



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2012

**Tiago Manuel
Simões Andrade**

**Comparação de metodologias para análise de
ciclo de vida de biodiesel**



**Tiago Manuel
Simões Andrade**

**Comparação de metodologias para análise de
ciclo de vida de biodiesel**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor António Carlos Mendes de Sousa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri

Presidente

Professor Doutor António Manuel Godinho Completo
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Orientador

Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho
Professora auxiliar convidada da Universidade de Aveiro

Co-orientador

Professor Doutor António Carlos Mendes de Sousa
Professor catedrático da Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica

Arguente

Professor Doutor Luís Manuel Guerreiro Alves Arroja
Professor associado da Universidade de Aveiro

Palavras-chave

Avaliação de Ciclo de Vida, biodiesel, microalgas, energia consumida, emissões de CO₂.

Resumo

A escassez do petróleo tem sido um fator impulsionador ao desenvolvimento dos combustíveis alternativos. O ponto comum aos biocombustíveis é derivarem do óleo de plantas, o que requer espaço para a cultura, sendo que estas competem com a agricultura com fim alimentar. As microalgas são uma fonte de biodiesel que não compete com a alimentação do ser humano, pois não está na sua cadeia alimentar, como as outras fontes de biocombustível, tais como a soja, a palma ou o girassol.

Atualmente o entrave colocado à produção de biodiesel de microalgas é a viabilidade do processo. Nesse sentido, a presente dissertação tem como objetivo fazer uma análise de sensibilidade ao ciclo de vida do biodiesel de microalgas, de modo a identificar os parâmetros que devem ser alterados de modo a tornar a sua produção mais viável. O estudo encontra-se inserido no projeto «EnerBioAlgae: *Aprovechamiento energético de biomasa en recursos hídricos degradados ricos en microalgas*» financiado pela União Europeia (Programa de Cooperação Territorial do Sudoeste Europeu – SUDOE). Também foi possível usufruir dos dados obtidos na extração piloto de óleo de microalgas decorrida na Universidade de Aveiro, departamento de Engenharia Mecânica.

A análise feita, “do poço-à-roda”, permitiu concluir que com os recursos atualmente disponíveis, é possível obter-se biodiesel de microalgas, com um consumo de energia de 3093 kW.h/km e emissões de 463 g(CO₂)/km. Quanto à análise de sensibilidade verificou-se que os parâmetros onde se podem fazer maiores reduções de consumo e emissões são os mecanismos que requerem energia elétrica no seu acionamento – podendo descer as emissões até 48% e a energia até 46% – e a qualidade da alga usada, que revelou uma redução de energia e CO₂ de 48 e 38% ao usar-se uma alga com um conteúdo de óleo de 43% em vez de 27%.

Finalmente, observou-se que o biodiesel de microalgas, relativamente ao diesel, apresenta um consumo de energia superior em 30%, mas as emissões de CO₂ e de GEE são 34% e 18% inferiores, respetivamente.

Key-words

Life-cycle assessment, biodiesel, microalgae, energy consumption, CO₂ emissions.

Abstract

The scarcity of oil has been a driving factor in the development of the alternative fuels. The all biofuels come from the same substance, the vegetable oil that needs land for cultivation. The plants are also used in human's alimentation. The microalgae can produce biofuel and it does not interfere in the men's alimentation, like the other kind of plants used to produce biodiesel, like soybean, palm or sunflower.

Nowadays the restriction to the production of biodiesel from microalgae is the viability of the process. In these sense, this dissertation aims to make a sensitivity analysis to the life-cycle of the biodiesel produced by microalgae, attempting to identify which parameters should be converted in order to create a production system more viable. This thesis is part of the project «EnerBioAlgae: Aprovechamiento energético de biomasa en recursos hídricos degradados ricos en microalgas», financed by the European Union (program of territorial cooperation of the European Southeast – SUDOE). It was also possible to use the data collected in a pilot project made in the University of Aveiro, by the department of Mechanical Engineering.

