerais, combustíveis fósseis, qualidade de ecossistemas, saúde humana e recursos |
| Chile | Iriarte <i>et al.</i> , 2009 | Girassol e colza | 1 t sementes | <i>Cradle-to-gate</i> | n.a: diz respeito ao cultivo o produto é apenas um, daí não ser necessária alocação | Depleção abiótica, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade aquática, aquecimento global, toxicidade humana, depleção da camada do ozono, criação de ozono fotoquímico, radiação radioactiva, ecotoxicidade terrestre, indicador necessidades energéticas, indicador necessidades de água |
| Grécia | Kallivroussis <i>et al.</i> , 2002 | Girassol/biodiesel | n.a | <i>n.a</i> | n.a | n.a |
| Brasil | Viana, 2008 | Girassol/biodiesel | 39,1 MJ biodiesel | <i>Cradle-to-gate</i> | Alocação mássica: 26,4% oleo girassol e 73,6% ao farelo; 90,7% biodiesel e 9,3% à glicerina | n.a |
| Grécia | Tsoutsos <i>et al.</i> , 2009 | Girassol/biodiesel | 971 kg biodiesel | <i>Cradle-to-gate</i> | n.d | Cancirogeneos, respiração orgânica e inorgânica, alterações climáticas, radiação, camada do ozono, ecotoxicidade, acidificação/eutrofização, uso de terra, minerais, combustíveis fósseis |
| UE | Biograce, 2011 | a | 1 MJ biodiesel | <i>Well-to-pump</i> | Alocação energética: 65,8% Óleo girassol e 34,3% ao farelo 95,7% Biodiesel e 4,3% glicerina | Emissões de GEE |

a – beterraba sacarina, trigo, milho, cana de açúcar/etanol; colza, girassol, soja, palma, resíduos vegetais ou óleo animal/biodiesel; colza, girassol e palma/hidrogénio óleo vegetal; colza/óleo vegetal puro; biogas resíduos sólidos urbanos, biogas chorume seco e húmido/gás natural comprimido.

Tabela 7 - Aspectos gerais e metodológicos do biodiesel com base em microalgas.

| País | Autor/Ano | Biomassa/combustível | Unidade Funcional | Limites do sistema | Atribuição de impactes | Categorias de impacte incluídas |
|----------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|--|---|---|
| França | Lardon <i>et al.</i> , 2009 | Microalgas/biodiesel | Combustão de 1 MJ combustível | <i>Cradle-to-combustion (para o combustível) cradle-to-grave (para a instalação)</i> | Alocação energética: 37,9% óleo de algas e 62,1 % farelo de algas | Depleção abiótica, acidificação, eutrofização, toxicidade marinha, aquecimento global, toxicidade humana, depleção da camada do ozono, radioactividade, uso terra, oxidação fotoquímica |
| USA (Virgínia, califórnia, Iowa) | Clarens <i>et al.</i> , 2010 | Microalgas | 317 GJ energia biomassa | <i>Cradle-to-gate</i> | n.a: diz respeito ao cultivo o produto é apenas um, daí não ser necessária alocação | Uso de terra, necessidades energéticas, necessidades de água, emissão de gases com efeito de estufa, eutrofização |
| USA | Sander <i>et al.</i> , 2010 | Microalgas/biodiesel | 1000 MJ biodiesel | <i>Well-to-pump</i> | Substituição: farelo de algas substitui milho para produção de etanol | E _{req} ; emissões CO ₂ ; emissões para ar |
| USA | Yang <i>et al.</i> , 2010 | Microalgas/biodiesel | 1 kg biodiesel | <i>Cradle-to-gate</i> | n.d | Necessidades de água e nutrientes |
| UK | Stephenson <i>et al.</i> , 2010 | Microalgas/biodiesel | 1 t biodiesel | <i>Cradle-to-combustion</i> | Substituição: farelo de algas é utilizado em DA para produzir metano que seria queimado para produção de calor | Potencial de aquecimento global, requerimento de energia fóssil, uso de água |
| USA | Batan <i>et al.</i> , 2010 | Microalgas/biodiesel | n.d | <i>Well-to-pump</i> <i>Well-to-wheels</i> | Alocação energética, alocação económica e Substituição: farelo de algas serve como alimento em aquiculturas de peixe e glicerina substitui directamente a glicerina com origem no petróleo | Requerimentos de energia, emissão gases com efeito de estufa |
| Austrália | Campbell <i>et al.</i> , 2010 | Microalgas/biodiesel | 1 tkm | <i>Cradle-to-grave</i> | Substituição: farelo de algas é utilizado em DA para produzir metano para queima com produção de calor | Emissão de GEE, análise económica |
| USA | Clarens <i>et al.</i> , 2011 | Microalgas, colza, switchgrass/biodiesel, bioelectricidade | VKT/ha Impactes/VKT | <i>Well-to-Wheel</i> | Sem alocação e Substituição: DA do farelo de microalgas | Numero de quilómetros percorridos, emissões de GEE, energia líquida utilizada e água necessária. |

3. MODELO E INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Neste capítulo serão apresentados os modelos e inventários de ciclo de vida (CV) do biodiesel produzido através de duas matérias-primas distintas: girassol e microalgas. Na primeira secção é feita uma descrição da produção de biodiesel. Na segunda secção é apresentada resumidamente a metodologia de ACV com descrição das suas fases e são definidas a unidade funcional (UF) e as fronteiras do sistema para o biodiesel produzido com base nos dois tipos de matéria-prima. Na terceira secção são descritas pormenorizadamente as várias fases de CV dos dois tipos de biodiesel (girassol e de microalgas), incluindo os respectivos inventários. Na secção final é analisada a problemática da multifuncionalidade na cadeia do biodiesel, sendo discutidos diversos métodos de atribuição de impactes ambientais.

3.1. Produção de biodiesel

O biodiesel é um combustível produzido a partir de óleos vegetais, que pode ser utilizado em substituição do gasóleo de origem fósil, a sua qualidade é regulada pela norma Europeia EN 14214 (Fonseca, 2007). O biodiesel pode ser utilizado puro ou misturado com uma determinada percentagem de gasóleo. De uma forma geral, o sistema de produção do biodiesel passa pelo cultivo da matéria-prima, extracção do óleo, pré-tratamento do óleo e transesterificação, como se pode observar na figura 3 e descrito de seguida:



Figura 3 - Fluxograma do sistema de produção do biodiesel.

- **Cultivo da matéria-prima** – O cultivo varia consoante o tipo de cultura, esta pode ser uma cultura terrestre ou em meio aquático. Esta fase será abordada em detalhe na secção 3.3.

- **Extracção do óleo** – As duas formas principais de extracção do óleo são extracção mecânica e extracção por solvente (esta última é a considerada na presente dissertação). Na extracção mecânica, também referida como extracção a frio, geralmente a matéria-prima é aquecida a uma temperatura entre os 40-50°C e depois as sementes são esmagadas numa prensa (Jungbluth *et al.*, 2007). Na extracção por solvente consegue extrair-se a maioria do óleo contido na matéria-prima utilizando um solvente, normalmente hexano, para dissolver o óleo. Depois da extracção do óleo, o óleo é separado do solvente por um processo de destilação. A extracção por solvente tem uma elevada eficiência e produz óleos vegetais com um elevado grau de pureza, quando comparada com a extracção mecânica (Jungbluth *et al.*, 2007).

- **Pré-tratamento do óleo** – Antes da produção do biodiesel o óleo é tratado para remover os ácidos gordos livres contidos no óleo, até um máximo de 0,5%. É também adicionado ácido fosfórico para eliminar os fosfolípidos contidos no óleo.

- **Transesterificação** – A reacção que converte os óleos vegetais em ésteres encontra-se descrita na figura 4. Nesta reacção os triglicerídios e um álcool vão reagir na presença de um catalisador. Existem três métodos básicos para a obtenção do biodiesel, dependendo do catalisador, a transesterificação pode ser por base ácida, alcalina ou enzimática. Na presente dissertação, e na maioria dos processos de produção de biodiesel em Portugal e na Europa, a transesterificação é feita por via alcalina, em que o óleo reage com um álcool, geralmente metanol, e na presença de um catalisador alcalino (e.g. metilato de sódio, hidróxido de sódio), dando origem ao biodiesel e à glicerina.

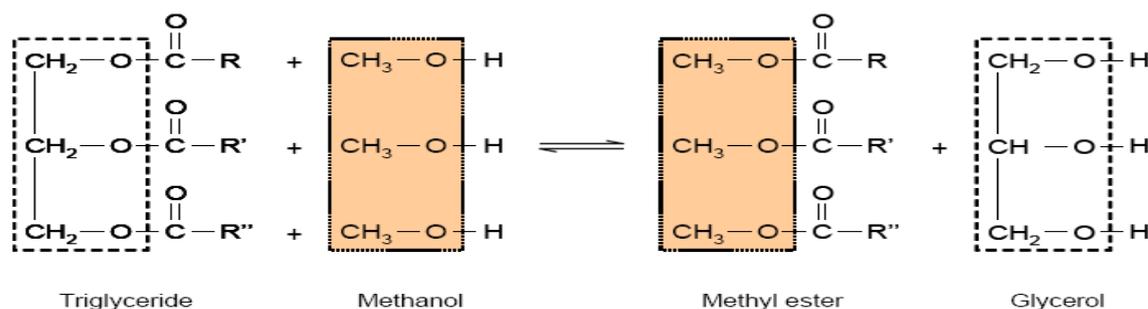


Figura 4 - Reacção de conversão dos óleos vegetais em ésteres (Jungbluth *et al.*, 2007).

3.2. Metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV)

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma metodologia utilizada para avaliar os potenciais impactes ambientais associados a um produto, processo ou actividade, através da análise e quantificação do consumo de recursos e das emissões (Bentrup *et al.*, 2004). A ACV é uma ferramenta de avaliação que permite caracterizar de uma forma holística os fluxos de materiais e energia elaborando uma análise da carga ambiental de um produto em todas as suas fases, desde a extracção da matéria-prima, aquisição de energia, produção de materiais, fabrico, utilização, reciclagem e destino final (*from cradle-to-grave*). Esta forma de pensar tem como objectivo principal evitar a transferência de impactes de um meio para outro e/ou de uma fase do CV para outra. Isto significa minimizar os impactes numa das fases do CV, região geográfica ou categoria de impacte particular, evitando, ao mesmo tempo, aumentos noutras fases, regiões ou categorias (Garcia, 2010).

A ACV baseia-se na análise de sistemas e tratando os processos como fazendo parte de uma cadeia de subsistemas que trocam *inputs* e *outputs* entre si, (Malça e Freire, 2006). Esta metodologia divide-se em quatro fases bem estruturadas:

- Definição dos objectivos e do âmbito, que fornece a descrição do sistema com base nas suas fronteiras e unidade funcional (Rebitzer, 2004);
- Inventário de ciclo de vida, que consiste na recolha de dados e procedimentos de cálculo para quantificar todos os *inputs* e *outputs* relevantes no sistema;
- Avaliação de impactes ambientais de ciclo de vida, compreende o cálculo das potenciais contribuições para as categorias de impacte consideradas em análise que caracteriza e avalia os efeitos das cargas ambientais consideradas no inventário de CV; e
- Interpretação, pode constituir um processo iterativo, pois, está directamente relacionada com todas as fases de ACV.

3.3. Fronteiras do sistema e unidade funcional

Para a realização de um estudo de ACV é necessário definir as fronteiras do sistema assim como definir a UF, de modo a identificar e calcular os fluxos de massa e

energia à entrada e saída do sistema. As fronteiras do sistema representam a separação entre o sistema e o ambiente que a envolve. Para ACV do biodiesel de girassol e do biodiesel de microalgas será considerada uma abordagem “*cradle-to-gate*” tendo sido definida para UF: 1 kg de biodiesel produzido.

Na figura 5 apresenta-se o modelo de ciclo de vida desenvolvido e os principais fluxos de materiais e energia que atravessam a fronteira do sistema, assim como as duas alternativas consideradas para o cultivo: regadio e sequeiro. Para o biodiesel de microalgas a descrição do modelo desenvolvido encontra-se na figura 6. A descrição detalhada dos processos apresentados será efectuada na secção 3.4.

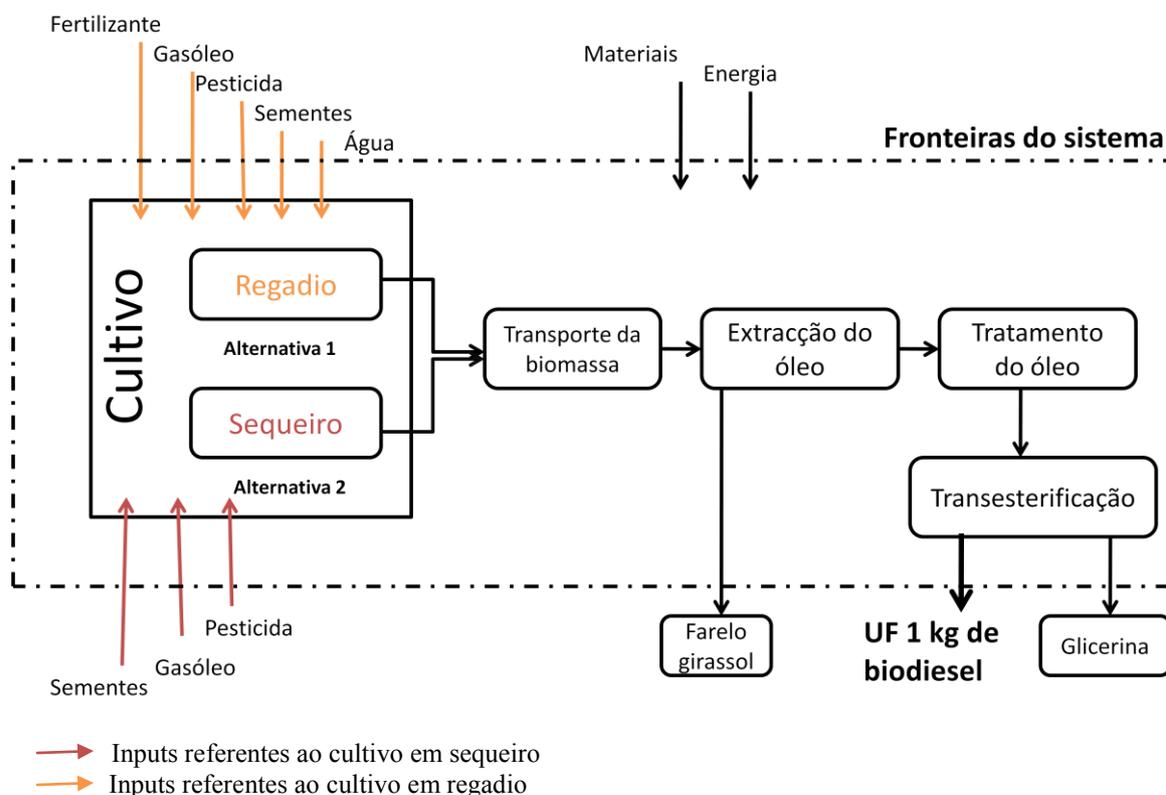


Figura 5 - Fluxograma do modelo de ciclo de vida da produção de biodiesel de girassol.

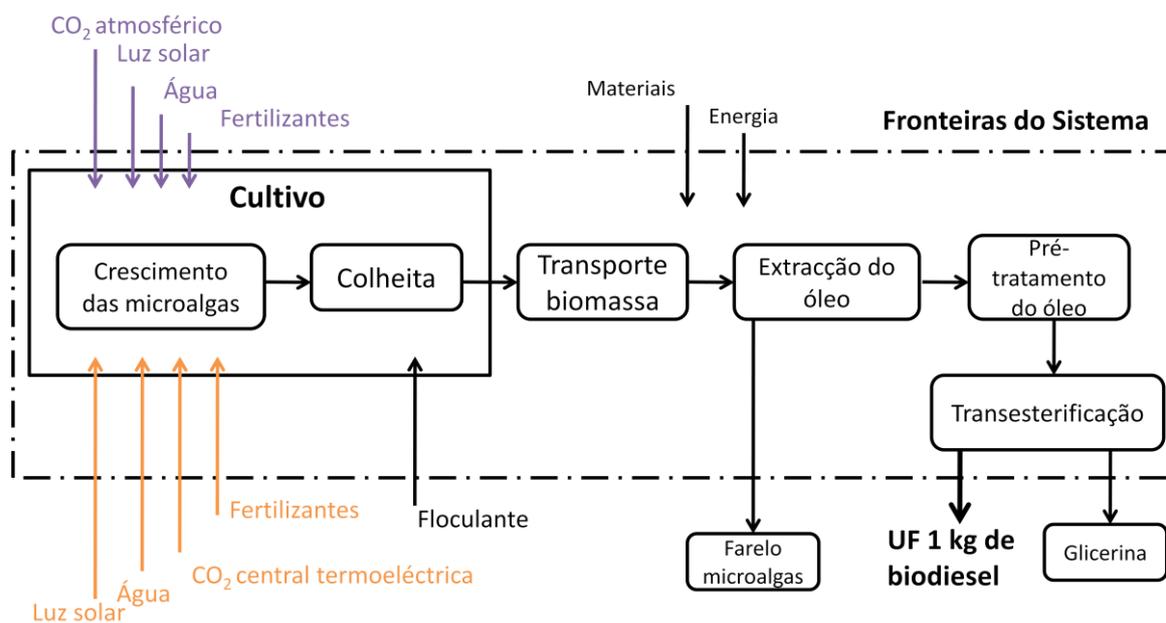


Figura 6 - Fluxograma do modelo de ciclo de vida da produção de biodiesel de microalgas.

3.4. Descrição das fases de CV e inventário

Nesta secção será feita uma descrição pormenorizada de todas as fases de CV para os dois tipos de biodiesel (girassol e microalgas), incluindo a apresentação dos inventários associados a cada fase. Serão ainda apresentados os inputs e emissões directas locais a cada processo, sendo que as emissões globais se apresentam no capítulo 4.

3.4.1. Biodiesel de girassol

As alternativas consideradas para a produção do biodiesel com base no girassol diferem no cultivo, sendo analisado o cultivo em regadio e em sequeiro. Em Portugal o girassol é produzido em duas regiões do país, no Alentejo e no Centro, sendo que a maior produção é feita no Alentejo, pelo que os cálculos para o transporte foram feitos considerando o cultivo nesta região. A cultura do girassol é uma cultura sazonal, sendo as operações de preparação do terreno para o cultivo iniciadas com a chegada da primavera, decorrendo todo o ciclo produtivo até ao Outono, quando é realizada a colheita (Rodrigues, 2010). Apresenta-se de seguida a descrição das fases de CV da produção de biodiesel de girassol em regadio e em sequeiro:

Cultivo em regadio – Considera-se que o solo já detém as características necessárias para este tipo de cultura, não sendo necessária a adição de correctivos que melhorem as suas condições físicas (Gírio *et al.*, 2010). Deste modo, no início da primavera dá-se a preparação dos terrenos onde é realizada uma lavra seguida de uma gradagem com adubação de fundo e segunda gradagem, posteriormente quando se iniciam as regas da cultura é efectuada uma adubação de cobertura. Na tabela 8 são apresentados por kg de semente os fertilizantes aplicados N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente com as seguintes quantidades globais 21, 63 e 63 kg/(ha.ano) (Gírio *et al.*, 2010). Depois da sementeira é realizada uma monda química com a aplicação de um pesticida, na quantidade de 3 kg/(ha.ano). A cultura é regada ao longo do seu ciclo de crescimento, no entanto Gírio *et al.*, 2010, que serviu como base de inventário para o cultivo de girassol, não apresenta volumes de água necessários para a produção de girassol. Toureiro *et al.*, 2005, indica valores entre os 3000-6000 m³/(ha.ano.) A produtividade da cultura neste tipo de cultivo é de 3000 kg/(ha.ano) (Gírio *et al.*, 2010).

As actividades agrícolas encontram-se descritas na tabela 9. A gradagem e a fertilização são processos efectuados por duas vezes em cada ciclo de crescimento do girassol. Foi realizada uma análise de sensibilidade relativamente ao contributo da produção da maquinaria nos impactes ambientais, de modo a verificar se a inclusão desta nos cálculos seria importante, pois há metodologias de cálculo, (e.g. a directiva 2009/28/CE, Comissão Europeia 2009), que não consideram os impactes ambientais de ciclo de vida associados à produção de maquinaria e infra-estruturas.