The well-to-wheel analysis concluded that with the today technology, it is possible to produce biodiesel from microalgae expending 3093 kW.h/km and 463 g/km of CO₂ emissions. The sensitivity analysis told us that the parameters that can be changed in order to reduce the energy and emissions associated to the production are the ones that need electrical power, and they can reduce the amount of energy in 46% and the emissions to 48%. Also the type of algae used can be changed in order to reach the energy and emission to 48 and 38% respectively by using algae with 43% of oil instead of 27%. Comparing biodiesel of microalgae with diesel, the energy consumption was 90% higher and the CO₂ emissions were 59% bigger. However the GHG were 36% less using the biodiesel.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, a Professora Doutora Margarida Coelho e o Professor Doutor António Sousa, pela disponibilidade, acompanhamento e crítica que permitiram construir este trabalho.

À Universidade de Almeria e projeto «*EnerBioAlgae: Aprovechamiento energético de biomasa en recursos hídricos degradados ricos en microalgas*» financiado pela União Europeia (Programa de Cooperação Territorial do Sudoeste Europeu – SUDOE), no âmbito do qual a presente dissertação foi realizada.

À investigadora Smritikana Dutta pela disponibilidade e cooperação prestada durante a elaboração do estudo.

Índice de conteúdos

1. Introdução	11
1.1. Motivação.....	11
1.2. Objetivos	13
1.3. Estrutura da dissertação	14
2. Avaliação de ciclo de vida	15
2.1.1. Benefícios de um estudo ACV	16
2.1.2. Limitações de um estudo ACV.....	16
2.2. Ciclo de vida das microalgas	17
2.2.1. Método de Produção	17
2.2.2. Comparação entre microalgas e culturas convencionais	18
3. Revisão bibliográfica.....	21
4. Metodologia	27
4.1. Metodologia GREET APD (<i>Algae Process Description</i>)	33
4.1.1 Fronteira do sistema	33
4.1.2 Contagem do carbono	34
4.1.3 Unidade funcional.....	36
4.1.4 Organização do documento APD.....	38
4.1.5 Coprodutos.....	43
4.1.5.1 Coprodutos da produção de biodiesel de microalgas.....	44
4.2. Apresentação do cenário a utilizar	46
5. Resultados obtidos	53
5.1. Cenário base	53
5.2. Análise de sensibilidade	58
6. Conclusões e trabalho futuro	65
7. Referências bibliográficas.....	69

Índice de figuras

Figura 1 - Parâmetros envolvidos numa avaliação de ciclo de vida de um produto.....	15
Figura 2 - obtenção do biodiesel de microalgas, adaptado da referência.....	18
Figura 3 - Ciclo do carbono.....	35
Figura 4 - Esquema de contagem do carbono	36
Figura 5 - Esquema de produção.....	38
Figura 6 - Formação de coprodutos	45
Figura 7 – Emissões de CO obtidas nos diferentes combustíveis	54
Figura 8 - Emissões de NOx obtidas nos diferentes combustíveis	55
Figura 9 - Emissões de PM obtidas nos diferentes combustíveis.....	55
Figura 10 - Emissões de VOC obtidas nos diferentes combustíveis	56
Figura 11 - Emissões de GEE obtidas nos diferentes combustíveis.....	57
Figura 12 - Percentagem associada às diferentes componentes da energia.	58

Índice de quadros

Quadro 1 - Comparação das metodologias aplicáveis à ACV de biodiesel de microalgas	25
Quadro 2 - Principais aspetos de comparação entre o GREET, SimaPro e GEMIS.....	29
Quadro 3 - Conteúdo dos blocos do ficheiro Excel relativo aos dados de microalgas.....	40
Quadro 4 - Cenário pessimista.....	48
Quadro 5 - Cenário otimista.....	49
Quadro 6 - Dados relativos ao transporte do CO ₂	50
Quadro 7 - Dados relativos à introdução do CO ₂ na lagoa.....	51
Quadro 8 - Dados relativos aos parâmetros da lagoa.....	51
Quadro 9 - Dados relativos à extração do óleo.....	52
Quadro 10 - Dados relativos ao mix energético nacional.....	52
Quadro 11 - Dados referentes ao processo de extração	59
Quadro 12 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à mistura de biodiesel.....	60
Quadro 13 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à quantidade de óleo que constitui as microalgas	61
Quadro 14 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à produção diária de biomassa, em g/m ² /dia.....	61
Quadro 15 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à potência de movimento da água da lagoa, em W/m ³	62
Quadro 16 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à quantidade e CO ₂ introduzida na cultura, em g(CO ₂)/g(biomassa).....	63
Quadro 17 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à potência necessária à extração, em kW.h/g(óleo).....	63