Neste contexto, foi efectuada uma análise de sensibilidade à inclusão da maquinaria no estudo com base nos consumos de gásóleo apresentados por Gírio *et al.*, 2010, para Portugal e nos dados em Jungbluth *et al.*, 2007 relativos aos impactes de CV da maquinaria.

A análise realizada permitiu verificar que:

i) A quantidade de gásóleo referida por Gírio *et al.*, 2010, é superior à quantidade de gásóleo consumida nas actividades descritas por Jungbluth *et al.*, 2007, o que é devido ao facto de Jungbluth *et al.*, 2007 não considerar o processo de rega nas actividades agrícolas e também a diferentes eficiências nas maquinarias utilizadas. Deste modo, foram considerados os consumos de gásóleo apresentados por Gírio *et al.*, 2010.

ii) A análise de sensibilidade efectuada revelou que considerar o impacto de CV da maquinaria se traduz num aumento de 7% nos resultados da categoria de aquecimento global, 8% para eutrofização e depleção abiótica, 6% depleção camada ozono e 15% para a acidificação. Conclui-se assim, que nos pareceu importante incluir a maquinaria do processo de cultivo no modelo desenvolvido.

Tabela 8 – Inputs mássicos do cultivo de girassol em regadio por kg de semente de girassol produzida.

| Inputs | Valor | Unidade | Referências |
|-------------------------------|--------|----------------|-------------------------------|
| Fertilizantes | | | |
| N | 0,007 | kg | Gírio <i>et al.</i> , 2010 |
| K ₂ O | 0,021 | kg | |
| P ₂ O ₅ | 0,021 | kg | |
| Pesticida (atrazina) | 0,001 | kg | |
| Sementes para plantio | 0,0023 | kg | |
| Gasóleo | 0,0523 | l | |
| Água | 1,5 | m ³ | Toureiro <i>et al.</i> , 2005 |

Tabela 9 – Actividades agrícolas e transporte associadas ao cultivo em regadio por kg de semente de girassol produzida.

| Inputs | Valor | Unidade | Referências |
|---|-------------------------|---------|---|
| Gasóleo | $2,533 \times 10^{-2}$ | l | Gírio <i>et al.</i> , 2010; Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Lavrar | $3,1736 \times 10^{-4}$ | ha | |
| Gradagem | $6,3471 \times 10^{-4}$ | ha | |
| Fertilização | $6,3471 \times 10^{-4}$ | ha | |
| Colheita | $3,1736 \times 10^{-4}$ | ha | |
| Aplicação de produtos fitofarmacêuticos | $3,1736 \times 10^{-4}$ | ha | |
| Sementeira | $3,1736 \times 10^{-4}$ | ha | |
| Transporte em tractor com reboque | 0,047 | tkm | |
| Seca dos grãos | $1,3253 \times 10^{-1}$ | kg | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Transporte em camião | 0,4 | tkm | |

Na tabela 10 são apresentadas as emissões locais do cultivo em regadio associadas à utilização de fertilizantes e pesticidas. As emissões de N₂O foram calculadas recorrendo à metodologia de nível 1 (Tier 1) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (IPCC, 2006). No capítulo 4 será ainda apresentada uma análise de sensibilidade relativa aos factores de emissão utilizados no cálculo das emissões de N₂O.

É importante ainda referir que, como não há a aplicação de ureia enquanto fertilizante nem de CaO (utilizado geralmente como correctivo de solos) considera-se nula a emissão de CO₂ relativamente a estes inputs agrícolas utilizados em muitas culturas.

Tabela 10 – Outputs locais do cultivo de girassol por kg de semente de girassol produzida.

| Outputs | Valor | Unidade | Referência |
|------------------|------------------------|---------|------------------------------|
| N ₂ O | 3,72x10 ⁻⁴ | kg | IPCC, 2006 |
| Atrazina | 9,1x10 ⁻⁴ | kg | Iriarte <i>et al.</i> , 2009 |
| NO _x | 7x10 ⁻⁴ | kg | |
| NO ₃ | 9,8x10 ⁻⁴ | kg | |
| NH ₃ | 2,558x10 ⁻⁴ | kg | |

Cultivo em sequeiro - No início da primavera efectua-se a preparação dos terrenos, com uma escarificação seguida de uma lavra, para que posteriormente se efectue a sementeira. Depois da sementeira é efectuada uma monda química por duas vezes com a aplicação de um pesticida, na quantidade total de 1,5 kg/(ha.ano), os inputs mássicos para o cultivo, por kg de semente são apresentados na tabela 11. A produtividade da cultura neste tipo de cultivo é de 650 kg/(ha.ano).

De modo análogo ao efectuado para o cultivo em regadio, o inventário foi completado com dados de Jungbluth *et al.*, 2007, relativos à maquinaria utilizada no processo de cultivo, associado a cada processo agrícola, assim como os seus consumos de gasóleo. Verificou-se que os consumos apresentados por Gírio *et al.*, 2010, são superiores aos referidos por Jungbluth *et al.*, 2007, deste modo consideraram-se os consumos de gasóleo apresentados por Gírio *et al.*, 2010. Efectuou-se também uma análise de sensibilidade à contabilização, ou não, da maquinaria no processo, tendo-se verificado que para o cultivo em sequeiro a inclusão da maquinaria provoca um aumento nos impactes ambientais sendo de 9% para o aquecimento global, 5% depleção camada do ozono, 12% para depleção abiótica e 45% para a eutrofização e acidificação. Conclui-se assim, que é importante incluir a maquinaria do processo de cultivo no modelo desenvolvido.

Tabela 11 - Inputs mássicos do cultivo de girassol em sequeiro por kg de semente de girassol produzida.

| Inputs | Valor | Unidade | Referências |
|-----------------------|--------------|----------------|----------------------------|
| Pesticida (atrazina) | 0,0023 | kg | Gírio <i>et al.</i> , 2010 |
| Sementes para plantio | 0,0046 | kg | |
| Gasóleo | 0,1539 | l | |

Como no cultivo em sequeiro não há aplicação de fertilizantes as emissões de N₂O são provenientes dos resíduos das culturas nos solos. Considera-se assim, que a emissão local neste tipo de cultivo é de 2,093x10⁻³ de atrazina e 4,089x10⁻⁴ de N₂O.

Colheita – As sementes são colhidas mecanicamente, sendo secas para baixar o seu teor de humidade até 8-12% para posterior extracção do óleo. As sementes são transportadas para uma refinaria de extracção do óleo localizada na margem sul do Tejo, Almada (empresa Sovena). Considerou-se distância total percorrida de 400 km (ida e volta), assumindo-se que os camiões regressam vazios. Os valores aplicados por kg de semente de girassol produzida a cada actividade encontram-se descritos na tabela 12.

Tabela 12 - Actividades agrícolas e transporte associadas ao cultivo em sequeiro por kg de semente de girassol produzida.

| Inputs | Valor | Unidade | Referências |
|---|------------------------|----------------|--|
| Gasóleo | 0,0598 | l | Gírio <i>et al.</i> , 2010; Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Escarificar | 9,69x10 ⁻⁴ | ha | |
| Lavrar | 9,69x10 ⁻⁴ | ha | |
| Colheita | 9,69x10 ⁻⁴ | ha | |
| Aplicação de produtos fitofarmacêuticos | 1,938x10 ⁻³ | ha | |
| Sementeira | 9,69x10 ⁻⁴ | ha | |
| Transporte em tractor com reboque | 0,0047 | tkm | |
| Seca dos grãos | 0,0682 | kg | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Transporte em camião | 0,4 | tkm | |

Extracção do óleo – É feita uma extracção por solvente (hexano). Assumiu-se um processo de extracção idêntico ao da colza (Jungbluth *et al.*, 2007), o qual estava disponível base de dados *Ecoinvent*, do programa *SimaPro7*. Importa referir que a infraestrutura para extracção do óleo é contabilizada no processo.

Pré-tratamento do óleo – O tratamento do óleo é feito com recurso à adição de ácido fosfórico, como já foi referido para eliminar os fosfolípidos e de bentonite que

ajuda à remoção dos ácidos gordos livres. Na tabela 13 encontram-se as quantidades necessárias de cada input para a extracção e pré-tratamento do óleo por cada kg de óleo que é extraído.

Tabela 13 – Inputs, outputs e produtos da extracção e tratamento do óleo de girassol por kg de óleo de girassol, inventário sem alocação.

| Inputs | Valor | Unidades | Referência |
|--|------------------------|-----------------|--|
| Sementes de girassol | 2,2989 | kg | Biograce, 2011; Cotana <i>et al.</i> , 2010; JEC, 2008 |
| Calor, gás natural, em forno industrial >100kW | 1,628 | MJ | |
| Infra-estrutura, fabrica extracção óleo | $7,66 \times 10^{-10}$ | p | |
| Bentonite | $5,38 \times 10^{-3}$ | kg | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Hexano | $2,53 \times 10^{-3}$ | kg | |
| Ácido fosfórico, 85% em água | $8,16 \times 10^{-4}$ | kg | |
| Electricidade de média voltagem | $9,66 \times 10^{-2}$ | kWh | |
| Outputs | Valor | Unidades | Referência |
| Dióxido de carbono biogénico | 2,07 | kg | |
| Calor desperdiçado | 1,097 | MJ | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Hexano | $2,53 \times 10^{-3}$ | kg | |
| Tratamento de águas residuais | $6,2 \times 10^{-6}$ | m ³ | |
| Produtos | Valor | Unidades | Referência |
| Óleo girassol | 1 | kg | Biograce, 2011; Cotana <i>et al.</i> , 2010; JEC, 2008 |
| Farelo girassol | 1,2989 | kg | |

Transesterificação – Considera-se, à semelhança da extracção e tratamento do óleo, que tem um processo idêntico ao da colza. A transesterificação é feita por via alcalina, o catalisador é o hidróxido de potássio e o álcool que é adicionado ao óleo é o metanol. Há também a adição de ácido fosfórico neste processo para que haja a neutralização da glicerina. Importa referir que a infra-estrutura para transesterificação do óleo é contabilizada no processo. Na tabela 14 apresenta-se o inventário da transesterificação do óleo de girassol por unidade funcional.

Tabela 14 – Transesterificação do óleo de girassol por UF (1 kg de biodiesel), inventário sem alocação.

| Inputs | Valor | Unidade | Referência |
|---|-----------------------|----------------|--------------------------------|
| Óleo de girassol | 1,1062 | kg | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| Metanol | 0,1217 | kg | |
| Electricidade de média voltagem | 0,0455 | kWh | |
| Calor, gás natural, em forno industrial >100kW | 0,9945 | MJ | |
| Fábrica de transesterificação de óleos vegetais | 1,01x10 ⁻⁹ | p | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Água | 0,0294 | kg | |
| Ácido fosfórico, 85% em água | 4,96x10 ⁻³ | Kg | |
| Hidróxido de potássio | 0,0122 | Kg | |
| | | | |
| Outputs | Valor | Unidade | Referência |
| Calor desperdiçado | 1,6150 | MJ | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Tratamento de águas residuais | 6,73x10 ⁻⁵ | m ³ | |
| Produtos | Valor | Unidade | Referência |
| Biodiesel | 1 | kg | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| Glicerina | 0,106 | kg | |

3.4.2. Biodiesel de microalgas

Para o biodiesel de microalgas, as alternativas consideradas diferem na fase de cultivo (à semelhança do biodiesel de girassol) e na produtividade considerada. Na fase de cultivo, considera-se que as necessidades de CO₂ para o crescimento das microalgas são garantidas através de i) captura de CO₂ proveniente dos gases de combustão de uma central termoelétrica e ii) sem captura, CO₂ contido na atmosfera. Para i) (central termoelétrica) considera-se uma produtividade de 30 g/(m².dia) enquanto que para ii), considera-se apenas a produtividade de 15 g/(m².dia), pois, segundo Campbell *et al.*, 2010, o CO₂ contido no ar atmosférico não garante condições de crescimento óptimo.

Considerou-se que a localização da exploração com destino ao cultivo de microalgas em Portugal seria em Sines, junto à central termoelétrica. A escolha desta localização tem várias vantagens, pois permitia uma simbiose entre a central termoelétrica e o cultivo de microalgas (sequestro do CO₂ emitido pela central para a atmosfera, diminuindo assim as emissões da mesma). Por outro lado, como Sines está localizada no Alentejo, esta localização é vantajosa pois a taxa de crescimento das microalgas está directamente relacionada com a temperatura e radiação solar. Sines consegue unir elevadas

radiações solares, na ordem de 16,5 MJ/m².dia (www.energiasrenovaveis.com), com elevadas temperaturas médias anuais que rondam os 16°C (<http://liderkiste.com>).

A escolha do tipo de microalga é importante, considerou-se a espécie *Dunaliella tertiolecta*, a selecção foi feita com base nas suas características de crescimento em meio salino e pelo seu conteúdo em lípidos que varia entre 16,7-71% (Mata *et al.*, 2010) em termos de biomassa seca. O intervalo de variação é bastante elevado pelo que se considerou, segundo Benemann., 2009 que as microalgas têm um conteúdo médio de óleo de 25%, ou seja, de triglicérides úteis para conversão em biodiesel.

Apresenta-se então a descrição dos processos do sistema biodiesel de microalgas.

Cultivo – O cultivo é feito em lagoas abertas, também denominadas de lagoas *raceway* por se parecerem com uma pista. As lagoas são projectadas em módulos funcionando com muros de contenção, como se pode observar na figura 7. Uma roda de pás é usada por pista de forma a garantir uma mistura adequada de nutrientes, CO₂ e água (Campbell *et al.*, 2010). Às microalgas são adicionados os fertilizantes na forma de azoto e fósforo nas quantidades respectivas de 196,8 e 61,5 kg/(ha.ano) e ainda ureia (896,09 kg/(ha.ano)). O dióxido de carbono é fornecido por tubagem a partir da central termoeléctrica através de filtragem dos gases de combustão na quantidade de 185 t/(ha.ano) no caso da captura de CO₂ e através do ar atmosférico no cenário sem captura de CO₂. É importante referir que os consumos de energia e materiais associados à construção das lagoas não foram tidos em conta devido à falta de dados disponíveis. Relativamente à “transferência” do dióxido de carbono da central para as lagoas teve-se em conta os consumos energéticos (2470 kWh/(ha.ano)) (Campbell *et al.*, 2010), desprezando-se assim o material necessário para a tubagem por falta de dados e uma vez que as lagoas de cultivo se encontram junto da central termoeléctrica. A tabela 15 apresenta os *inputs* de cultivo com captura de CO₂ da central e a tabela 16 quando as necessidades de CO₂ são garantidas pelo CO₂ atmosférico.

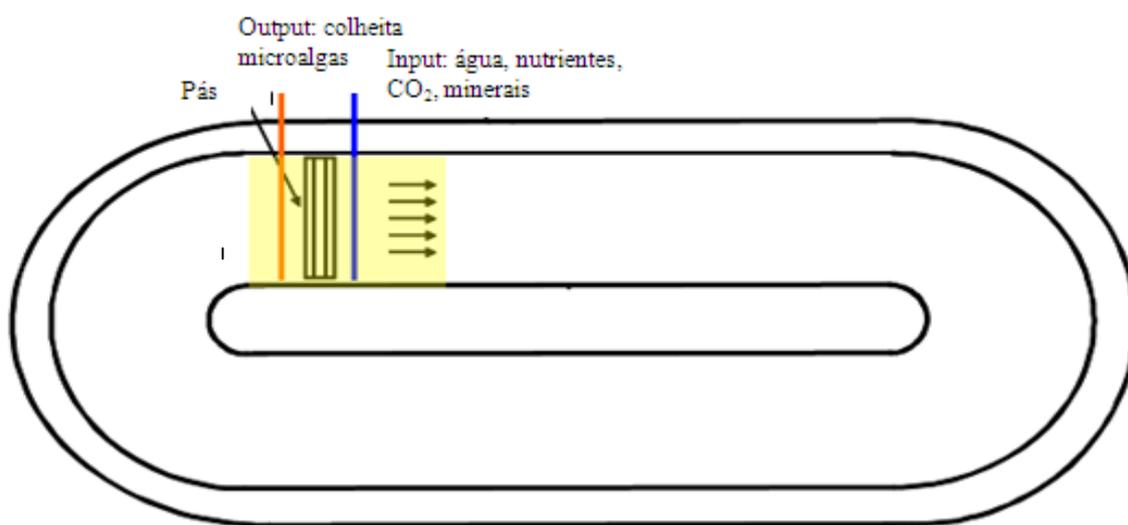


Figura 7 - Representação de uma lagoa aberta (adaptado Darzins *et al.*, 2010).

Colheita – A colheita é feita com recurso à adição de um flocculante (266 kg/(ha.ano)), de forma a concentrar as microalgas. Estas são depois secas e centrifugadas, para que se concentrem ainda mais e se extraia a restante água que ainda exista. Estas são transportadas para que se proceda à extração e transesterificação do óleo. A distância entre Sines e Almada é de aproximadamente 160 km, portanto têm-se 320 km de transporte considerando o retorno dos camiões sem carga.

Tabela 15- *Inputs* do cultivo de microalgas por kg_{microalgas} para o cenário de captura de CO₂ da central.

| Inputs | Valor | Unidade | Referências |
|------------------------------|-------------------------|---------|---|
| Fertilizantes | | | |
| N | $1,7956 \times 10^{-3}$ | kg | Adaptado de, Campbell <i>et al.</i> , 2010 |
| P | $5,6113 \times 10^{-4}$ | kg | |
| Ureia | $8,1760 \times 10^{-3}$ | kg | |
| Sulfato de ferro | $9,1241 \times 10^{-6}$ | kg | |
| CO ₂ | -1,688 | kg | |
| Floculante | $2,062 \times 10^{-3}$ | kg | |
| Gasóleo, em tractor | $4,1058 \times 10^{-3}$ | MJ | |
| Electricidade, alta voltagem | 0,1997 | kWh | |
| Transporte em camião | 0,32 | tkm | |
| Outputs | | | |
| CO ₂ | 0,0228 | kg | |
| N ₂ O | $2,2226 \times 10^{-5}$ | kg | |
| Água | 469,89 | kg | |
| Sais | 0,7728 | kg | |

Tabela 16 - Inputs do cultivo de microalgas por kg_{microalgas} para o cenário de utilização de CO₂ atmosférico.

| Inputs | Valor | Unidade | Referências | |
|------------------------------|-------------------------|---------|---|--|
| Fertilizantes | | | | |
| N | 3,5912x10 ⁻² | kg | Adaptado de, Campbell <i>et al.</i> , 2010 | |
| P | 1,1223x10 ⁻³ | kg | | |
| Ureia | 1,6644x10 ⁻² | kg | | |
| Sulfato de ferro | 1,8349x10 ⁻⁵ | kg | | |
| Floculante | 4,854x10 ⁻³ | kg | | |
| Gasóleo, em tractor | 8,2117x10 ⁻³ | MJ | | |
| Electricidade, alta voltagem | 0,3994 | kWh | | |
| Transporte em camião | 0,32 | tkm | | |
| Outputs | | | | |
| CO ₂ | 0,0456 | kg | | |
| N ₂ O | 4,4453x10 ⁻⁵ | kg | | |
| Água | 939,78 | kg | | |
| Sais | 1,5456 | kg | | |

Extracção, tratamento e transesterificação óleo – Considerou-se que o processo de extracção, tratamento e transesterificação do óleo é semelhante ao da colza (Lardon *et al.*, 2009 e Stephenson *et al.*, 2010), estando a descrição dos processos realizada na secção 3.4. Na tabela 17 e 18 apresentam-se os inventários da extracção e tratamento do óleo e da transesterificação, respectivamente.