Nomenclaturas

ACV – Análise de Ciclo de Vida

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

GEE – Gases de Efeito de Estufa

ISO – International Standardization Organization

NO_x – Óxidos de azoto

N₂O – Óxido nitroso

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PM – Partículas

VOC – Compostos Orgânicos Voláteis

1. Introdução

1.1. Motivação

O consumo energético e as emissões atmosféricas são desde há muito tempo uma preocupação crescente da população mundial. Sendo que uma grande fatia do consumo energético nacional está associada ao setor dos transportes (36,7% em 2010) [1], é necessário investir neste setor de modo a reduzir cada vez mais este valor. Ao longo do tempo têm-se tomado decisões que visam diminuir esta parcela do consumo energético, uma delas pode ser o recurso a combustíveis alternativos. No entanto é preciso ter em atenção o seguinte aspeto: um biocombustível pode produzir menores emissões de gases poluentes para a atmosfera, mas por outro lado, também pode implicar um maior consumo de energia durante a sua produção. Uma ferramenta que permite quantificar os recursos envolvidos e as emissões resultantes do processo de obtenção de um combustível é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do produto.

Com o aumento do consumo dos combustíveis fósseis e a consequente diminuição das reservas fósseis, o preço dos combustíveis tem aumentado constantemente, não só pelo problema físico – escassez do petróleo –, como também pelo problema político – situações como a guerra, em países com explorações petrolíferas, levam a que o preço do barril tenda a aumentar. Além do problema energético acrescem as emissões de poluentes para a atmosfera, derivadas da queima destes combustíveis. O biodiesel surge como uma forma de combater os combustíveis fósseis tanto a nível de escassez – pois o biodiesel provém de fontes renováveis – como a nível de emissões atmosféricas – visto que o biodiesel apresenta emissões, de alguns gases, inferiores às do gasóleo, tais como as emissões de CO (monóxido de carbono), PM (partículas), VOC (compostos orgânicos voláteis) e GEE (gases de efeito de estufa). No entanto as emissões de CO₂ (dióxido de carbono) e NO_x (óxidos de azoto) são superiores às do diesel. A quantidade de oxigénio consumida na queima de biodiesel é também menor que no caso do diesel. Outra vantagem do biodiesel é que a sua viabilidade no uso direto em motores convencionais foi comprovada na avaliação dos componentes do motor, não apresentando estes qualquer tipo de resíduo que comprometesse o desempenho. Não é necessário recorrer a modificações nos motores diesel para permitir que usem o biodiesel como combustível. Os bio combustíveis têm sido testados em várias partes do mundo. Países como

Argentina, Estados Unidos, Malásia, Alemanha, França e Itália já produzem biodiesel comercialmente, estimulando o desenvolvimento da escala industrial. No início dos anos 90, o processo de industrialização do biodiesel foi iniciado na Europa. Portanto, apesar de ter sido desenvolvido no Brasil, o principal mercado produtor e consumidor de biodiesel, em grande escala, é a Europa. A União Europeia produz anualmente mais de 1,35 milhões de toneladas de biodiesel, em cerca de 40 unidades de produção. Isso corresponde a 90% da produção mundial de biodiesel. A tributação dos combustíveis de petróleo na Europa, inclusive do óleo diesel mineral, é extremamente alta, garantindo a competitividade do biodiesel no mercado [2]. O governo garante incentivos fiscais aos produtores de biocombustíveis, tais como a isenção de imposto sobre os produtos petrolíferos, de acordo com a portaria n.º 353-E/2009, de 3 de Abril, que veio regulamentar o Decreto-Lei n.º 49/2009.

Sendo o petróleo uma fonte de energia não-renovável, é de elevada importância obter um produto equivalente que o possa substituir nas suas diversas aplicações. O gasóleo, que tem origem no petróleo, pode ser obtido através de matérias biológicas, passando a ser chamado de biodiesel. O elemento comum à produção deste combustível é o óleo vegetal, que é extraído de plantas e convertido em biodiesel. Mas como a origem do combustível é também usada na alimentação humana, surge um conflito entre o aproveitamento de culturas para fins de consumo humano ou para produção de energia. Para evitar este conflito foi aumentado o preço destes alimentos, tornando a produção de biodiesel a partir dos mesmos mais dispendiosa. Contudo esta solução não é bem recebida pela população, pois com esta medida o preço de alguns alimentos aumentou.

Uma alternativa que surgiu face à utilização de fontes alimentares foi a utilização de algas, a partir delas também é possível extrair óleo que será convertido em biodiesel. Dentro do setor das algas surge uma forma mais interessante, as microalgas, que não fazem parte da alimentação do ser humano. Outra grande vantagem relativamente às anteriores é a utilização de um espaço mais reduzido para o seu crescimento. Por exemplo, se se comparar a área utilizada para cultivar girassol de modo a obter uma determinada quantidade de biodiesel, com a quantidade necessária para obter o mesmo biodiesel a partir de microalgas, a diferença pode ser inferior a 6% no caso das microalgas [3]. Outro fenómeno observado é o da eutrofização dos solos por parte de algumas culturas, o que já não se verifica com as microalgas, pois a interferência destas com o solo limita-se ao uso do solo por parte das instalações necessárias ao

desenvolvimento das microalgas. Mas como a área utilizada é sempre menor, as microalgas permanecem em vantagem relativamente às outras culturas.

1.2. Objetivos

Um dos objetivos da corrente dissertação consiste na comparação de diferentes *softwares* que permitam o desenvolvimento da ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) do biodiesel de microalgas. As metodologias de cada um deverão ser capazes de avaliar o desenvolvimento da produção de microalgas e da sua conversão para biodiesel, devendo ser possível obter como principal resultado a energia consumida e as emissões decorrentes da produção do biodiesel de microalgas, tais como CO₂, CO, VOC, GEE, PM e NOx.

Um outro ponto de interesse é o de criar um cenário de produção nacional, com o intuito de analisar em que circunstâncias se torna mais viável este processo, procurando os pontos fracos, tais como a energia consumida e as matérias necessárias ao processo, que devem ser corrigidos para aumentar a viabilidade da produção de biodiesel de microalgas. A partir dos resultados obtidos na ACV do cenário de produção nacional, será feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros que influenciam a produção de biodiesel, com o intuito de averiguar qual a influência da variação de cada um dos parâmetros de entrada, com a finalidade de identificar quais os que possuem maior peso no resultado final. Após esta identificação, poderão ser tomadas novas medidas durante a produção, que atuarão nos parâmetros anteriormente identificados, podendo reduzir os desperdícios existentes no mesmo. Deste modo será possível proceder à otimização do processo.

Este trabalho está inserido no projeto «EnerBioAlgae: *Aprovechamiento energético de biomasa en recursos hídricos degradados ricos en microalgas*» financiado pela União Europeia (Programa de Cooperação Territorial do Sudoeste Europeu – SUDOE). Neste projeto estão inseridas as Universidades de Aveiro, Universidade de Almeria, Universidade de Vigo, Universidade de Pau e INEGA (Instituto Energético da Galiza). Foi na Universidade de Almeria que foram recolhidos os dados obtidos relativamente à produção das microalgas, dados estes que foram usados como base na simulação efetuada neste estudo e se encontram nos Quadros 4 e 5.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, estando alguns divididos em subcapítulos de modo a simplificar a organização da apresentação do documento e facilitando a leitura da informação contida.