Tabela 17 – Inventário da extracção e pré-tratamento do óleo de microalgas, por kg de óleo, sem alocação.

| Inputs | Valor | Unidade | Referência |
|---|-----------------------|----------------|--------------------------------|
| Microalgas | 4 | Kg | Benemann., 2009 |
| Calor, gás natural, em forno industrial>100kW | 2,832 | MJ | |
| Infra-estrutura, fabrica extracção óleo | $1,33 \times 10^{-9}$ | P | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Bentonite | $9,36 \times 10^{-3}$ | Kg | |
| Hexano | $4,4 \times 10^{-3}$ | Kg | |
| Ácido fosfórico, 85% em água | $1,42 \times 10^{-3}$ | Kg | |
| Electricidade de média voltagem | 0,168 | kWh | |
| Outputs | Valor | Unidade | Referência |
| Dióxido de carbono biogénico | 3,608 | Kg | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Calor desperdiçado | 1,908 | MJ | |
| Hexano | $4,4 \times 10^{-3}$ | Kg | |
| Tratamento de águas residuais | $1,08 \times 10^{-5}$ | m ³ | |
| Produtos | Valor | Unidade | Referência |
| Óleo microalgas | 1 | Kg | Benemann., 2009 |
| Farelo microalgas | 3 | Kg | |

Tabela 18 - Inventário da transesterificação do óleo de microalgas, por UF (1 kg biodiesel), sem alocação.

| Inputs | Valor | Unidade | Referência |
|---|-----------------------|----------------|--------------------------------|
| Óleo de microalgas | 1,1062 | kg | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| Metanol | 0,1217 | kg | |
| Electricidade média voltagem | 0,0455 | kWh | |
| Calor, gás natural, em forno industrial>100kW | 0,9945 | MJ | |
| Fábrica de transesterificação de óleos vegetais | $1,01 \times 10^{-9}$ | p | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Água | 0,0294 | kg | |
| Ácido fosfórico, 85% em água | $4,61 \times 10^{-3}$ | kg | |
| Hidróxido de potássio | 0,0122 | kg | |
| Outputs | Valor | Unidade | Referência |
| Calor desperdiçado | 1,6150 | MJ | Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 |
| Tratamento de águas residuais | $6,73 \times 10^{-5}$ | m ³ | |
| Produtos | Valor | Unidade | Referência |
| Biodiesel | 1 | kg | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| Glicerina | 0,1062 | kg | |

3.5. Multifuncionalidade

O sistema de produção do biodiesel é multifuncional sendo produzidos vários co-produtos (farelo e glicerina). Como o método de atribuição de impactes aos co-produtos pode ter influência nos resultados (Malça e Freire 2009, 2010, 2011) foram considerados três diferentes formas de atribuição de impactes, sem alocação, alocação mássica e alocação energética. No cenário sem alocação as cargas ambientais são atribuídas na totalidade ao biodiesel. No cenário alocação mássica as cargas ambientais são atribuídas em função dos fluxos mássicos dos co-produtos. Relativamente à alocação energética as cargas ambientais são calculadas de acordo com os fluxos energéticos dos produtos e co-produtos no processo, calculados com base no poder calorífico inferior (PCI).

A alocação mássica para o óleo de girassol foi determinada com base na quantidade de óleo que se extrai por kg de semente ($0,435 \text{ kg}_{\text{óleo}}/\text{kg}_{\text{semente}}$), para o biodiesel, com base na quantidade de biodiesel e glicerina produzido por t de biodiesel, $0,1056 \text{ t}_{\text{glicerina}}/\text{t}_{\text{biodiesel}}$. Quanto à alocação energética esta foi determinada para a extracção e transesterificação com base nos valores de poder calorífico inferior (PCI) do óleo, farelo, biodiesel e glicerina, sendo respectivamente, $36 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{óleo}}$, $14,4 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{farelo}}$, $37,2 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{biodiesel}}$ e $16 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{glicerina}}$. Na tabela 19 encontram-se resumidos os factores de alocação para o biodiesel de girassol.

Tabela 19 – Factores de alocação para os co-produtos do biodiesel de girassol.

| Alocação mássica | | | Referência |
|---------------------|-----------|-------|--|
| Extracção | Óleo | 43,5% | Biograce, 2011; Cotana <i>et al.</i> , 2010; JEC, 2008 |
| | Farelo | 57,5% | |
| Transesterificação | Biodiesel | 90,4% | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| | Glicerina | 9,6% | |
| Alocação Energética | | | Referência |
| Extracção | Óleo | 65,4% | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| | Farelo | 34,6% | |
| Transesterificação | Biodiesel | 95,6% | |
| | Glicerina | 4,4% | |
| Sem alocação | | | Referência |
| Extracção | Óleo | 100% | Definido na presente dissertação |
| | Farelo | 0% | |
| Transesterificação | Biodiesel | 100% | |
| | Glicerina | 0% | |

A alocação mássica para o biodiesel de microalgas foi determinada não só tendo em conta a quantidade teórica de lípidos contida na biomassa da microalga, mas também (e visto que o intervalo de variação teórico é tão elevado) de acordo com Benemann, 2009 que refere que em média os lípidos disponíveis para biodiesel é cerca de 25%, ou seja, obtêm-se $0,25 \text{ kg}_{\text{óleo}}/\text{kg}_{\text{biomassa}}$. Para o biodiesel de microalgas a sua alocação mássica foi considerada idêntica à da colza (Campbell *et al.*, 2010, Stephenson *et al.*, 2010, Lardon *et al.*, 2009), desta forma por t de biodiesel são produzidos 0,1056 t de glicerina. Relativamente à alocação energética, para a extracção foram considerados os PCI do óleo de microalgas e do seu farelo, 36 MJ/kg (Minowa *et al.*, 1995) para o óleo e 13,9 MJ/kg para o farelo de microalgas. Para a transesterificação, a alocação energética foi calculada considerando que o valor de PCI do biodiesel de microalgas e da glicerina é idêntico ao biodiesel de colza, desta forma o PCI do biodiesel e glicerina é respectivamente 37,2 MJ/kg_{biodiesel} e 16 MJ/kg_{glicerina}.

Tabela 20 - Factores de alocação para os co-produtos do biodiesel de microalgas.

| Alocação mássica | | | Referência |
|---------------------|-----------|-------|--|
| Extracção | Óleo | 25% | Benemann, 2009 |
| | Farelo | 75% | |
| Transesterificação | Biodiesel | 90,4% | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| | Glicerina | 9,6% | |
| Alocação Energética | | | Referência |
| Extracção | Óleo | 46,3% | Lardon <i>et al.</i> , 2009; Minowa <i>et al.</i> , 1995 |
| | Farelo | 53,7% | |
| Transesterificação | Biodiesel | 95,6% | Biograce, 2011; JEC, 2008 |
| | Glicerina | 4,4% | |
| Sem alocação | | | Referência |
| Extracção | Óleo | 100% | Definido na presente dissertação |
| | Farelo | 0% | |
| Transesterificação | Biodiesel | 100% | |
| | Glicerina | 0% | |

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo é apresentada a análise e discussão dos principais resultados. Na primeira secção é feita uma descrição do método de avaliação de impactes utilizado. A segunda secção é relativa aos resultados do biodiesel de girassol, sendo a terceira dedicada ao biodiesel de microalgas. Na quarta secção efectua-se uma análise comparativa entre o biodiesel de girassol e microalgas, analisando também a multifuncionalidade. Na quinta secção comparam-se os resultados obtidos para os dois tipos de biodiesel. Para a sexta secção elabora-se uma análise de sensibilidade às emissões de N₂O. Na sétima secção é analisada a viabilidade da produção de biodiesel em Portugal com base em girassol ou microalgas, para satisfazer 10% do consumo de gasóleo no sector dos transportes. Na última secção são comparados os resultados apresentados nesta dissertação com os outros estudos de ACV.

4.1. Avaliação de impactes de CV

Na presente dissertação a avaliação de impactes de ciclo de vida (AICV) é elaborada recorrendo ao método de avaliação de impactes ambientais ReCiPe. De acordo com Goedkoup *et al.*, 2010, o ReCiPe é o sucessor dos métodos EcoIndicator 99 e CML 2001. O objectivo inicial no desenvolvimento deste novo método era integrar a abordagem orientada para os problemas ambientais (*problem oriented approach*) do CML 2001 com a abordagem orientada para os danos (*damage oriented approach*) do EcoIndicator 99 (Goedkoup *et al.*, 2010). A abordagem orientada para o problema considera categorias de impacto a um nível *midpoint*, onde a incerteza dos resultados é relativamente reduzida, no entanto, obtêm-se um número elevado de categorias de impacto associados aos diversos tipos de problemas ambientais (Goedkoup *et al.*, 2010). A abordagem orientada para os danos considera categorias de resultados a um nível *endpoint*, sendo os resultados apresentados em apenas três categorias de impacto, no entanto, a incerteza dos resultados é consideravelmente mais elevada (Goedkoup *et al.*, 2010). O ReCiPe integra estes dois

tipos de abordagem apresentando as categorias de impacto ambiental a um nível *midpoint* e *endpoint*. Este método considera ainda as três seguintes perspectivas:

- i) Individualista – é uma perspectiva baseada numa visão a curto prazo, considerando tipos de impacto ambientais mais consensuais e há um optimismo tecnológico quanto à capacidade tecnológica para resolver os problemas.
- ii) Hierárquica – é baseada nas políticas mais comuns no que diz respeito ao espaço de tempo e outras questões.
- iii) Igualitária – é a perspectiva que reflecte uma maior precaução considerando uma perspectiva de longo prazo e considera impactes ambientais que ainda não se encontram completamente comprovados, mas para os quais já existe disponível alguma evidencia.

O método ReCiPe considera dezoito categorias de impacto ambiental ao nível *midpoint* e três ao nível *endpoint*. Estas categorias são apresentadas na tabela 21 com a indicação da sua unidade.

Tabela 21 – Categorias de impacto avaliadas no método ReCiPe (Goedkoup *et al.*, 2010).

| <i>Midpoint</i> | | <i>Endpoint</i> | |
|--|--------------------------|----------------------|---------------|
| Categoria de impacto | Unidade | Categoria de impacto | Unidade |
| <i>Climate change</i> | kg CO ₂ eq | <i>Human health</i> | DALYs |
| <i>Ozone depletion</i> | kg CFC ⁻¹¹ eq | | |
| <i>Human toxicity</i> | kg 1,4-DB eq | | |
| <i>Photochemical oxidant formation</i> | kg NMVOC | | |
| <i>Particulate matter formation</i> | kg PM ₁₀ eq | | |
| <i>Ionising radiation</i> | kg U ₂₃₅ eq | | |
| <i>Terrestrial acidification</i> | kg SO ₂ eq | <i>Ecosystems</i> | years |
| <i>Freshwater eutrophication</i> | kg P eq | | |
| <i>Marine eutrophication</i> | kg N eq | | |
| <i>Terrestrial ecotoxicity</i> | kg 1,4-DB eq | | |
| <i>Freshwater ecotoxicity</i> | kg 1,4-DB eq | | |
| <i>Marine ecotoxicity</i> | kg 1,4-DB eq | | |
| <i>Agricultural land occupation</i> | m ² a | <i>Resource</i> | surplus costs |
| <i>Urban land occupation</i> | m ² a | | |
| <i>Natural land transformation</i> | m ² | | |
| <i>Water depletion</i> | m ³ | | |
| <i>Metal depletion</i> | kg Fe eq | | |
| <i>Fossil depletion</i> | kg oil eq | | |

Nota: DALY's - *Disability Adjusted Life Years* – que representa a combinação do número de anos de vida perdidos com o número de anos vividos com deficiência. *Surplus costs* – representa os custos excedentes dos recursos, durante um dado período de tempo, considerando uma inflação de 3%.

Relativamente à fase de caracterização da avaliação de impactes de ciclo de vida (AICV), para a abordagem *midpoint*, as três perspectivas, individualista (Ind), hierárquica (H) e igualitária (Ig) apresentam factores diferentes apenas para as seguintes duas categorias de impacte ambiental:

- *Climate change* com os factores de GWP20 (individualista), GWP100 (hierárquica) e GWP500 (igualitária).
- *Terrestrial acidification*, apresenta cinco substâncias que provocam impactes nesta categoria, dióxido e óxido de enxofre (que apresenta o mesmo factor nas três perspectivas, 1), dióxido e óxido de azoto (apresenta diferentes factores em cada perspectiva, sendo respectivamente, 0,71, 0,56, e 0,49 para individualista, hierárquica e igualitária) e a amónia (com factores de 2,89, 2,45 e 1,99 para as perspectivas individualista, hierárquica e igualitária, respectivamente).

Relativamente à fase opcional de normalização, os factores aplicados a cada categoria variam em oito das dezoito categorias consideradas pelo método ReCiPe. Para as categorias *marine toxicity*, *freshwater toxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, *terrestrial acidification*, *ionizing radiation* e *human toxicity* os factores mais elevados são para a perspectiva igualitária e os menores para a individualista. Na categoria *ozone depletion* os factores mais elevados são para a perspectiva individualista e os menores para a hierárquica. Na categoria *climate change* os factores mais elevados são para a perspectiva individualista e os menores para a igualitária.

No presente estudo apenas foi considerado o método ReCiPe a um nível *midpoint* e, de entre as dezoito categorias de impacte ambiental disponíveis, seleccionaram-se para análise as seguintes: alterações climáticas (AC), depleção da camada de ozono (DCO), acidificação terrestre (AT), eutrofização de água doce (EAD), eutrofização marinha (EM) e a depleção fóssil (DF). Excluíram-se as categorias toxicológicas por apresentarem elevados graus de incerteza (Finnveden *et al.*, 2009). As categorias seleccionadas para este estudo são as mais frequentemente analisadas na literatura, sendo também as consideradas no método CML, com o qual os resultados do ReCiPe são comparados. Neste estudo foi apenas considerada a perspectiva hierárquica, pois é esta que é definida por defeito no método ReCiPe (www.lcia-recipe.net/).

De forma a facilitar a comparação dos resultados nas várias categorias e a avaliar a importância relativa para o ciclo de vida de cada uma delas, foram usados, em

algumas situações, resultados normalizados (Garcia, 2010). A normalização é uma fase opcional da AICV e relata a magnitude relativa dos impactes ambientais numa escala comum a todas as categorias de impacte (Clift *et al.*, 2000). Para cada categoria foram considerados como referência valores para a Europa em 2010.

4.2. Biodiesel de girassol

Nesta secção são apresentados os resultados de AICV do biodiesel de girassol, para dois tipos de cultivo: cultivo em regadio (Reg) e em sequeiro (Seq) calculados com base na alocação mássica para a atribuição dos impactes entre os co-produtos. Na secção 4.4 será efectuada uma análise de sensibilidade ao método de alocação, considerando a alocação mássica (A.M), alocação energética (A.En) e sem alocação (S.A), recomendado pela ISO 14040.

Na figura 8 e na tabela 22 são apresentados os resultados, normalizados e caracterizados, da avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel. Pela análise da figura 8 verifica-se que a categoria depleção do ozono apresenta pouca influência no ciclo de vida do biodiesel de girassol, desta forma, esta não será analisada em detalhe. Analisando os resultados constata-se que o biodiesel com cultivo em regadio apresenta melhor performance ambiental em três categorias de impacte (alterações climáticas – AC, eutrofização marinha – EM e depleção fóssil – DF) e o biodiesel em sequeiro em duas (acidificação terrestre – AT e eutrofização de água doce – EAD). No entanto, observa-se para a categoria EAD que o biodiesel em regadio apresenta impactes cerca de dez vezes superiores ao cultivo em sequeiro. Assim, pela análise dos resultados verifica-se que não é possível concluir qual dos tipos de cultivo tem melhor performance ambiental pois os resultados são diferentes para as diferentes categorias de impacte.

A tabela 22 além de apresentar os resultados totais para 1 kg de biodiesel apresenta também os impactes por fase de ciclo de vida (CV). Verifica-se assim, que a fase que mais contribui para os impactes ambientais do CV do biodiesel é o cultivo (variando entre 52% para a categoria DP e 93% para EM), exceptuando-se apenas a categoria EAD para o cultivo em sequeiro, pois, por não haver fertilização, faz com que os impactes da transesterificação assumam a maior contribuição, representando cerca de 72% dos

impactes nesta categoria (sendo que o ácido fosfórico é o maior contribuidor para os impactes ambientais nesta fase, para esta categoria de impacte).

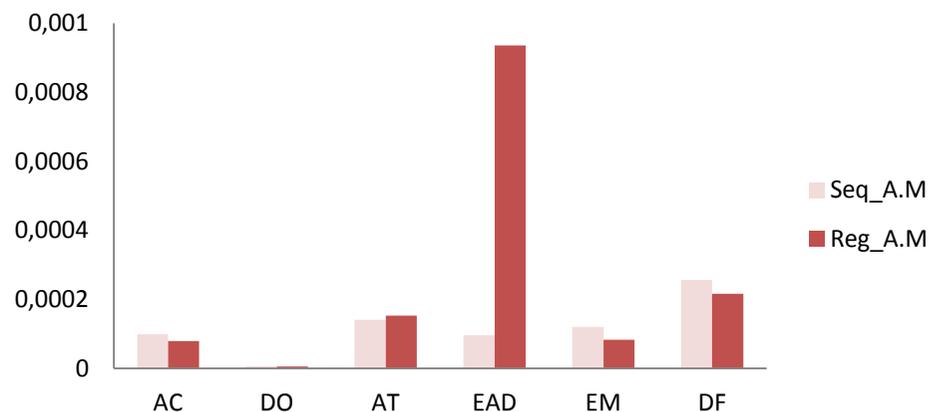


Figura 8 – Avaliação ambiental comparativa da produção de biodiesel de girassol para 1 kg de biodiesel, para alocação mássica, normalização.

Tabela 22 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de girassol para os cenários considerados, alocação mássica, caracterização.

| | Alterações climáticas (kg CO ₂ eq) | | Acidificação terrestre (kg SO ₂ eq) | | Eutrofização água doce (kg P eq) | | Eutrofização Marinha (kg N eq) | | Depleção fóssil (kg oil eq) | |
|---------------------------|--|----------|---|----------|----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | Cultivo | | Cultivo | | Cultivo | | Cultivo | | Cultivo | |
| | Regadio | Sequeiro | Regadio | Sequeiro | Regadio | Sequeiro | Regadio | Sequeiro | Regadio | Sequeiro |
| Cultivo | 6,09E-1 | 8,22E-1 | 4,34E-3 | 3,94E-3 | 3,6E-4 | 8,5E-6 | 1,42E-3 | 2,13E-3 | 1,87E-1 | 2,53E-1 |
| Extracção do óleo | 8,11E-2 | | 2,8E-4 | | 3E-6 | | 5E-5 | | 3,21E-2 | |
| Transesterificação | 2,02E-1 | | 6,2E-4 | | 2,9E-5 | | 1,1E-4 | | 1,41E-1 | |
| Total | 8,92E-1 | 1,105 | 5,24E-3 | 4,84E-3 | 3,9E-4 | 4E-5 | 1,58E-3 | 2,28E-3 | 3,60E-1 | 4,26E-1 |

O cultivo do girassol é a fase do CV com impactes ambientais mais elevados, pelo que será analisado em detalhe, procurando verificar quais os processos com maior influência nos impactes ambientais e de que modo estes podem ser reduzidos.

Na figura 9 são apresentadas as contribuições de cada processo para a fase de cultivo do girassol em regadio. A maior contribuição para a categoria alterações climáticas (AC) é devido aos processos agrícolas, que contribuem para cerca de 34%, sendo o gasóleo a colheita das sementes e a lavra dos terrenos os processos agrícolas com maior peso, respectivamente 12%, 8% e 5%, (o gasóleo representa a diferença de consumos de gasóleo nas operações agrícolas entre Gírio *et al.*, 2010 e Jungbluth *et al.*, 2007). Em segundo lugar é a utilização de fertilizantes (5% para o K_2O e 20% para N e P_2O_5). Em terceiro lugar é a produção do girassol (ou seja, as emissões locais do cultivo de girassol), cerca de 15%, o transporte em camião das sementes até ao local de extracção do óleo e o gasóleo), cada um deles com aproximadamente 12% dos impactes ambientais.

Relativamente à categoria acidificação terrestre (AT), cerca de 23% é devido às emissões locais do cultivo de girassol e 26% ao uso de fertilizantes. O transporte em camião representa cerca de 10% e as operações agrícolas 28%. Para a categoria eutrofização de água doce (EAD) 99% das contribuições estão associados à utilização dos fertilizantes N e P_2O_5 . Relativamente à categoria eutrofização marinha (EM), 22% das contribuições encontram-se associadas à produção do girassol, 18% ao transporte em camião, 7% ao uso de fertilizantes e cerca de 40% aos processos agrícolas. Para a categoria depleção fóssil (DF) as maiores contribuições encontram-se associadas ao uso de fertilizantes (32%), às operações agrícolas (36%) e ao transporte em camião (14%).

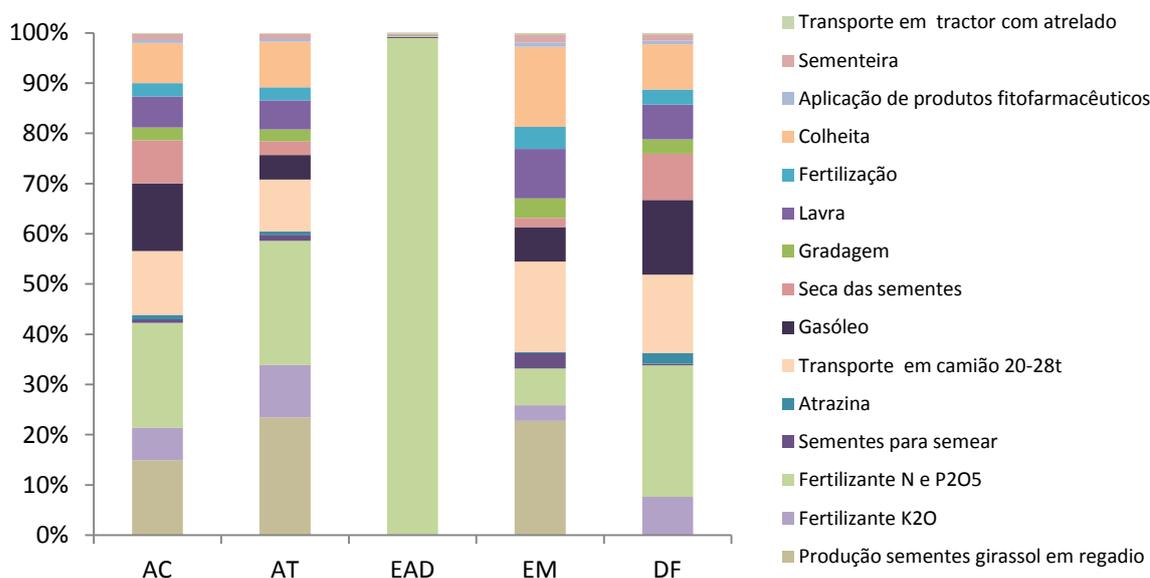


Figura 9 - Contribuição de cada processo para os impactos ambientais associados ao cultivo de 1 kg de sementes de girassol em regadio.

Na figura 10 encontram-se representadas as contribuições de cada processo para os impactos ambientais quando o cultivo de girassol é feito em sequeiro. A maior contribuição deve-se às operações agrícolas variando entre 64% para EAD e 84% para AT e EM. O transporte em camião representa cerca de 10% dos impactos em para todas as categorias de impacto à excepção da EAD, sendo aproximadamente 5%. É ainda importante referir para a categoria AC o contributo de 11% para os impactos do próprio processo de cultivo (ou seja, as emissões locais associadas ao cultivo) e para a categoria EAD a contribuição de cerca de 25% por parte das sementes necessárias ao cultivo.

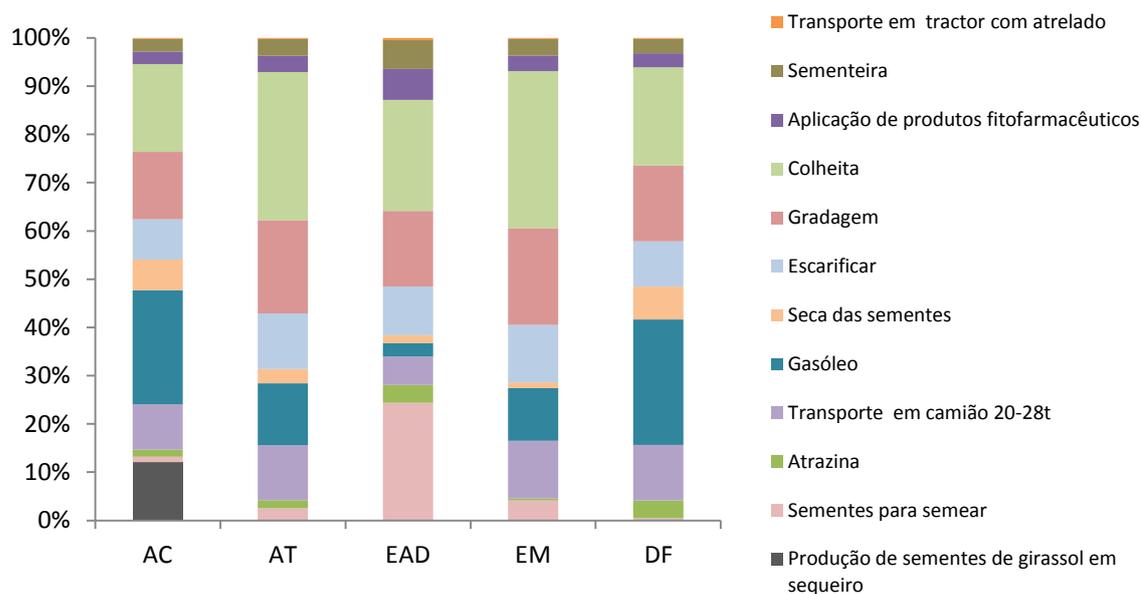


Figura 10 - Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de sementes de girassol em sequeiro.

4.3. Biodiesel de microalgas

Nesta secção são apresentados os resultados da AICV do biodiesel de microalgas, para a produção de biodiesel em que há captura das emissões de CO₂ da central termoelétrica (designa-se de CapCO₂) e quando o CO₂ é proveniente da atmosfera designando-se sem captura (SCapCO₂). De modo análogo ao efectuado na secção 4.2 é apresentada apenas a alocação mássica. Na secção 4.4 será efectuada uma análise de sensibilidade ao método de alocação, considerando a alocação mássica (A.M), alocação energética (A.En) e sem alocação (S.A), recomendado pela ISO 14040.

Na figura 11 e tabela 23 são apresentados os resultados, normalizados e caracterizados, da avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel. Pela análise da figura 11 verifica-se que a categoria depleção do ozono apresenta pouca influência no ciclo de vida do biodiesel de girassol, desta forma, esta não será analisada em detalhe. Analisando os resultados verifica-se que o cenário SCapCO₂ apresenta impactes ambientais superiores para todas as categorias de impacte ambiental analisadas, alterações climáticas (AC), (174%), acidificação terrestre (AT) (52%), eutrofização de água doce (EAD) (13%), eutrofização marinha (EM) e depleção fóssil (DF) (25%). Para a categoria (AC), o cenário CapCO₂ tem emissões negativas, isto verifica-se porque há a captura de

carbono da central termoelétrica, nesta situação não há emissão de CO_2_{eq} , há assim um sequestro de carbono.

A tabela 23, além de indicar os resultados totais para cada categoria de impacto apresenta também os impactos gerados por cada fase de CV. Como se pode verificar para a fase de extração e transesterificação do óleo, os impactos ambientais têm o mesmo valor para os dois cenários. A diferença entre os cenários verifica-se na fase de cultivo, sendo esta fase que distingue cada um deles. À semelhança do biodiesel de girassol, para o biodiesel de microalgas, também o cultivo é a fase de CV com impactos ambientais mais elevados na maioria das categorias, representando 47-81% dos impactos. Para a categoria EAD a fase de CV com impactos ambientais superiores é a transesterificação representando entre 70-79% dos impactos, o mesmo se verifica para o cenário CapCO₂, nas categorias DF e AC.

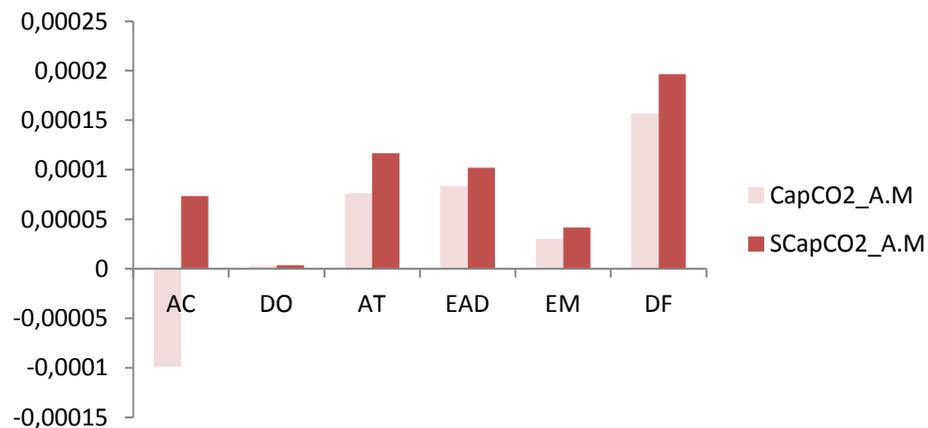


Figura 11 - Avaliação ambiental comparativa da produção de biodiesel de microalgas, para 1 kg de biodiesel de microalgas, alocação mássica, normalização.

Tabela 23 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de microalgas para os cenários considerados, alocação mássica, caracterização.

| | Alterações climáticas (kg CO ₂ eq) | | Acidificação terrestre (kg SO ₂ eq) | | Eutrofização água doce (kg P eq) | | Eutrofização Marinha (kg N eq) | | Depleção fóssil (kg oil eq) | |
|---------------------------|---|---------------------|--|---------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| | Cultivo | | Cultivo | | Cultivo | | Cultivo | | Cultivo | |
| | CapCO ₂ | SCapCO ₂ | CapCO ₂ | SCapCO ₂ | CapCO ₂ | SCapCO ₂ | CapCO ₂ | SCapCO ₂ | CapCO ₂ | SCapCO ₂ |
| Cultivo | -1,39 | 5,40E-1 | 1,73E-3 | 3,10E-3 | 5,17E-6 | 1E-5 | 4,2E-4 | 6,4E-4 | 8,77E-2 | 1,54E-1 |
| Extracção do óleo | 8,11E-2 | | 2,8E-4 | | 2,53E-6 | | 4,68E-5 | | 3,21E-2 | |
| Transesterificação | 2,02E-1 | | 6,2E-4 | | 2,97E-5 | | 1,1E-4 | | 1,41E-1 | |
| Total | -1,11 | 8,23E-1 | 2,63E-3 | 4E-3 | 3,74E-5 | 4,23E-5 | 5,8E-4 | 7,9E-4 | 2,61E-1 | 3,27E-1 |

Como a fase de cultivo é a que mais impactes ambientais apresenta, representa-se na figura 12 o contributo individual de cada processo para esta fase, para os dois cenários de cultivo, com e sem captura de CO₂. Verifica-se que à excepção da categoria de impactes ambientais AC, a contribuição de cada processo é semelhante para os dois sistemas de cultivo de microalgas. Como se pode observar o transporte (contribuição entre 7-48% para as diferentes categorias de impacte), os fertilizantes (10-85% contribuições) e electricidade (5-42%) são os principais contribuidores para os impactes ambientais. Na categoria AC há uma grande diferença nos resultados para cada tipo de cultivo, quando há captura de CO₂ cerca de 84% dos impactes ambientais são negativos, isto deve-se ao sequestro de carbono neste cenário. Relativamente ao cenário sem captura de CO₂, o transporte em camião, os fertilizantes e a electricidade são os processos que mais contribuem para os impactes ambientais, representando respectivamente cerca de, 20%, 18% e 40%.

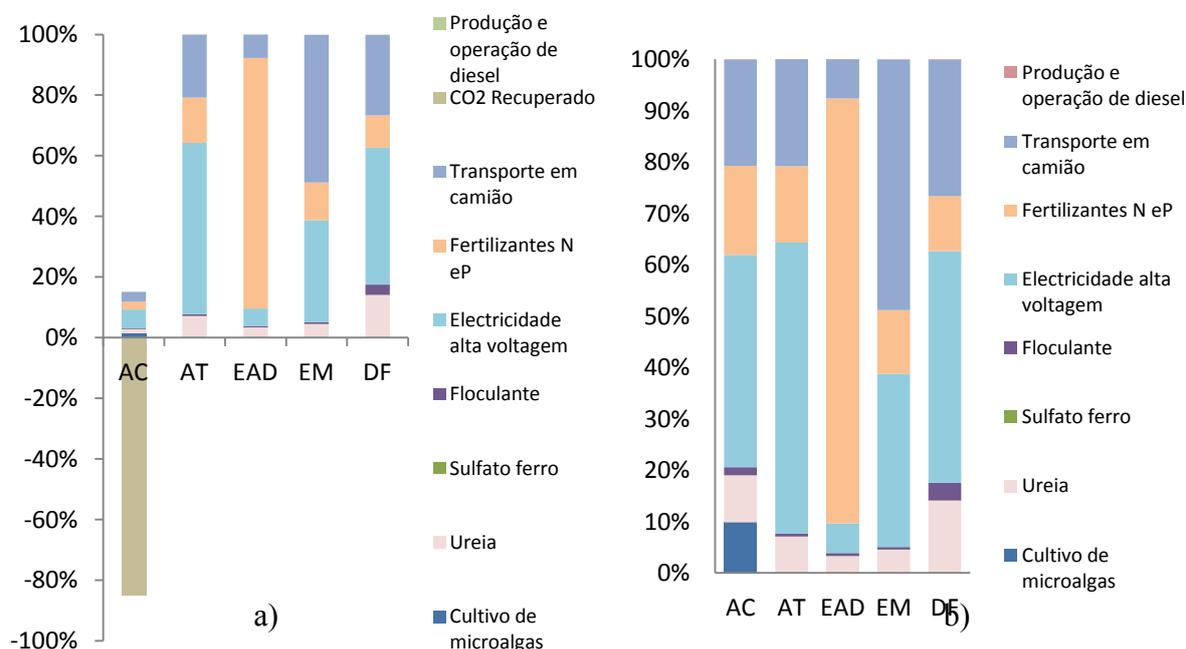


Figura 12 – a) Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de microalgas com captura de CO₂ da central termoeléctrica. b) Contribuição de cada processo para os impactes ambientais associados ao cultivo de 1 kg de microalgas sem captura de CO₂.

Fica a referência, que além dos métodos aplicados de atribuição de impactes aos co-produtos na presente dissertação, numa situação em que há captura e

armazenamento de carbono, como se verifica para o biodiesel de microalgas, a atribuição de impactes aos co-produtos pode ser feita com recurso ao balanço do teor de carbono, prática verificada na base de dados do *ecoinvent* (Jungbluth *et al.*, 2007).

4.4. Multifuncionalidade e análise comparativa entre biodiesel de girassol e microalgas

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa aos dois tipos de biodiesel (girassol e microalgas), com base no método de avaliação de impactes ambientais ReCiPe, tendo também em conta diferentes métodos de atribuição de impactes aos co-produtos.

Na figura 13 encontram-se os resultados obtidos para a categoria alterações climáticas (AC), para os dois sistemas em estudo (biodiesel de girassol e microalgas), considerando todos os cenários e métodos de alocação avaliados na presente dissertação. Relativamente ao biodiesel de girassol verifica-se, que o cultivo em sequeiro apresenta maiores emissões do que o em regadio para todas as formas de alocação. No caso do biodiesel de microalgas o cenário de CapCO₂ tem sempre os melhores resultados, quer comparado com o cenário SCapCO₂, quer comparado com o biodiesel de girassol, pois nesta situação há sequestro de carbono, não havendo desta forma emissão de gases com efeito de estufa (GEE). Quando se compara o biodiesel de girassol com o de microalgas, verifica-se que as maiores emissões de GEE se verificam para o biodiesel de microalgas (SCapCO₂) quando não há alocação. No entanto se analisarmos as outras formas de alocação verifica-se que não se mantém a mesma relação que para S.A, pois para a A.M e A.En as maiores emissões ocorrem para o biodiesel de girassol com cultivo em sequeiro, tal acontece devido aos factores de alocação considerados para a extracção do óleo que diferirem nos dois tipos de biodiesel. É ainda importante referir que por kg de gasóleo fóssil se emitem 3,344 kg CO₂ eq que se encontra evidenciado na figura 13, pela linha tracejada, desta forma o que se encontra a baixo do tracejado representa as emissões de GEE que são evitadas para cada cenário apresentado.

O intervalo de variação das emissões de CO₂ eq para cada um dos cenários é: i) CapCO₂ (-29,7 e -149,5 g CO₂/MJ_{biodiesel}), ii) SCapCO₂ (79,9 e 22,2 g CO₂/MJ_{biodiesel}), iii) Reg (53,1 e 23,9 g CO₂/MJ_{biodiesel}) e iv) Seq (67,7 e 29,7 g CO₂/MJ_{biodiesel}).

Apesar de já ter sido referido na secção 4.2, importa referir que além dos métodos de atribuição de impactes considerados, no caso em que há captura de carbono, a atribuição de impactes aos co-produtos poderia ter sido feita com recurso ao balanço do teor de carbono.

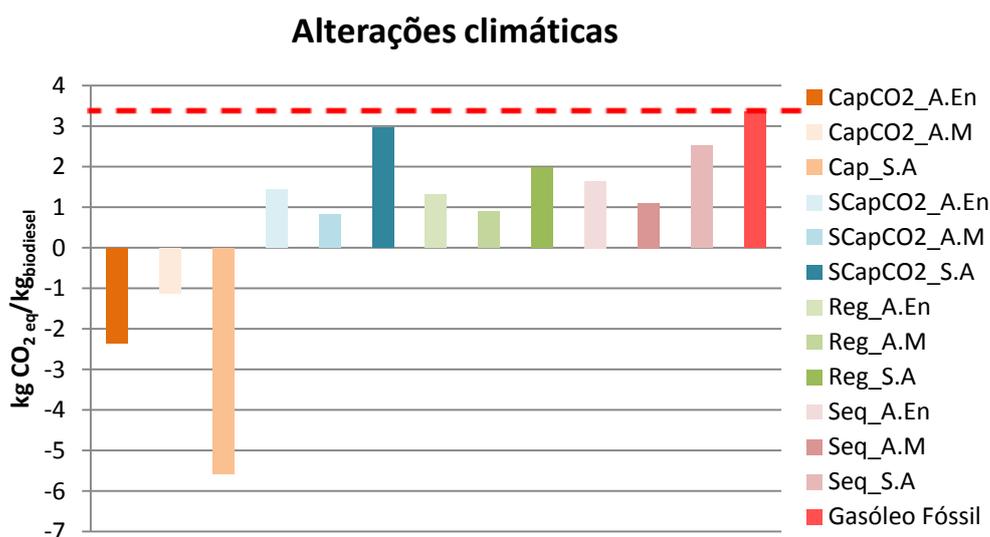


Figura 13 – Resultados alcançados para a categoria alterações climáticas por kg de biodiesel, para os três cenários de atribuição de impactes aos co-produtos.

Na figura 14 são apresentadas as emissões para cada categoria de impacte ambiental, para todos os cenários, considerando alocação energética e mássica. Como se pode verificar pela análise da figura 14 o biodiesel de microalgas, cenário CapCO₂ é o que apresenta menores impactes ambientais em todas as categorias de impacte avaliadas. O biodiesel de girassol com cultivo em sequeiro apresenta os impactes mais elevados nas categorias AC, EM, e DF. O biodiesel de girassol com cultivo em regadio apresenta impactes ambientais mais elevados nas categorias EAD e AT, sendo cerca de dez vezes superiores relativamente aos outros cenários para a EAD e entre 7-40% superior na categoria AT, tal facto deve-se ao uso de fertilizantes.

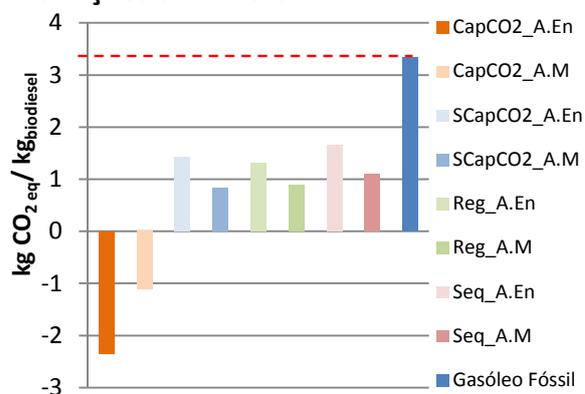
Por final é importante referir que, dependendo do método de alocação utilizado, podem ser obtidos resultados contraditórios. Por exemplo, para a categoria de AC e DF comparando o biodiesel de girassol com cultivo em regadio e o biodiesel de microalgas sem captura de CO₂, verifica-se que:

- Com alocação mássica, as emissões mais elevadas verificam-se para o biodiesel de girassol com cultivo em regadio;

- No entanto, com alocação energética, é o biodiesel de microalgas sem captura de CO₂ que apresenta as emissões mais elevadas.