No primeiro capítulo é introduzido o tema em análise, começando por ser dado a conhecer o motivo e âmbito da realização de tal estudo, e os objetivos a ele inerentes.

Passa-se então ao segundo capítulo onde é abordado o tema: Análise de Ciclo de Vida, contendo a descrição dos passos necessários ao seu desenvolvimento, e que permitirão a pesquisa dos dados a utilizar futuramente.

Segue-se a revisão bibliográfica onde são apresentados estudos de ACV já realizados no mesmo âmbito e que servem de premissa para a evolução da análise.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação da metodologia utilizada pelo *software* GREET, e é apresentado o cenário utilizado no estudo.

No capítulo cinco expõem-se os resultados obtidos e a respetiva discussão, mostrando-se quais os parâmetros que devem ser melhorados de modo a rentabilizar a produção do biodiesel de microalgas.

No seguimento da apresentação dos resultados apresentam-se as conclusões a eles adjacentes, o que pode ser observado no sexto capítulo.

2. Avaliação de ciclo de vida

A metodologia ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) tem várias aplicações, nomeadamente no desenvolvimento de produtos e rotulagem ecológica, permitindo conhecer em detalhe os materiais e a energia necessária durante o ciclo de vida de um produto, assim como as emissões resultantes do mesmo.

A avaliação de ciclo de vida leva em conta todos os processos que ocorrem no decurso da vida de um produto, desde o seu fabrico (incluindo a extração de matéria prima e transporte), utilização, manutenção até à sua deposição final. É portanto uma análise que engloba todos os fatores associados à produção de algo, ou seja, analisa o transporte de todas as matérias-primas usadas, os processos envolvidos no fabrico do produto final, os materiais, o tratamento dos resíduos resultantes, a água usada e o reaproveitamento ou reciclagem dos consumíveis e produtos obtidos durante o fabrico. Esta abordagem é normalmente designada pelo termo “do berço à cova” (“from cradle to grave”), visto apanhar todo o processo desde o início de produção até ao fim de vida do produto.

É a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactes ambientais de um sistema ou produto ao longo do seu ciclo de vida [4]. Na figura 1 é possível observar-se esquematicamente os parâmetros envolvidos na ACV.

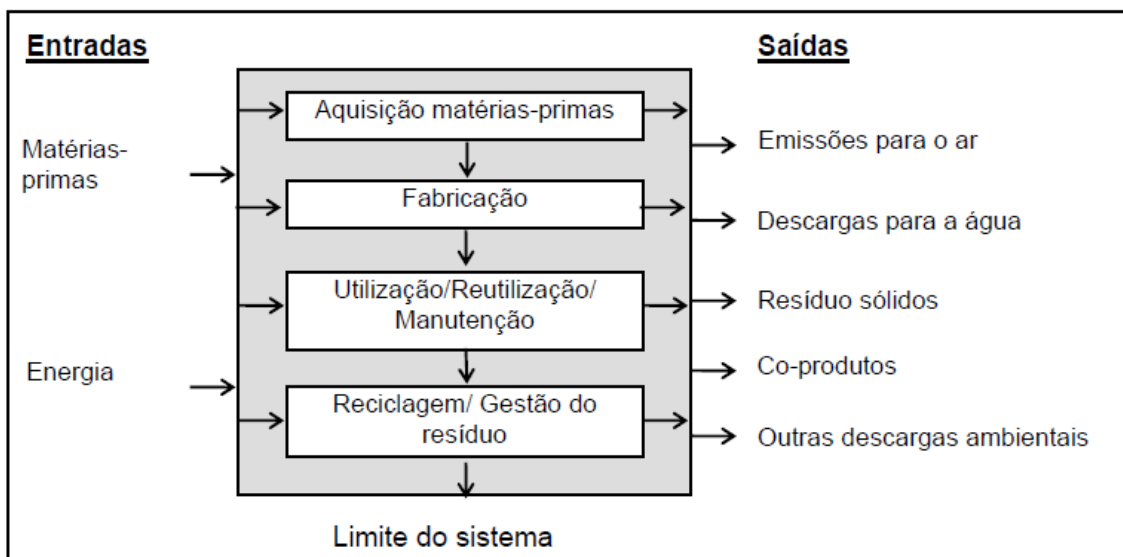


Figura 1 - Parâmetros envolvidos numa avaliação de ciclo de vida de um produto [4]