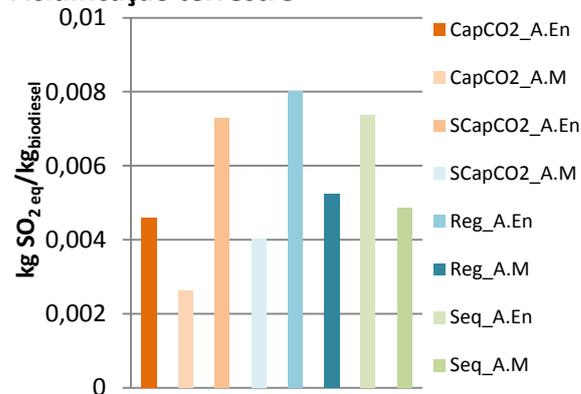
Para as restantes categorias de impacto ambiental AT, EAD e EM verificam-se resultados distintos em termos de uma hierarquização da performance ambiental para os diferentes cenários de produção de biodiesel.

Alterações climáticas



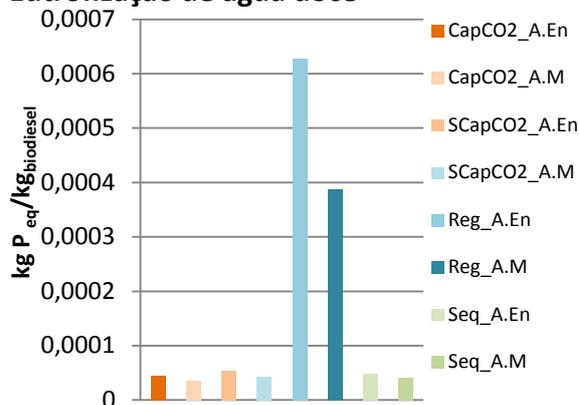
a)

Acidificação terrestre



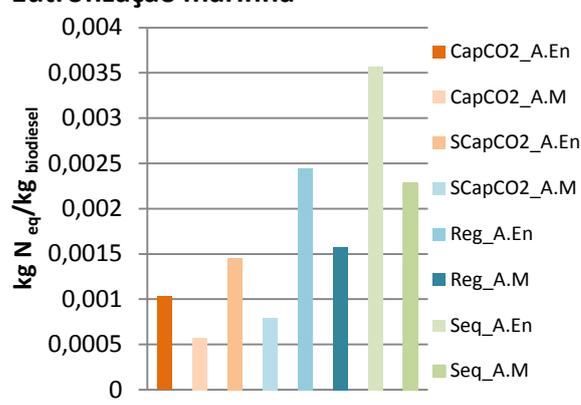
b)

Eutrofização de água doce



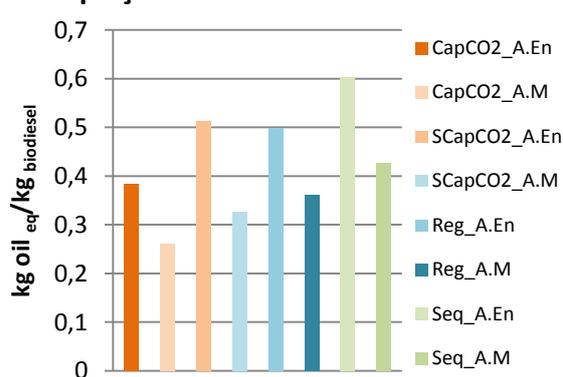
c)

Eutrofização marinha



d)

Depleção fóssil



e)

Figura 14 – Resultados alcançados por kg de biodiesel para alocação mássica e energética. a) Resultados para a categoria alterações climáticas; b) Resultados para a categoria acidificação terrestre, c) Resultados para a categoria eutrofização de água doce; d) Resultado para a categoria eutrofização marinha; e) Resultados para a categoria depleção fóssil.

4.5. Comparação do método ReCiPe com o CML

O modelo de avaliação de impactes ambientais CML é um modelo mais antigo, com uma abordagem *midpoint* que serviu como base ao modelo ReCiPe para a abordagem *midpoint* apresentada neste modelo. Esta secção tem por objectivo avaliar as diferenças existentes entre os resultados obtidos com estes dois métodos de avaliação de impacte ambiental, pelo que apenas serão considerados os resultados obtidos com um método de alocação (mássica), pois o método de alocação não tem influência nesta análise.

Na tabela 24 são apresentados os resultados para os cenários considerados na presente dissertação, para os métodos CML e ReCiPe, assim como, a diferença existente entre os resultados calculados com o método ReCiPe e os resultados calculados com o CML. Através da análise da tabela 24 observa-se que se consideraram apenas sete categorias, pois são as que apresentam as mesmas unidades nos dois métodos e que por isso podem ser comparadas entre si. Verificou-se que as variações encontradas entre os dois métodos são: i) diferenças pouco significativas para categoria *global warming* (variação entre 0,1 – 0,33%), ii) algumas diferenças para as categorias *ozone layer depletion* e *acidification* (variação entre 0,4 – 11,9%), iii) diferenças muito significativas para as categorias toxicológicas (variação entre -99,9 – 405).

As diferenças encontradas para os dois métodos de atribuição dos impactes ambientais, deve-se à atribuição de diferentes factores para as substâncias consideradas em cada método, para cada categoria de impacte ambiental.

Tabela 24 – Comparação dos resultados entre os métodos de avaliação de impacte CML e ReCiPe para o biodiesel de girassol e microalgas, por kg de biodiesel para o cenário de alocação mássica.

| Categoria de impacte | | | Cenários analisados | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| ReCiPe | CML | Unidade | CML_Reg | ReCiPe_Reg | Dife- rença (%) | CML_Seq | ReCiPe_Seq | Dife- rença (%) | CML_SCapCO ₂ | ReCiPe_SCap CO ₂ | Dife- rença (%) | CML_Cap CO ₂ | ReCiPe_ CapCO ₂ | Dife- rença (%) |
| <i>Terrestrial acidification</i> | <i>Acidification</i> | kg SO ₂ eq | 0,00521 | 0,00524 | 0,4 | 0,00477 | 0,00484 | 1,5 | 0,00429 | 0,00401 | -6,4 | 0,00279 | 0,00261 | -6,4 |
| <i>Ozone depletion</i> | <i>Ozone layer depletion (ODP)</i> | kg CFC ⁻¹¹ eq | 1,06x10 ⁻⁷ | 1,14x10 ⁻⁷ | 7,4 | 1,4x10 ⁻⁷ | 1,467x10 ⁻⁷ | 4,7 | 7,40x10 ⁻⁸ | 8,26x10 ⁻⁸ | 11,6 | 5,99x10 ⁻⁸ | 6,70x10 ⁻⁸ | 11,9 |
| <i>Climate change</i> | <i>Global warming (GWP100)</i> | kg CO ₂ eq | 0,89001 | 0,89231 | 0,25 | 1,10375 | 1,10532 | 0,1 | 0,82101 | 0,82375 | 0,33 | -1,10753 | -1,10545 | -0,18 |
| <i>Human toxicity</i> | <i>Human toxicity</i> | kg 1,4-DB eq | 0,46710 | 2,35929 | 405 | 0,44565 | 0,05296 | -88,1 | 0,19648 | 0,04316 | -78 | 0,13470 | 0,02910 | -78,4 |
| <i>Freshwater ecotoxicity</i> | <i>Fresh water aquatic ecotox.</i> | kg 1,4-DB eq | 1,06447 | 0,03493 | -96,7 | 2,01634 | 0,05934 | -97,1 | 0,03961 | 0,00082 | -97,9 | 0,03077 | 0,00065 | -97,9 |
| <i>Marine ecotoxicity</i> | <i>Marine aquatic ecotoxicity</i> | kg 1,4-DB eq | 134,737 | 0,01269 | -99,9 | 103,719 | 0,01035 | -99,9 | 100,23 | 0,00115 | -99,9 | 70,358 | 0,00082 | -99,9 |
| <i>Terrestrial ecotoxicity</i> | <i>Terrestrial ecotoxicity</i> | kg 1,4-DB eq | 0,09134 | 0,03221 | -64,7 | 0,01910 | 0,07382 | 286 | 0,00294 | 0,00011 | -96,2 | 0,00187 | 7,32x10 ⁻⁵ | -96 |

4.6. Análise de sensibilidade às emissões de N₂O

Nesta secção será feita uma análise de sensibilidade à influência dos intervalos de incerteza associados aos factores de emissão (IPCC 2006) nas emissões de N₂O.

As emissões de N₂O são produzidas através do azoto no solo através de emissões directas (processos de nitrificação e desnitrificação e volatilização do azoto do solo para o ar) e indirectas (lixiviação e escoamento superficial para os cursos de água) (Castanheira e Freire, 2011 referenciado por Huo *et al*, 2009). Para determinar as emissões directas e indirectas foram seguidas as directrizes do IPCC, metodologia de nível 1 (Tier1), IPCC 2006.

Na tabela 25 encontram-se os parâmetros seguidos e na tabela 26 os factores de emissão considerados para o cálculo das emissões de N₂O em regadio e sequeiro. Importa salientar que apesar de não serem aplicados fertilizantes no cultivo em sequeiro, existem emissões de N₂O provenientes dos resíduos das culturas. Deste modo, neste tipo de cultivo apenas não são consideradas as emissões da volatilização do azoto. Na tabela 27 apresentam-se as emissões directas e indirectas de N₂O para o cultivo em regadio e em sequeiro.

Tabela 25 – Parâmetros para o cálculo das emissões de N₂O.

| Parâmetros para o cálculo das emissões | Regadio | Sequeiro |
|---|----------|----------|
| F_{SN} (kg/ha*ano) | 21 | - |
| $F_{CR}=AG_{DM} * N_{AG} + BG_{DM} * N_{BG}$ (kg/ha*ano) | 35,21 | 13,81 |
| Produtividade (kg/ha*ano) | 3000 | 650 |
| % Matéria seca (DM) | 88% | |
| $Crop_{BF}$ (kg matéria seca/ha*ano) $Crop_{BF}=Produtividade * DM$ | 2640 | 572 |
| Slope | 1,09 | |
| Intercept (kg matéria seca/ha*ano) | 880 | |
| Resíduos acima do solo $AG_{DM}=Crop_{BF} * Slope + Intercept$ | 3757,6 | 1588,5 |
| Proporção de resíduos abaixo do solo para biomassa acima do solo (R_{BG-BIO}) | 0,22 | |
| Resíduos enterrados $B_{GDM}=(Crop_{BF}+AG_{DM}) * R_{BG-BIO}$ | 1407,472 | 475,31 |
| Teor de N de resíduos acima do solo: N_{AG} (kg N/kg DM) | 0,006 | |
| Teor de N contido na biomassa abaixo do solo N_{BG} : (kg N/kg DM) | 0,009 | |

Tabela 26 – Factores de emissão considerados no cálculo das emissões de N₂O.

| Factores de emissão | Valor por defeito | Intervalo de incerteza |
|---|-------------------|------------------------|
| Frac _{GASF} : emissões de NH ₃ e NOx (kg NH ₃ -N+NOx-N/kg fertilizante sintético -N) | 0,1 | 0,03-0,3 |
| Frac _{LEACH} : lixiviação de N (kg N/kg fertilizante) | 0,3 | 0,1-0,8 |
| EF1 (kg N ₂ O-N/kg fertilizante -N) | 0,01 | 0,003-0,03 |
| EF4 (kg N ₂ O-N/(kg NH ₃ -N+ kg NOx-N- emitido)) | 0,01 | 0,002-0,05 |
| EF5 (kg N ₂ O-N/kg N lixiviado) | 0,0075 | 0,0005-0,025 |

Tabela 27 – Formulas de cálculo seguido e resultados das emissões de N₂O, em regadio e em sequeiro.

| Método de cálculo das emissões | Regadio | Sequeiro |
|--|---------|----------|
| Emissões de N ₂ O directas (kg N ₂ O/ha) = (F _{SN} +F _{CR})*EF1*44/28 | 0,8833 | 0,2169 |
| Emissões indirectas N ₂ O de NH ₃ e NOx (kg N ₂ O/ha) = F _{SN} *Frac _{GASF} *EF4*44/28 | 0,033 | 0 |
| Emissões indirectas da lixiviação de N (kg N ₂ O/ha) = (F _{SN} +F _{CR})*Frac _{LEACH} *EF5*44/28 | 0,1988 | 0,0488 |

Os parâmetros apresentados na tabela 25 consideram factores de emissão com base num valor por defeito. No entanto, o IPCC 2006 apresenta um intervalo de incerteza. De forma a avaliar a sensibilidade dos resultados à gama de incerteza dos factores de emissão, determinaram-se as emissões de N₂O para os valores limite (superior e inferior) do intervalo de incerteza. Na figura 15 apresentam-se os resultados das emissões em kg CO₂ eq/kg_{biodiesel} para valores por defeito, valores máximos e mínimos. Os resultados apenas são apresentados para a categoria de impacte AC pois é a única categoria para a qual as emissões de N₂O provocam impacte ambiental, de entre as categorias analisadas.

Esta análise foi feita tanto para o biodiesel com cultivo em regadio como em sequeiro e para o cenário de AM. Para o biodiesel de girassol cultivado em regadio, o intervalo de variação é de 287 gCO₂ eq/kg_{biodiesel} (este intervalo diz respeito à diferença entre os valores encontrados usando os factores de emissão máximos e mínimos), o valor máximo de emissão é de 1114 gCO₂ eq/kg_{biodiesel} (29,9 gCO₂/MJ_{biodiesel}) e o mínimo de 827 gCO₂ eq/kg_{biodiesel} (22,2 gCO₂/MJ_{biodiesel}), sendo que o valor encontrado na presente dissertação foi de 892 gCO₂ eq/kg_{biodiesel} (24 gCO₂/MJ_{biodiesel}), nesta situação verifica-se uma variação entre o valor máximo de emissão e o mínimo de cerca de 35%. Para o caso do cultivo em sequeiro o intervalo de variação é de 268 g CO₂ eq, obtendo um valor máximo

de emissão de 1304 g CO₂ eq/ kg_{biodiesel} (35,1 gCO₂/MJ_{biodiesel}) e um mínimo de 1036 g CO₂ eq/ kg_{biodiesel}, sendo que o valor obtido no presente estudo foi de 1105 gCO₂ eq/kg_{biodiesel} (29,7 gCO₂/MJ_{biodiesel}), nesta situação verifica-se uma variação entre o valor máximo de emissão e o mínimo de cerca de 26%. Como se pode observar os valores indicados por defeito pelo IPCC para os factores de emissão para o cálculo das emissões de N₂O, alcançam resultados mais próximos do valor mínimo de emissões, isto porque os factores de emissão definidos por defeito se encontram mais próximos dos factores de emissão mínimos.

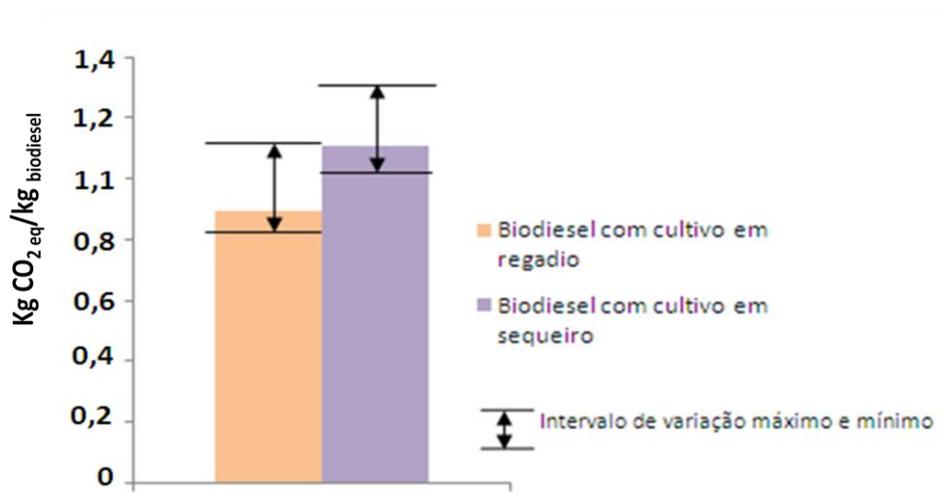


Figura 15 – Emissões de GEE para o biodiesel com cultivo em sequeiro e regadio para o cenário de AM, com indicação das emissões máximas e mínimas.

4.7. Área de cultivo necessária para garantir metas de incorporação no sector dos transportes

Nesta secção será feita uma análise de forma a avaliar a quantidade de áreas de cultivo necessárias para garantir a substituição de 10% do gasóleo consumido anualmente por biodiesel, de forma a garantir as metas de incorporação estabelecidas pela UE. Deste modo, aferiram-se os consumos médios anuais de gasóleo para o sector rodoviário, para que se estimasse a quantidade de girassol e microalgas, que garantem a produção de biodiesel suficiente, capaz de substituir 10% do consumo anual de gasóleo.

Na tabela 28 apresenta-se a quantidade média de gasóleo consumido no ano de 2010, desta forma determinou-se a quantidade de gasóleo em l a substituir por ano

(6878117647 l/ano). Na tabela 29 apresentam-se as produtividades de cada cenário considerado ao longo da dissertação, determinando-se a área que seria necessário cultivar para se substituir 10% do consumo de gasóleo por biodiesel. Desta forma verifica-se que as microalgas necessitam de menos ha cultivados para a mesma produção de biodiesel que o girassol. As maiores necessidades de terra no caso do girassol apresentam-se para o cultivo em sequeiro, visto, que apresenta uma produtividade bastante inferior, necessita assim de uma área 75% superior relativamente ao cultivo em regadio. Relativamente às microalgas a área necessária é 50 % superior para o cenário SCapCO₂ (produtividade 15 g/(m².dia)) comparativamente ao CapCO₂ (produtividade 30 g/(m².dia)). Quando comparadas as áreas necessárias dos dois tipos de biodiesel verifica-se que o girassol apresenta necessidades 95% superiores quando comparado o melhor cenário de cada cultura e 98% quando comparados os piores cenários de cada cultura.

Tabela 28 – Consumo anual de gasóleo.

| | | Referência |
|--------------------------------------|-------------|--|
| Consumo médio por mês (kg) | 4872000000 | Direcção geral de energia e geologia, 2010 |
| Consumo anual (kg) | 58464000000 | |
| Consumo anual (l) | 68781176471 | |
| 10% Consumo anual gasóleo (l) | 6878117647 | |

Tabela 29 – Produtividades e nº de ha necessários para garantir a substituição de 10% de gasóleo por biodiesel.

| | Girassol | | Microalgas | |
|--|----------|----------|--------------------|---------------------|
| | Regadio | Sequeiro | CapCO ₂ | SCapCO ₂ |
| Produtividade (kg/ha*ano) | 3000 | 650 | 109500 | 54750 |
| Produtividade biodiesel (l/ha*ano) | 1389,53 | 301,07 | 29145,59 | 14572,80 |
| Nº de hectares necessários para substituir 10% consumo de gasóleo por biodiesel | 4949952 | 22845932 | 235992 | 471983 |

Desta forma é útil verificar se Portugal detém as áreas de cultivo necessárias que satisfaçam os valores encontrados. Segundo Froes e Rodrigues a área de rega do Alqueva poderá atingir cerca de 150000 ha, como se pode verificar esta representa cerca de

3% da área necessária para garantir a substituição de 10% de gasóleo através de biodiesel de girassol em regadio e 0,66% para que a substituição seja com biodiesel de girassol em sequeiro. Relativamente ao biodiesel de microalgas, admitindo que o cultivo seria feito em toda a costa Alentejana e Algarvia, com uma média de 300 km, considerando 400 m de cultivo junto à costa, representaria uma área total para cultivo de 12000 ha. Desta forma, verifica-se para o cenário de captura de CO₂ que esta área representa 5% da área necessária para a substituição de 10% de gasóleo e 2,5% para que a substituição seja feita com biodiesel de microalgas sem captura de CO₂. É no entanto importante referir que para o caso das microalgas há a possibilidade de que o seu cultivo não seja junto à costa, considerando nessa situação uma espécie de microalga com cultivo em água doce. Apesar de esta questão não ser abordada nesta dissertação, abre a possibilidade de aumento das áreas de cultivo. O mesmo não se verifica para o caso do girassol.

4.8. Comparação com outros estudos

Nesta secção apresenta-se uma análise comparando aos resultados obtidos (em termos de CO₂ eq) na presente dissertação, com outros estudos. Como se pode verificar pela análise da tabela 30 os valores obtidos neste estudo são superiores aos estudos de Girío *et al.*, 2011 e Viana, 2008. Comparando com Girío *et al.*, 2011, analisam-se os valores calculados para a alocação energética visto que é a praticada pelo estudo em comparação, a diferença encontrada, pode dever-se à não consideração da maquinaria por parte de Girío *et al.*, 2011. Relativamente a Viana, 2008, pensa-se que as variações derivam de diferentes processos de extracção do óleo e diferentes rotas de transesterificação, visto que Viana, 2008 considera extracção mecânica e transesterificação por via etílica. Relativamente ao estudo Biograce, 2011, conclui-se que é o que apresenta resultados mais próximos com os da presente dissertação. Os resultados são comparados para alocação energética visto ser a considerada pelo estudo em análise, verifica-se assim que os valores determinados por este estudo se encontram entre o intervalo de valores calculado neste estudo para o biodiesel de girassol com cultivo em regadio e em sequeiro.

Na tabela 31 encontra-se a comparação dos resultados entre a presente dissertação e outros estudos, para o biodiesel de microalgas. Como se pode verificar há uma grande variação de resultados dentro dos próprios estudos. Comparando com

Setephenon et al., 2010, verifica-se que para uma situação as emissões são muito elevadas quando comparadas com os resultados da presente dissertação, isto deve-se ao facto de este autor considerar o cultivo em bioreactores nesta situação. Comparando com Batan et al., 2010 a diferença de resultados pensa dever-se a diferentes formas de atribuição de impactes aos co-produtos, como alocação económica e método de substituição.

Tabela 30 – Emissões de CO₂ eq/MJ_{biodiesel}, comparação com outros estudos, biodiesel girassol.

| Biodiesel girassol | | | | | Unidade |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------------------------------|
| Neste estudo | | Gírio et al., 2011 | Viana, 2008 | Biograce, 2011 | |
| Regadio | Sequeiro | | | | |
| 53,1 ^a | 67,7 ^a | 14 ^d | | 40,79 ^c | g CO ₂ eq/MJ biodiesel |
| 23,9 ^b | 29,7 ^b | | 16,03 | 54,36 ^a | |
| 35,16 ^c | 44,3 ^c | 23 ^e | | | |

Tabela 31 - Emissões de CO₂ eq/MJ_{biodiesel}, comparação com outros estudos, biodiesel de microalgas.

| Biodiesel microalgas | | | | | Unidade |
|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|---------|
| Neste estudo | | Setephenon et al., 2010 | Batan et al., 2010 | | |
| RecCO2 | CO ₂ Atm | | | | |
| -149,5 a | 79,9 a | 19,2 | -75,29 | g CO ₂ eq/MJ biodiesel | |
| -29,7 b | 22,2 b | 320 | -23,37 | | |
| -63,09 c | 38,4 c | | -54,85 | | |

Nota: ^{a, b, c} - representam respectivamente, sem alocação, alocação mássica e alocação energética. ^{d, e} - Regadio e sequeiro.

5. CONCLUSÕES

A crescente pressão por parte da UE, para que os seus estados membros estabeleçam metas de incorporação de energias provenientes de fontes renováveis, tanto no consumo final bruto de energia, como no sector do transporte, torna importante a avaliação das implicações ambientais relativas à produção de biocombustíveis. Assim, a presente dissertação teve como principal objectivo avaliar comparativamente o ciclo de vida (CV) do biodiesel, produzido com base em dois tipos distintos de matéria-prima cultivável em Portugal (girassol e microalgas), através da metodologia científica de avaliação de ciclo de vida (ACV), com sistema *cradle-to-gate*.

Foi desenvolvido um modelo e inventário de CV para os dois sistemas de produção de biodiesel considerados, tendo por base no caso do girassol dados relativos a Portugal completados com dados disponíveis na literatura técnico-científica, para o biodiesel de microalgas teve-se por base os dados disponíveis na literatura técnico-científica, tendo como referência o contexto Português. O modelo desenvolvido permitiu efectuar uma avaliação de impactes de ciclo de vida (AICV) para os dois tipos de biodiesel utilizando os métodos de avaliação de impactes ambientais ReCiPe e CML.

Na ACV do sistema biodiesel de girassol consideraram-se duas formas de cultivo (regadio e sequeiro) e ainda a influência do método de alocação dos co-produtos (alocação mássica - A.M, alocação energética - A.En e sem alocação - S.A). Concluiu-se que o biodiesel com cultivo em sequeiro apresenta maiores impactes ambientais do que em regadio para as categorias alterações climáticas (AC), eutrofização marinha (EM) e depleção fóssil (DF). O biodiesel de girassol com cultivo em regadio apresenta maiores impactes ambientais nas categorias, acidificação terrestre (AT) e eutrofização de água doce (EAD) comparativamente com o cultivo em sequeiro. Verificou-se ainda que a fase de CV com maior contribuição para os impactes ambientais é o cultivo, (entre os 21-93%). Os processos que mais contribuem para os impactes ambientais associados a esta fase de CV são os fertilizantes, os processos agrícolas e as emissões locais associadas ao cultivo do girassol.

Na ACV do sistema biodiesel de microalgas foram avaliados dois cenários, com o objectivo de analisar duas formas de garantir as necessidades de CO₂ (com captura de CO₂ (CapCO₂) da central termoeléctrica de Sines e sem captura de CO₂ (SCapCO₂), utilizando CO₂ atmosférico, estando a cada um deles associado uma produtividade de respectivamente, 30 g/(m².dia) e 15 g/(m².dia)) e ainda três métodos de atribuição dos impactes ambientais aos co-produtos, A.M, A.En e S.A. Os resultados revelam que o cenário SCapCO₂ apresenta impactes ambientais superiores para todas as categorias de impacte, AC (174%), AT (34%), EAD (11%), EM (27%) e DF (20%). Quando há a captura de CO₂ da central as emissões são negativas devido à recuperação do CO₂, ou seja há o sequestro de carbono. A fase de CV com maiores emissões é o cultivo representando entre 15-80% dos impactes ambientais. Os processos que mais contribuem para os impactes ambientais nesta fase de CV são o transporte, a electricidade e os fertilizantes.

Comparando os dois tipos de biodiesel (girassol e microalgas), conclui-se que o biodiesel de microalgas com captura de CO₂ da central apresenta, para todas as categorias, impactes mais reduzidos. Os impactes mais elevados verificam-se para o biodiesel de girassol em sequeiro nas categorias AC, EM e DF e para o biodiesel com cultivo em regadio nas categorias AT e EAD, o biodiesel sem captura de CO₂ obtém sempre resultados intermédios. Torna-se importante referir que dependendo do método de alocação utilizado, podem ser obtidos resultados contraditórios e também que há uma elevada incerteza associada aos dados relativos às microalgas, pois não são específicos para Portugal e como se trata de uma cultura em desenvolvimento encontra-se em constante mudança tecnológica. Apesar disto as microalgas apresentam a vantagem para a produção de biodiesel, pois não competem com culturas alimentares, como o caso do girassol.

Foi efectuada ainda uma análise comparando o método de avaliação de impactes ambientais ReCiPe, com o método CML. Deste modo a análise feita centrou-se nas categorias que apresentavam iguais unidades para que fosse possível estabelecer uma comparação entre os metodos. Desta forma, conclui-se que nas categorias aquecimento global, não há diferenças significativas (0,1 - 0,33%), nas categorias depleção da camada do ozono e acidificação há algumas variações nos resultados (0,4 - 11,9%) e para as categorias toxicológicas verifica-se uma elevada variação dos resultados (-99,9 – 405%).

Para este estudo foi ainda elaborada uma análise de sensibilidade relativa às emissões de N₂O para o sistema biodiesel de girassol, avaliando a sensibilidade dos resultados aos factores de emissão definidos pelo IPCC. Conclui-se que variando as emissões de N₂O, apenas a categoria de impacte ambiental AC altera os seus resultados. Desta forma obtém-se um intervalo de variação entre as emissões mais elevadas e mais reduzidas de N₂O de, 287 gCO_{2 eq}/kg_{biodiesel} para o biodiesel com cultivo em regadio e 268 gCO_{2 eq}/kg_{biodiesel} para o biodiesel com cultivo em sequeiro. Verifica-se assim que a variação nas emissões de N₂O provoca variações na emissão de gases com efeito de estufa (GEE) de 35% para o biodiesel em regadio e 26% para o biodiesel em sequeiro.

Foi ainda elaborada uma análise relativa às áreas de cultivo necessárias para garantir a substituição de 10% de gasóleo por biodiesel no sector dos transportes. Verificou-se assim, que a área que Portugal tem disponível para cultivo de girassol ou microalgas representa, para o caso de biodiesel girassol 3% e 0,66% das necessidades, para cultivo em regadio e sequeiro, respectivamente, relativamente ao biodiesel de microalgas 2,5% e 5% com capturara e sem captura respectivamente. Nesta análise verifica-se ainda que o biodiesel de girassol necessita de uma área cerca de 20 vezes superior para garantir a mesma produção que o biodiesel de microalgas. É no entanto importante referir que para o caso das microalgas há a possibilidade de que o seu cultivo não seja junto à costa, considerando nessa situação uma espécie de microalga com cultivo em água doce. Apesar de esta questão não ser abordada nesta dissertação, abre a possibilidade de aumento das áreas de cultivo. O mesmo não se verifica para o caso do girassol.

5.1. Limitações e sugestões para investigação futura

A fase de cultivo das matérias-primas deverá ser analisada em maior detalhe, para que se possam completar inventários e colmatar algumas limitações devido a simplificações, nomeadamente: i) Para o biodiesel de girassol os dados de maquinaria assim como os seus consumos foram estimados com recurso à base de dados do *ecoinvent*, por não haver dados específicos para Portugal; ii) Para o biodiesel de microalgas, os consumos eléctricos são apresentados de forma global para o cultivo e não foi contabilizada a infra-estrutura para o cultivo por falta de dados; iii) Para os sistemas

biodiesel de girassol e microalgas os processos de extracção e transesterificação do óleo são idênticos à colza.

Desta forma, para o biodiesel de girassol será importante estabelecer contacto com agricultores, para que se realize um inventário que complete as limitações encontradas nesta dissertação. Relativamente ao biodiesel de microalgas, os inventários agrícolas ainda não se encontram tão uniformizados como para o girassol, portanto, seria interessante um contacto com algum produtor de microalgas em Portugal para que se tome conhecimento das práticas de cultivo em território nacional, completando assim o inventário apresentado na presente dissertação, que teve como base documentação técnico-científica.

Para os dois tipos de biodiesel foram considerados na presente dissertação diferentes métodos de atribuição de impactes aos co-produtos, além destes, seria útil estudar a introdução do método de substituição de impactes ambientais aos dois sistemas em estudo e comparar os resultados obtidos, com os encontrados nesta dissertação. Pois se no girassol há a possibilidade de substituição do farelo e da glicerina, para as microalgas além desses, há também a captura de CO₂ (já considerado no presente estudo), a utilização de águas residuais com tratamento secundário como meio de cultura e analisar nesta situação a alteração na necessidade de nutrientes.

Para além da análise ambiental efectuada na presente dissertação deverá ser incluída uma análise energética aos dois sistemas em estudo. Por final deverá ser objecto de investigação futura calcular os impactes associados a cenários alternativos de alteração de uso dos solos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

Algafuel – www.algafuel.pt – acedido a 05.04.11.

Balafoutis, A., Freire, F., & Papadakis, G. (2010). Life Cycle Assessment of Sunflower oil produced in Greece and used as fuel in tractor diesel engines 2. Life Cycle Modelling of sunflower oil in three Greek farms. Assessment, 1-9.

Batan, L., Quinn, J., Willson, B., & Bradley, T. (2010). Net energy and greenhouse gas emission evaluation of biodiesel derived from microalgae. Environmental science & technology, 44(20), 7975-80. doi: 10.1021/es102052y.

Bentrup F., Kusters J., Lammel J., Barraclough P., Kuhlmann H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. European Journal of Agronomy, 20 (247-264).

Benemann, R, J., (2008). Opportunities and challenges in algae biofuels production. A position paper in line with Algae World 2008, Singapore.

Biograce (2011). Excel Greenhouse gas emission calculation tool_version4. Dados obtidos no website do Projecto Biograce em 16.06.2011 (<http://www.unitedsoybean.org/>).

Campbell, P. Beer, T. Batten, D. (2010). Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. Bioresource Technology 102 (2011) 50–56.

Castanheira É.G.;Freire F.(2011). Life cycle GHG Assessment of soybeans. In: LCM 2011 - Towards Life Cycle Sustainability Management. Berlin. ECOS2011. Proceedings of LCM 2011 - Towards Life Cycle Sustainability Management.

Clarens, A. F., Resurreccion, E. P., White, M. a, & Colosi, L. M. (2010). Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. Environmental science & technology, 44(5), 1813-9. doi: 10.1021/es902838n.

Clarens, A. F., Nassau, H., Resurreccion, E. P., White, M. a, & Colosi, L. M. (2011). Environmental Impacts of Algae-Derived Biodiesel and Bioelectricity for Transportation. Environmental science & technology. doi: 10.1021/es200760n.

Comissão Europeia (2003). “Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Integrated Product Policy – Building on Environmental Life-Cycle Thinking. COM (2003) 302 final. Bruxelas, Bélgica.

-
- Comissão Europeia (2009). “Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis”. Estrasburgo, França.
- Cotana, F., Barbarena, M., Fantozzi, F., & Ciriaco, C. N. (2010). Sviluppo Sostenibile, Tutela dell' Ambiente e della Salute Umana Atti. Life cycle assessment of sunflower and rapeseed. assessment.
- Clift, R., Doig, A., Finnveden, G. (2000). The application of life cycle assessment to integrated solid waste management. Part 1 – Methodology. Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, Vol 78, part B.
- Darzens, A., Pienkos, P., Edey, L., (2010). Current status and potential for algal biofuels production. A report to IEA bioenergy task 39-T2. NREL - National renewable energy laboratory.
- Diário da República, 1ª série – Nº 207 – Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, Decreto-Lei nº 117/2010 de 25 de Outubro.
- Direcção geral de energia e geologia. (2010). Petróleo, gás natural e carvão. Estatísticas rápidas. Disponível em <http://www.dgge.pt/>. Acedido a 29.04.2011.
- Energias renováveis – www.energiasrenovaveis.pt – acedido a 22.03.2011.
- Ferreira, J. R. V., (2004). Análise de ciclo de vida de produtos. Instituto politécnico de Viseu.
- Fonseca, J., (2007). Introdução de biodiesel em Portugal. Prio – Grupo Martifer. Disponível em <http://www.ageneal.pt> – acedido a 13.07.2011.
- Froes, J., Rodrigues, P.N. A expansão potencial da área de rega do Alqueva. Disponível em <http://www.cotr.pt/informação/web2/papers/47.pdf>. - acedido a 08.09.2011.
- Garcia, R., (2010). Avaliação comparativa de instrumentos de gestão ambiental de ciclo de vida aplicados a dois sistemas com biomassa: painéis e electricidade. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra.
- Gírio, F., Matos, C., Oliveira, C., Silva, L., Bogel-Lukasik, R., Aguiar, R., (2010). Typical greenhouse gas emissions in the cultivation phase of raw materials for the production of biofuels. Report from Portugal. Agriculture, 19(12).
- Goedkoop, M., Oele, M., Schryver, A., Vieira, M., Hegger, S., (2010). SimaPro database manual. Methods library. Pré Consultants.
- Guinée J., Heijungs R., Voet E (2009). —A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications. International Journal of Life Cycle Assessment, 14:328-339.
- Iriarte, A., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2010). Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions. Journal of Cleaner Production, 18(4), 336-345. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2009.11.004.

- IPCC, (2006). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU), vol-4. Guidelines for national greenhouse gas inventories.
- ISO 14040 (2006). Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. EN ISO 14040:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.
- JEC, (2008). Exel de wtw study, biofuels pathways_version3.0. Disponível em <http://ies.jrc.ec.europa.eu> – aceso a 06.06.2011.
- Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Spielmann M., Stettler C., Sutter J. (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. Final reportecoinvent data v2.0. Volume: 17. Swiss Centre for LCI, ESU. Duebendorf and Uster, CH.
- Kallivroussis, L. (2002). RD—Rural Development The Energy Balance of Sunflower Production for Biodiesel in Greece. *Biosystems Engineering*, 81(3), 347-354. doi: 10.1006/bioe.2001.0021.
- Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J., Bernard, O. (2009). Policy Analysis Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environmental Science & Technology*, 6475-6481.
- Lange, M. (2011). The GHG balance of biofuels taking into account land use change. *Energy Policy*, (2009), 1-13. Elsevier. doi: 10.1016/j.enpol.2011.01.057.
- Liderkist – <http://liderkist.com> – aceso a 22.03.2011.
- Malça, J., & Freire F (2006). Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bioETBE: assessing the implications of allocation. *Energy*, 31(15):3362-3380.
- Malça, J., & Freire, F. (2009). Energy and Environmental Benefits of Rapeseed Oil Replacing Diesel. *Int J Green Energy*, vol. 6, pp. 287-301, 2009.
- Malça, J., & Freire, F. (2010). Uncertainty Analysis in Biofuel Systems: An Application to the Life Cycle of Rapeseed Oil. *J Ind Ecol*, vol. 14, pp. 322-334, 2010.
- Malça, J., & Freire, F. (2011). Life-cycle studies of biodiesel in Europe: A review addressing the variability of results and modeling issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 338-351. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.013.
- Mata, T. M., Martins, A. a, & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.020.
- Minowa, T., Yokoyama, S.-ya, & Kishimoto, M. (1995). Oil production from algal cells of *Dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction. *Science*, 74(12), 1735-1738.
- Método ReCiPe – www.lcia-recipe.net/ - aceso a 12-08-2011.
-

-
- Sander, K., & Murthy, G. S. (2010). Life cycle analysis of algae biodiesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 704-714. doi: 10.1007/s11367-010-0194-1.
- Santos, F. A. 2006. Biocombustíveis: prós e contras. <http://home.utad.pt/~fsantos/pub-fas/Biocombustiveis.pdf> - acessado 19-07-2011.
- Scott, S. a, Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., et al. (2010). Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current opinion in biotechnology*, 21(3), 277-86. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.copbio.2010.03.005.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., et al. (2004). Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, 30(5), 701-20. doi: 10.1016/j.envint.2003.11.005.
- Requena, J. F.S., Guimaraes, a C., Quirós Alpera, S., Relea Gangas, E., Hernandez-Navarro, S., Navas Gracia, L. M., et al. (2010). Life Cycle Assessment (LCA) of the biofuel production process from sunflower oil, rapeseed oil and soybean oil. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 190-199. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.fuproc.2010.03.004.
- Rodrigues, D. A. (2010). Aplicação de uma Metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida a Culturas Agrícolas em Portugal Continental Miguel Ângelo. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico.
- Sander, K., & Murthy, G. S. (2010). Life cycle analysis of algae biodiesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7), 704-714. doi: 10.1007/s11367-010-0194-1.
- Stephenson, A. L., Kazamia, E., Dennis, J. S., Howe, C. J., Scott, S. a, & Smith, A. G. (2010). Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. *Energy & Fuels*, 24(7), 4062-4077. doi: 10.1021/ef1003123.
- Toureiro, C. M., Serralheiro, R. P., & Oliveira, M. R. (2005). Resposta das culturas do girassol e do milho a diferentes cenários de rega deficitária. *Revista de ciência agrárias*, 35-47.
- Tsoutsos, T., Kouloumpis, V., Zafiridis, T., & Foteinis, S. (2010). Life Cycle Assessment for biodiesel production under Greek climate conditions. *Journal of Cleaner Production*, 18(4), 328-335. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2009.11.002.
- Viana, M. M. (2008). Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol.
- van der Voet, E., Lifset, R. J., Luo, L., 2010. Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence. *Biofuels* (2010), 1(3), 435-449. Future Science Ltd. Future science group.
- Yang, J., Xu, M., Zhang, X., Hu, Q., Sommerfeld, M., & Chen, Y. (2011). Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. *Bioresource Technology*, 102(1), 159-165. Elsevier Ltd. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096085241001205>.

7. APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTES AMBIENTAIS RECIPE

Tabela 32 – Impactes ambientais associados a 1 kg de biodiesel de girassol, através do modelo ReCiPe.

| Categories de impacte ambiental | Cenários | Transesterificação | Extracção | Cultivo | Total |
|---|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Depleção abiótica kg Sb _{eq} | Reg_A.En | 3,126x10 ⁻³ | 1,092x10 ⁻³ | 5,926x10 ⁻³ | 1,015x10 ⁻² |
| | Reg_A.M | 2,956x10 ⁻³ | 6,874x10 ⁻⁴ | 3,727x10 ⁻³ | 7,371x10 ⁻³ |
| | S.A_Reg | 3,269x10 ⁻³ | 1,748x10 ⁻³ | 9,479x10 ⁻³ | 1,449x10 ⁻² |
| | Seq_A.En | 3,126x10 ⁻³ | 1,093x10 ⁻³ | 7,788x10 ⁻³ | 1,200x10 ⁻² |
| | Seq_A.M | 2,956x10 ⁻³ | 6,874x10 ⁻⁴ | 4,898x10 ⁻³ | 8,541x10 ⁻³ |
| | Seq_S.A | 3,269x10 ⁻³ | 1,748x10 ⁻³ | 1,246x10 ⁻² | 1,747x10 ⁻² |
| Acidificação kg SO ₂ _{eq} | Reg_A.En | 7,256x10 ⁻⁴ | 4,999x10 ⁻⁴ | 6,699x10 ⁻³ | 7,925x10 ⁻³ |
| | Reg_A.M | 6,861x10 ⁻⁴ | 3,145x10 ⁻⁴ | 4,214x10 ⁻³ | 5,214x10 ⁻³ |
| | S.A_Reg | 7,592x10 ⁻⁴ | 7,997x10 ⁻⁴ | 1,072x10 ⁻² | 1,228x10 ⁻² |
| | Seq_A.En | 7,256x10 ⁻⁴ | 4,999x10 ⁻⁴ | 5,990x10 ⁻³ | 7,216x10 ⁻³ |
| | Seq_A.M | 6,861x10 ⁻⁴ | 3,145x10 ⁻⁴ | 3,768x10 ⁻³ | 4,768x10 ⁻³ |
| | Seq_S.A | 7,592x10 ⁻⁴ | 7,997x10 ⁻⁴ | 9,581x10 ⁻³ | 1,114x10 ⁻² |
| Eutrofização kg PO ₄ _{eq} | Reg_A.En | 1,371x10 ⁻⁴ | 4,075x10 ⁻⁵ | 2,822x10 ⁻³ | 3x10 ⁻³ |
| | Reg_A.M | 1,296x10 ⁻⁴ | 2,563x10 ⁻⁵ | 1,775x10 ⁻³ | 1,93x10 ⁻³ |
| | S.A_Reg | 1,435x10 ⁻⁴ | 6,517x10 ⁻⁵ | 4,514x10 ⁻³ | 4,723x10 ⁻³ |
| | Seq_A.En | 1,371x10 ⁻⁴ | 4,075x10 ⁻⁵ | 1,277x10 ⁻³ | 1,455x10 ⁻³ |
| | Seq_A.M | 1,296x10 ⁻⁴ | 2,563x10 ⁻⁵ | 8,032x10 ⁻⁴ | 9,59x10 ⁻⁴ |
| | Seq_S.A | 1,435x10 ⁻⁴ | 6,517x10 ⁻⁵ | 2,043x10 ⁻³ | 2,251x10 ⁻³ |
| Aquecimento global kg CO ₂ _{eq} | Reg_A.En | 2,127x10 ⁻¹ | 1,285x10 ⁻¹ | 9,669x10 ⁻¹ | 1,308016 |
| | Reg_A.M | 2,011x10 ⁻¹ | 8,082x10 ⁻² | 6,081x10 ⁻¹ | 0,89001 |
| | S.A_Reg | 2,225x10 ⁻¹ | 2,055x10 ⁻¹ | 1,546 | 1,974411 |
| | Seq_A.En | 2,127x10 ⁻¹ | 1,285x10 ⁻¹ | 1,307 | 1,647848 |
| | Seq_A.M | 2,011x10 ⁻¹ | 8,082x10 ⁻² | 8,218x10 ⁻¹ | 1,103746 |
| | Seq_S.A | 2,225x10 ⁻¹ | 2,055x10 ⁻¹ | 2,089 | 2,517947 |
| Depleção camada ozono kg CFC ⁻¹¹ _{eq} | Reg_A.En | 2,849x10 ⁻⁸ | 1,435x10 ⁻⁸ | 1,115x10 ⁻⁷ | 1,54x10 ⁻⁷ |
| | Reg_A.M | 2,694x10 ⁻⁸ | 9,023x10 ⁻⁹ | 7,010x10 ⁻⁸ | 1,06x10 ⁻⁷ |
| | S.A_Reg | 2,980x10 ⁻⁸ | 2,295x10 ⁻⁸ | 1,783x10 ⁻⁷ | 2,31x10 ⁻⁷ |
| | Seq_A.En | 2,849x10 ⁻⁸ | 1,435x10 ⁻⁸ | 1,655x10 ⁻⁷ | 2,08x10 ⁻⁷ |
| | Seq_A.M | 2,694x10 ⁻⁸ | 9,023x10 ⁻⁹ | 1,041x10 ⁻⁷ | 1,4x10 ⁻⁷ |
| | Seq_S.A | 2,980x10 ⁻⁸ | 2,295x10 ⁻⁸ | 2,647x10 ⁻⁷ | 3,17x10 ⁻⁷ |

Tabela 33 - Impactes ambientais associados a 1 kg de biodiesel de microalgas, cenário CapCO₂, através do método ReCiPe.

| Categorias de impacte ambiental | Cenários | Transesterificação | Extracção | Cultivo | Total |
|--|--------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Depleção abiótica kg Sb _{eq} | CapCO ₂ _A.En | 3,123x10 ⁻³ | 1,346x10 ⁻³ | 3,723x10 ⁻³ | 8,192x10 ⁻³ |
| | CapCO ₂ _A.M | 2,953x10 ⁻³ | 6,874x10 ⁻⁴ | 1,901x10 ⁻³ | 5,541x10 ⁻³ |
| | CapCO ₂ _S.A | 3,267x10 ⁻³ | 3,042x10 ⁻³ | 8,412x10 ⁻³ | 1,472x10 ⁻² |
| Acidificação kg SO ₂ eq | CapCO ₂ _A.En | 7,123x10 ⁻⁴ | 6,159x10 ⁻⁴ | 3,537x10 ⁻³ | 4,865x10 ⁻³ |
| | CapCO ₂ _A.M | 6,753x10 ⁻⁴ | 3,145x10 ⁻⁴ | 1,806x10 ⁻³ | 2,794x10 ⁻³ |
| | CapCO ₂ _S.A | 7,454x10 ⁻⁴ | 1,391x10 ⁻³ | 7,989x10 ⁻³ | 1,013x10 ⁻² |
| Eutrofização kg PO ₄ eq | CapCO ₂ _A.En | 1,307x10 ⁻³ | 5,019x10 ⁻⁵ | 3,655x10 ⁻⁴ | 5,46x10 ⁻⁴ |
| | CapCO ₂ _A.M | 1,236x10 ⁻³ | 2,563x10 ⁻⁵ | 1,866x10 ⁻⁴ | 3,36x10 ⁻⁴ |
| | CapCO ₂ _S.A | 1,368x10 ⁻³ | 1,134x10 ⁻⁴ | 8,258x10 ⁻⁴ | 1,076x10 ⁻³ |
| Aquecimento global kg CO ₂ eq | CapCO ₂ _A.En | 2,122x10 ⁻¹ | 1,583x10 ⁻¹ | -2,720 | -2,349 |
| | CapCO ₂ _A.M | 2,006x10 ⁻¹ | 8,082x10 ⁻² | -1,389 | -1,108 |
| | CapCO ₂ _S.A | 2,219x10 ⁻¹ | 3,576x10 ⁻¹ | -6,146 | -5,566 |
| Depleção camada ozono kg CFC ⁻¹¹ eq | CapCO ₂ _A.En | 2,845x10 ⁻⁸ | 1,767x10 ⁻⁸ | 4,700x10 ⁻⁸ | 9,31x10 ⁻⁸ |
| | CapCO ₂ _A.M | 2,689x10 ⁻⁸ | 9,023x10 ⁻⁹ | 2,399x10 ⁻⁸ | 5,99x10 ⁻⁸ |
| | CapCO ₂ _S.A | 2,976x10 ⁻⁸ | 3,993x10 ⁻⁸ | 1,062x10 ⁻⁷ | 1,76x10 ⁻⁷ |

Tabela 34 - Impactes ambientais associados a 1 kg de biodiesel de microalgas, cenário SCapCO₂, através do modelo ReCiPe.

| Categorias de impacte ambiental | Cenários | Transesterificação | Extracção | Cultivo | Total |
|--|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Depleção abiótica kg Sb _{eq} | SCapCO ₂ _A.En | 3,123x10 ⁻³ | 1,346x10 ⁻³ | 6,625x10 ⁻³ | 1,109x10 ⁻² |
| | SCapCO ₂ _A.M | 2,957x10 ⁻³ | 6,874x10 ⁻⁴ | 3,382x10 ⁻³ | 7,027x10 ⁻³ |
| | SCapCO ₂ _S.A | 3,267x10 ⁻³ | 3,041x10 ⁻³ | 1,497x10 ⁻² | 2,128x10 ⁻² |
| Acidificação kg SO ₂ eq | SCapCO ₂ _A.En | 7,123x10 ⁻⁴ | 6,159x10 ⁻⁴ | 6,423x10 ⁻³ | 7,751x10 ⁻³ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 6,811x10 ⁻⁴ | 3,145x10 ⁻⁴ | 3,279x10 ⁻³ | 4,285x10 ⁻³ |
| | SCapCO ₂ _S.A | 7,454x10 ⁻⁴ | 1,391x10 ⁻³ | 1,451x10 ⁻² | 1,665x10 ⁻² |
| Eutrofização kg PO ₄ eq | SCapCO ₂ _A.En | 1,307x10 ⁻⁴ | 5,01922E-05 | 5,889x10 ⁻⁴ | 7,7x10 ⁻⁴ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 1,231x10 ⁻⁴ | 2,56275E-05 | 3,007x10 ⁻⁴ | 4,58x10 ⁻⁴ |
| | SCapCO ₂ _S.A | 1,368x10 ⁻⁴ | 1,134x10 ⁻⁴ | 1,330x10 ⁻³ | 1,581x10 ⁻³ |
| Aquecimento global kg CO ₂ eq | SCapCO ₂ _A.En | 2,122x10 ⁻¹ | 1,583x10 ⁻¹ | 1,055 | 1,426 |
| | SCapCO ₂ _A.M | 2,013x10 ⁻¹ | 8,082x10 ⁻² | 5,389x10 ⁻¹ | 8,210x10 ⁻¹ |
| | SCapCO ₂ _S.A | 2,219x10 ⁻¹ | 3,576x10 ⁻¹ | 2,385 | 2,964 |
| Depleção camada ozono kg CFC ⁻¹¹ eq | SCapCO ₂ _A.En | 2,844x10 ⁻⁸ | 1,767x10 ⁻⁸ | 7,455x10 ⁻⁸ | 1,21x10 ⁻⁷ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 2,696x10 ⁻⁸ | 9,023x10 ⁻⁹ | 3,806x10 ⁻⁸ | 7,4x10 ⁻⁸ |
| | SCapCO ₂ _S.A | 2,976x10 ⁻⁸ | 3,993x10 ⁻⁸ | 1,684x10 ⁻⁷ | 2,38x10 ⁻⁷ |

8. APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTES AMBIENTAIS CML

Tabela 35 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de girassol para os cenários considerados, método CML.

| Categorias de impacte ambiental | Cenários | Transesterificação | Extracção | Cultivo | Total |
|---|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Alterações climáticas kg CO ₂ eq | Reg_A.En | 2,139x10 ⁻¹ | 1,289x10 ⁻¹ | 9,681x10 ⁻¹ | 1,3110 |
| | Reg_A.M | 2,023x10 ⁻¹ | 8,110x10 ⁻² | 6,089x10 ⁻¹ | 0,8923 |
| | Seq_A.En | 2,139x10 ⁻¹ | 1,289x10 ⁻¹ | 1,3068 | 1,6497 |
| | Seq_A.M | 2,024x10 ⁻¹ | 8,110x10 ⁻² | 8,219x10 ⁻¹ | 1,1053 |
| Acidificação terrestre kg SO ₂ eq | Reg_A.En | 6,5x10 ⁻⁴ | 4,5x10 ⁻⁴ | 6,90x10 ⁻³ | 8,00x10 ⁻³ |
| | Reg_A.M | 6,2x10 ⁻⁴ | 2,8x10 ⁻⁴ | 4,34x10 ⁻³ | 5,24x10 ⁻³ |
| | Seq_A.En | 6,5x10 ⁻⁴ | 4,5x10 ⁻⁴ | 6,27x10 ⁻³ | 7,37x10 ⁻³ |
| | Seq_A.M | 6,2x10 ⁻⁴ | 2,8x10 ⁻⁴ | 3,94x10 ⁻³ | 4,84x10 ⁻³ |
| Eutrofização de água doce kg P eq | Reg_A.En | 3x10 ⁻⁵ | 3,1x10 ⁻⁵ | 5,7x10 ⁻⁴ | 6,3x10 ⁻⁴ |
| | Reg_A.M | 3x10 ⁻⁵ | 3x10 ⁻⁶ | 3,6x10 ⁻⁴ | 3,9x10 ⁻⁴ |
| | Seq_A.En | 3,1x10 ⁻⁵ | 4x10 ⁻⁶ | 1x10 ⁻⁵ | 5x10 ⁻⁵ |
| | Seq_A.M | 3x10 ⁻⁵ | 3x10 ⁻⁶ | 1x10 ⁻⁵ | 4x10 ⁻⁵ |
| Eutrofização marinha kg N eq | Reg_A.En | 1,2x10 ⁻⁴ | 7x10 ⁻⁵ | 2,26x10 ⁻³ | 2,45x10 ⁻³ |
| | Reg_A.M | 1,1x10 ⁻⁴ | 5x10 ⁻⁵ | 1,42x10 ⁻³ | 1,58x10 ⁻³ |
| | Seq_A.En | 1,2x10 ⁻⁴ | 7x10 ⁻⁵ | 3,38x10 ⁻³ | 3,57x10 ⁻³ |
| | Seq_A.M | 1,1x10 ⁻⁴ | 5x10 ⁻⁵ | 2,13x10 ⁻³ | 2,28x10 ⁻³ |
| Depleção fóssil kg oil eq | Reg_A.En | 1,492x10 ⁻¹ | 5,106x10 ⁻² | 2,975x10 ⁻¹ | 4,978x10 ⁻¹ |
| | Reg_A.M | 1,411x10 ⁻¹ | 3,212x10 ⁻² | 1,871x10 ⁻¹ | 3,603x10 ⁻¹ |
| | Seq_A.En | 1,492x10 ⁻¹ | 5,106x10 ⁻² | 4,022x10 ⁻¹ | 6,024x10 ⁻¹ |
| | Seq_A.M | 1,411x10 ⁻¹ | 3,212x10 ⁻² | 2,529x10 ⁻¹ | 4,262x10 ⁻¹ |

Tabela 36 - Avaliação ambiental da produção de 1 kg de biodiesel de microalgas para os cenários considerados, método CML.

| Categorias de impacte ambiental | Cenários | Transesterificação | Extracção | Cultivo | Total |
|--|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Alterações climáticas kg CO₂ eq | CapCO ₂ _A.En | 2,135x10 ⁻¹ | 1,588x10 ⁻¹ | -2,719 | -2,347 |
| | CapCO ₂ _A.M | 2,019x10 ⁻¹ | 8,110x10 ⁻² | -1,388 | -1,105 |
| | SCapCO ₂ _A.En | 2,135x10 ⁻¹ | 1,588x10 ⁻¹ | 1,058 | 1,430 |
| | SCapCO ₂ _A.M | 2,025x10 ⁻¹ | 8,110x10 ⁻² | 5,401x10 ⁻¹ | 8,237x10 ⁻¹ |
| Acidificação terrestre kg SO₂ eq | CapCO ₂ _A.En | 6,408x10 ⁻⁴ | 5,53x10 ⁻⁴ | 3,384x10 ⁻³ | 4,578x10 ⁻³ |
| | CapCO ₂ _A.M | 6,105x10 ⁻⁴ | 2,82x10 ⁻⁴ | 1,728x10 ⁻³ | 2,616x10 ⁻³ |
| | SCapCO ₂ _A.En | 6,408x10 ⁻⁴ | 5,53x10 ⁻⁴ | 6,08x10 ⁻³ | 7,274x10 ⁻³ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 6,209x10 ⁻⁴ | 2,82x10 ⁻⁴ | 3,105x10 ⁻³ | 4,008x10 ⁻³ |
| Eutrofização de água doce kg P_{eq} | CapCO ₂ _A.En | 2,856x10 ⁻⁵ | 4,95x10 ⁻⁶ | 1,01x10 ⁻⁵ | 4,364x10 ⁻⁵ |
| | CapCO ₂ _A.M | 2,700x10 ⁻⁵ | 2,53x10 ⁻⁶ | 5,17x10 ⁻⁶ | 3,470x10 ⁻⁵ |
| | SCapCO ₂ _A.En | 2,856x10 ⁻⁵ | 4,95x10 ⁻⁶ | 1,96x10 ⁻⁵ | 5,311x10 ⁻⁵ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 2,973x10 ⁻⁵ | 2,53x10 ⁻⁶ | 1x10 ⁻⁵ | 4,227x10 ⁻⁵ |
| Eutrofização marinha kg N_{eq} | CapCO ₂ _A.En | 1,162x10 ⁻⁴ | 9,16x10 ⁻⁵ | 8,21x10 ⁻⁴ | 1,029x10 ⁻³ |
| | CapCO ₂ _A.M | 1,099x10 ⁻⁴ | 4,68x10 ⁻⁵ | 4,19x10 ⁻⁴ | 5,759x10 ⁻⁴ |
| | SCapCO ₂ _A.En | 1,162x10 ⁻⁴ | 9,16x10 ⁻⁵ | 1,245x10 ⁻³ | 1,453x10 ⁻³ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 1,106x10 ⁻⁴ | 4,68x10 ⁻⁵ | 6,36x10 ⁻⁴ | 7,932x10 ⁻⁵ |
| Depleção fóssil kg oil_{eq} | CapCO ₂ _A.En | 1,491x10 ⁻¹ | 6,289x10 ⁻² | 1,718x10 ⁻¹ | 3,838x10 ⁻¹ |
| | CapCO ₂ _A.M | 1,409x10 ⁻¹ | 3,212x10 ⁻² | 8,773x10 ⁻² | 2,608x10 ⁻¹ |
| | SCapCO ₂ _A.En | 1,491x10 ⁻¹ | 6,289x10 ⁻² | 3,007x10 ⁻¹ | 5,126x10 ⁻¹ |
| | SCapCO ₂ _A.M | 1,411x10 ⁻¹ | 3,212x10 ⁻² | 1,535x10 ⁻¹ | 3,268x10 ⁻¹ |

9. APÊNDICE C – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO METODO RECIPE

Nas figuras 19, 20, 21 e 22 encontram-se os resultados da avaliação ambiental para todas as categorias de impacte definidas pelo método ReCiPe (midpoint), perspectiva hierárquica, em que as siglas para as categorias representam: CC – *Climate change*, OD – *Ozone depletion*, HT – *Human toxicity*, POF - *Photochemical oxidant formation*, PMF - *Particulate matter formation*, IR - *Ionising radiation*, TA - *Terrestrial acidification*, FE, *Freshwater eutrophication*, ME - *Marine eutrophication*, TE - *Terrestrial ecotoxicity*, FE - *Freshwater ecotoxicity*, ME - *Marine ecotoxicity*, ALO - *Agricultural land occupation*, ULO - *Urban land occupation*, NLT - *Natural land transformation*, WD - *Water depletion*, MD - *Metal depletion*, FD - *Fossil depletion*.

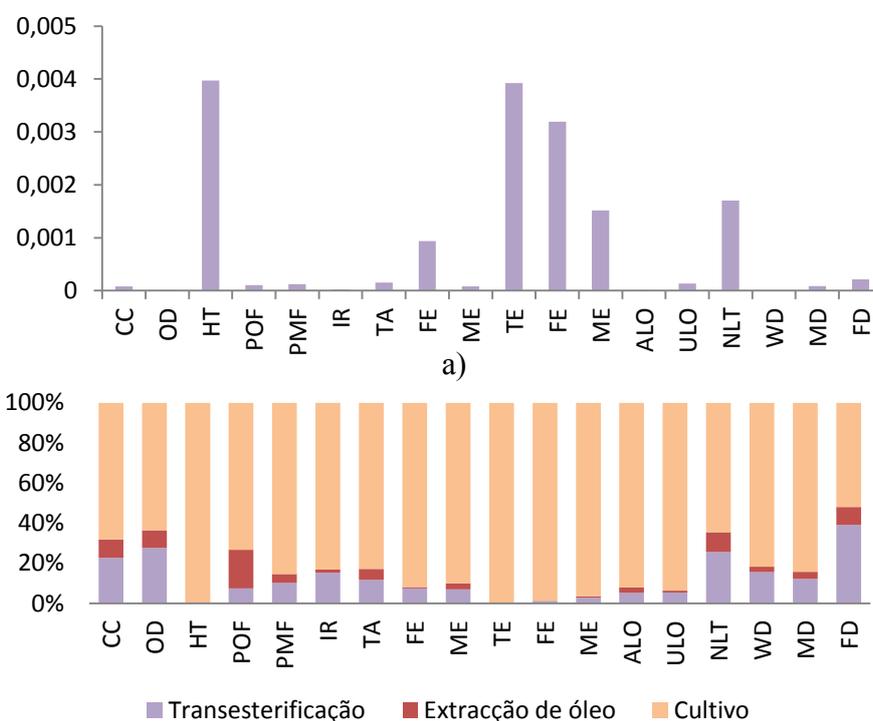


Figura 16 – a) Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em regadio, normalização. ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em regadio, ReCiPe.

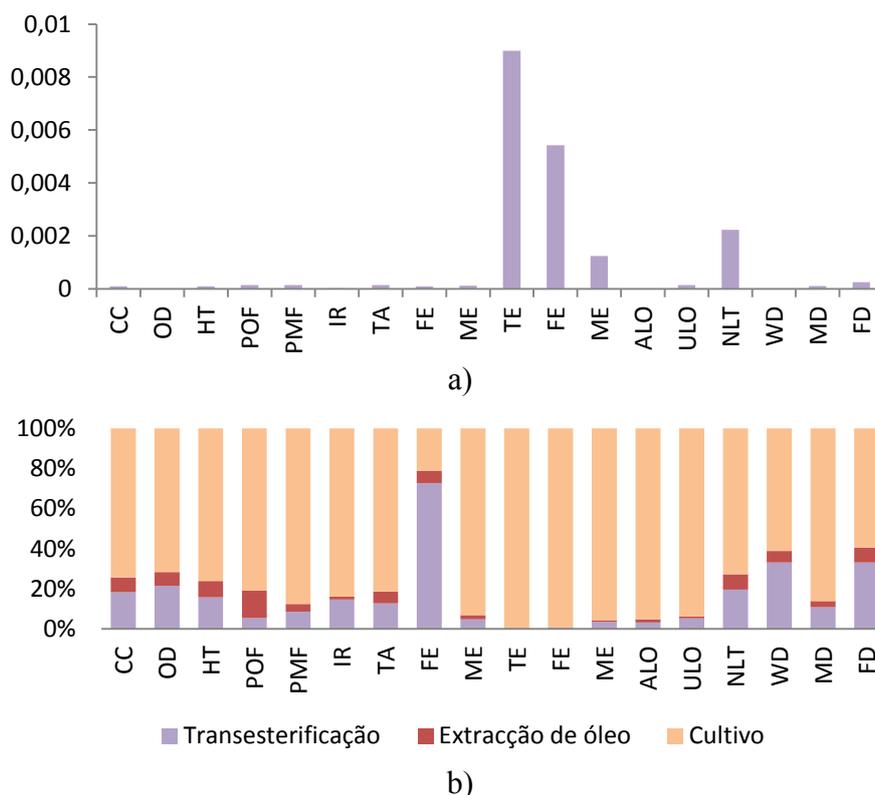


Figura 17 - Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em sequeiro, normalização. ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em sequeiro, ReCiPe.

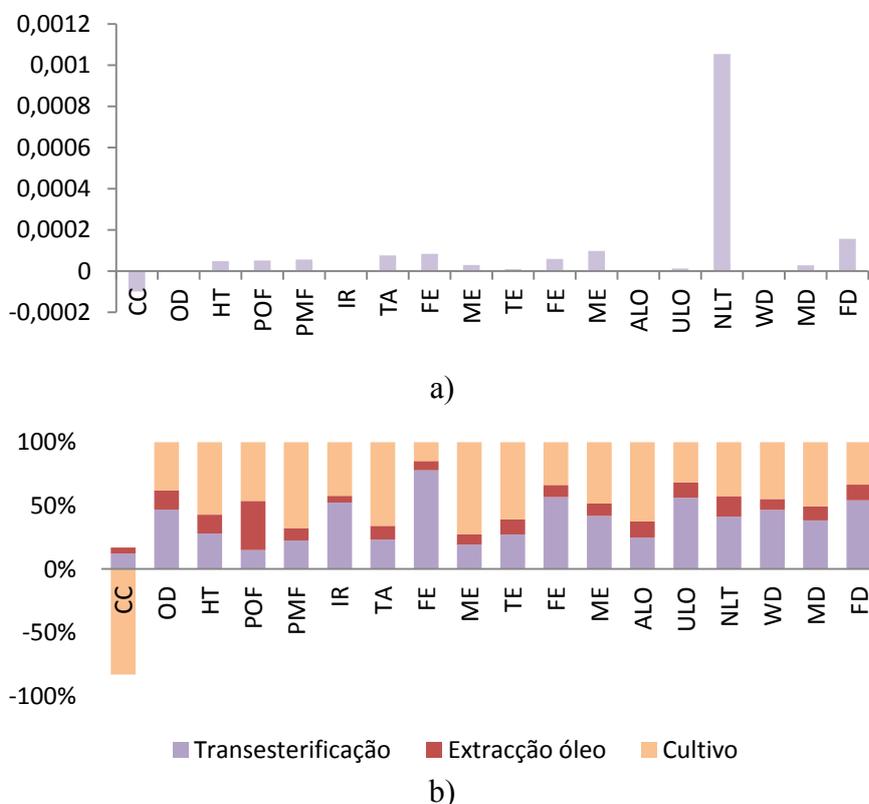


Figura 18 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas CapCO₂, normalização, ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas CapCO₂, ReCiPe.

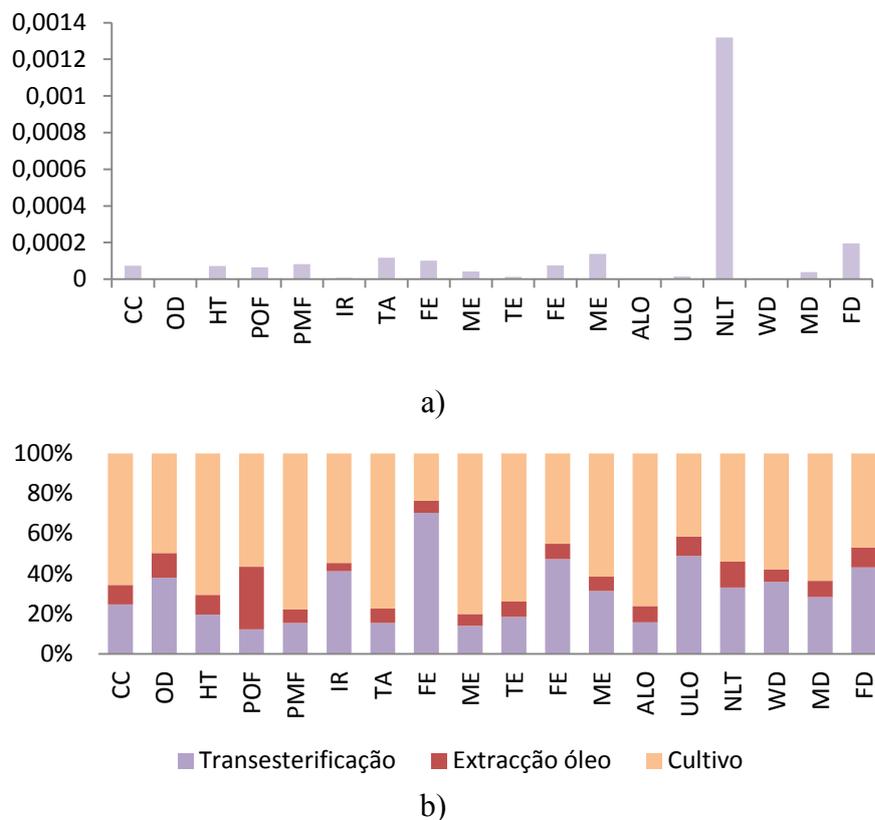
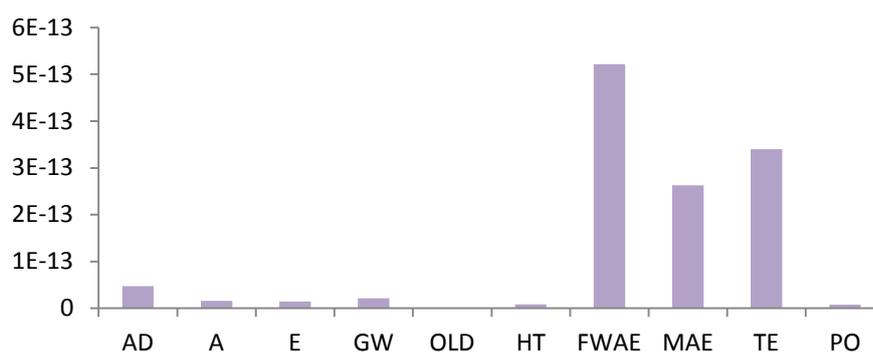


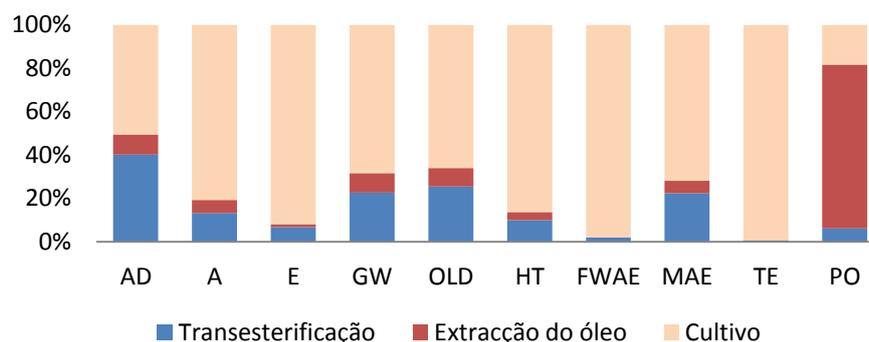
Figura 19 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas SCapCO₂, normalização, ReCiPe. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas SCapCO₂, ReCiPe.

10. APÊNDICE D – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO METODO CML

Nas figuras 23, 24, 25 e 26 encontram-se os resultados da avaliação ambiental para todas as categorias de impacte definidas pelo método CML em que as siglas para as categorias representam: AD - *Abiotic depletion*, A - *Acidification*, E - *Eutrophication*, GW - *Global warming*, OLD - *Ozone layer depletion*, HT - *Human toxicity*, FWAE - *Fresh water aquatic ecotoxicity*, MAE - *Marine aquatic ecotoxicity*, TE - *Terrestrial ecotoxicity*, PO - *Photochemical oxidation*.



a)



b)

Figura 20 - a) Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em regadio, normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em regadio, CML.

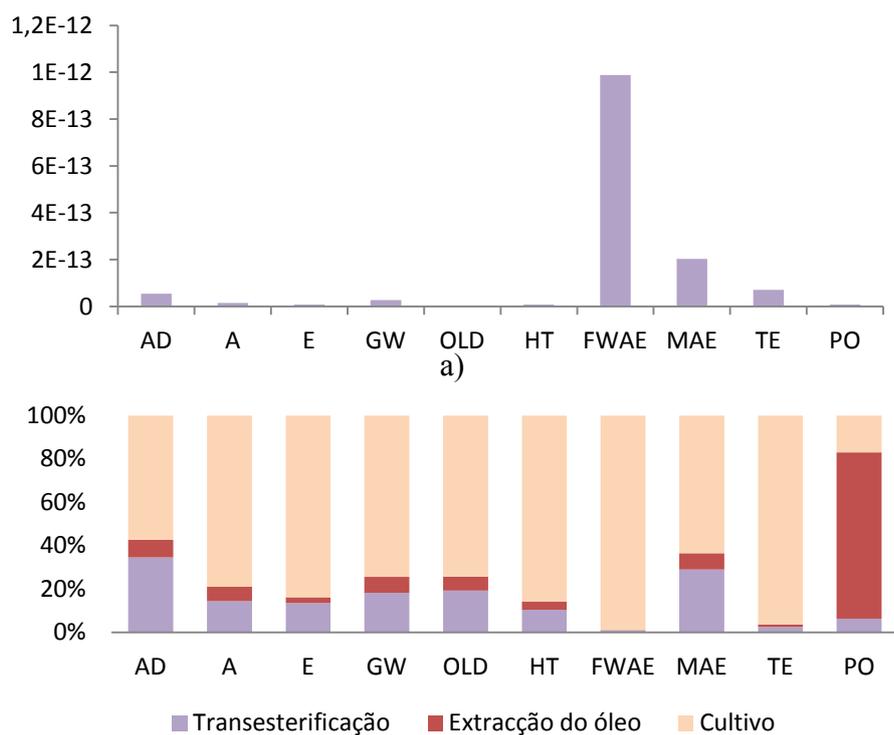


Figura 21 - Avaliação ambiental de 1 kg de biodiesel de girassol em sequeiro, normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1 kg biodiesel em sequeiro, CML.

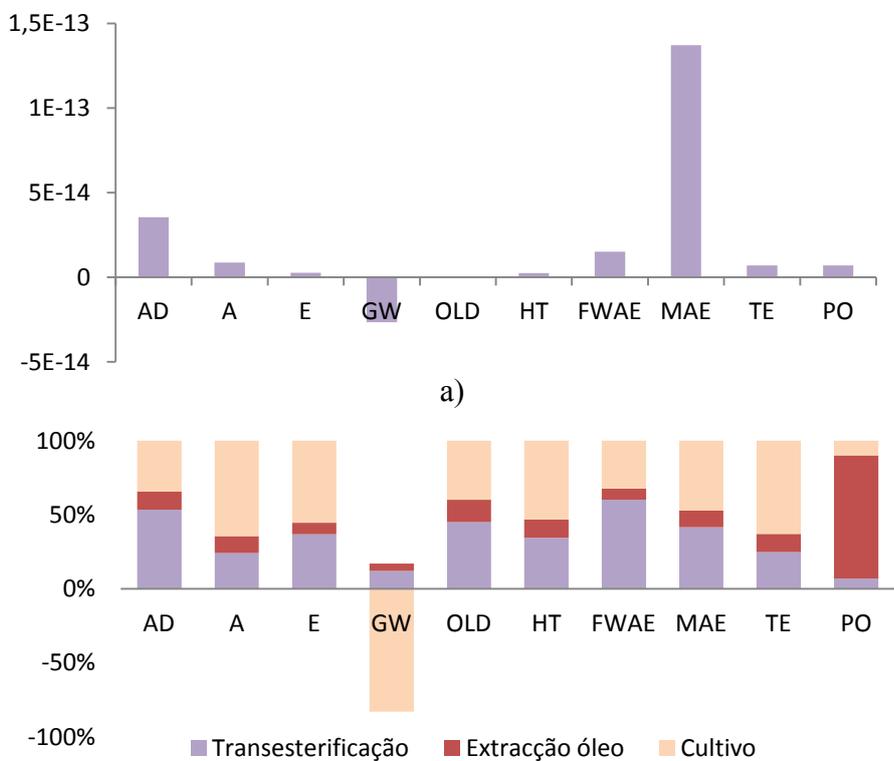


Figura 22 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas CapCO₂, normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas CapCO₂, CML.

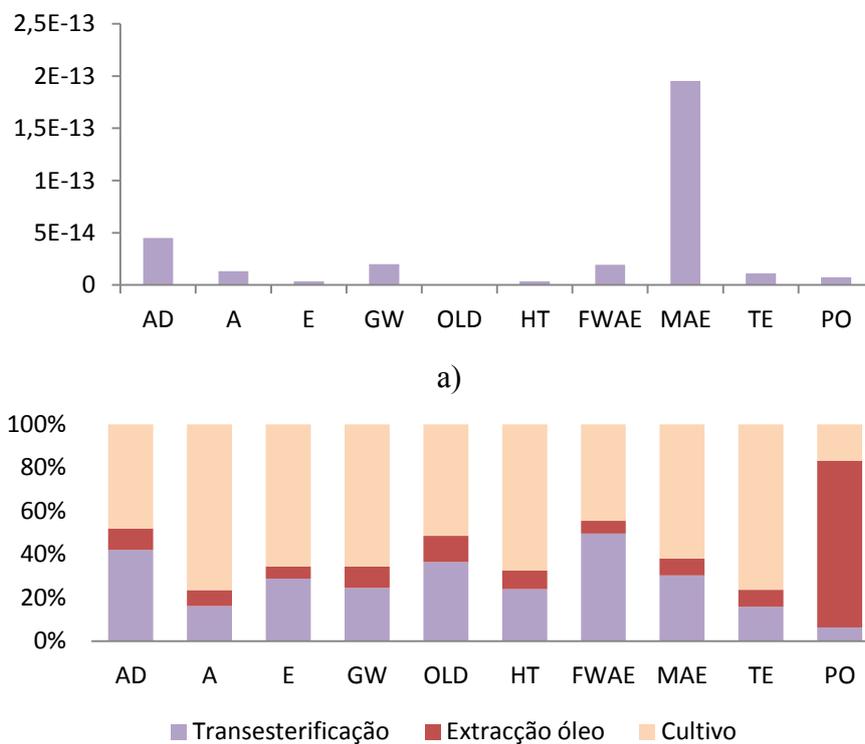


Figura 23 - a) Avaliação ambiental de 1kg de biodiesel de microalgas SCapCO₂, normalização, CML. b) Contribuição das fases de CV para os impactes ambientais de 1kg biodiesel de microalgas SCapCO₂, CML.

11. ANEXO A – DESCRIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTE AMBIENTAL AVALIADAS

Tabela 37 – Descrição das categorias ambientais referidas na dissertação para o modelo CML.

| CML | | | |
|---------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------|
| Categoria de impacto ambiental | Descrição | Unidade | Fonte |
| Depleção dos recursos abióticos | É determinado para cada extracção de minerais e de combustíveis fósseis baseado nas suas reservas e taxa de desaccumulação | kg Sb _{eq} | Goedkoup <i>et al.</i> , 2010 |
| Aquecimento global | Este indicador está associado às emissões dos gases de efeito de estufa. Os factores de caracterização são expressos em Potencial de Aquecimento Global para uma escala temporal de 100 anos. | kg CO ₂ _{eq} | |
| Acidificação | Os poluentes acidificantes têm uma grande variedade de impactes no solo, água subterrânea, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais. | kg SO ₂ _{eq} | |
| Depleção da camada do ozono | Devido à destruição do ozono estratosférico, a maior fracção da radiação UV-B atinge a superfície terrestre. Isto pode ter efeitos nocivos sobre a saúde humana, saúde animal, ecossistemas terrestres e aquáticos, ciclos bioquímicos e em materiais. Esta categoria está relacionada a uma escala global. O modelo de caracterização é desenvolvido pela World Meteorological Organisation (WMO) e define o potencial de Depleção do Ozono para gases diferentes. | kg CFC ⁻¹¹ _{eq} | |
| Eutrofização | Inclui todos os impactes provenientes dos níveis excessivos de macro nutrientes no ambiente causados pelas emissões de nutrientes para o ar, água e solo. | kg PO ₄ _{eq} | |

Tabela 38 - Descrição das categorias ambientais referidas na dissertação para o modelo ReCiPe.

| ReCiPe | | | |
|--------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------|
| Categoria de impacto ambiental | Descrição | Unidade | Fonte |
| Depleção do ozono | O factor de caracterização para a depleção da camada do ozono tem em conta a destruição da camada de ozono estratosférico pelas emissões antropogénicas de substâncias destruidoras do ozono. | kg CFC ⁻¹¹ _{eq} | Goedkoup <i>et al.</i> , 2010 |
| Alterações climáticas | O factor de caracterização da mudança climática é o potencial de aquecimento global. | kg CO ₂ _{eq} | |
| Eutrofização marinha | O factor de caracterização da eutrofização marinha representa a persistência ambiental (destino) da emissão de nutrientes contendo N. | kg N _{eq} | |
| Eutrofização água doce | O factor de caracterização da eutrofização água doce representa a persistência ambiental (destino) da emissão de nutrientes contendo P. | kg P _{eq} | |
| Depleção fóssil | O factor de caracterização de depleção fóssil é a quantidade de combustível fóssil extraído com base no poder calorífico superior. | kg oil _{eq} | |
| Acidificação terrestre | Sem descrição no relatório. | kg SO ₂ _{eq} | |