Neste tipo de análises são determinadas, ao longo de todo o ciclo de vida, todas as extrações de recursos e emissões para o ambiente, causadas na elaboração do produto, sendo estes dados usados com o objetivo de avaliar potenciais impactes nos recursos naturais, no ambiente e na saúde humana, além da energia consumida durante todo o processo. Para um melhor entendimento a metodologia de ACV, esta pode-se dividir em quatro componentes: definição de objetivos e âmbito, avaliação de inventário, avaliação de impacte, e interpretação de resultados.

Definição de objetivos e âmbito - definição e descrição do processo, atividade ou produto, estabelecendo o contexto no qual a avaliação é feita. Identificação dos limites e efeitos ambientais que são necessários à avaliação do produto.

Avaliação de inventário - quantificação da quantidade de energia, água e matérias-primas usadas, assim como emissões e descargas ocorridas durante o processo.

Avaliação de impacte - avaliação dos efeitos humanos e ecológicos da utilização das matérias identificadas no ponto anterior.

Interpretação de resultados - avalia os resultados da análise de inventário e análise de impacte para selecionar o produto preferido, processo ou serviço com uma compreensão clara das incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados [5].

2.1.1. Benefícios de um estudo ACV

O estudo ACV pode influenciar uma empresa ou organização na decisão a tomar quanto á escolha de um produto a comercializar. Com este estudo é possível fazer a escolha entre o produto que permitirá à empresa uma menor despesa, ou ter uma menor pegada ecológica durante a produção. Permite também mostrar a transferência de um impacte ambiental entre dois meios ou entre dois ciclos de vida. Este fenómeno pode ser observado quando se pretende reduzir a emissão de um poluente à custa do aumento de uma outra matéria. Pode igualmente dar-se o caso de ao comparar duas soluções concorrentes uma apresentar maior consumo de matérias-primas, mas, por outro lado, precisar de menor energia durante a produção; neste caso, só o estudo ACV permite determinar a melhor opção entre as soluções.

2.1.2. Limitações de um estudo ACV

Para um estudo ACV, é necessário recorrer a inúmeros recursos de modo a obter toda a informação necessária ao inventário de todo o ciclo de vida do produto, o que envolve um gasto considerável de tempo. Deste modo, é fundamental ter em consideração o

balanceamento entre o tempo disponível e a profundidade a que se quer abranger o estudo, pois estes dois fatores são diretamente proporcionais. O estudo ACV, só por si, não permite responder totalmente à escolha do melhor cenário para uma empresa ou serviço, tem apenas como objetivo fornecer dados que influenciem a escolha a nível ambiental. Outros dados devem ser usados na comparação, nomeadamente os de nível económico [4].

2.2. Ciclo de vida das microalgas

2.2.1. Método de Produção

Embora já tenham sido efetuados estudos quanto à produção de biodiesel a partir de microalgas, ainda não é possível afirmar qual o melhor método para o fazer, ou quais as melhores espécies para o produzir. Cada espécie requer meios e controlo de crescimento diferentes e cada unidade de produção permite usufruir de diferentes vantagens. Assim, apresentam-se seguidamente alguns nomes das microalgas mais conhecidas nesta área e dos diferentes métodos de produção existentes. Na figura 2 pode-se observar a esquematização do método geral de obtenção de biodiesel a partir das microalgas.

As microalgas mais conhecidas atualmente são: *Scenedesmus obliquus*, *Scenedesmus dimorphus*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella emersonii*, *Chlorella protothecoides*, *Chlorella sorokiana*, *Chlorella minutissima*, *Dunaliella bioculata*, *Dunaliella salina*, *Neochloris oleoabundans* e *Spirulina máxima*, sendo as mais estudadas as do tipo *Chlorella*. [6-8]

A produção de biodiesel a partir de microalgas pode ser resumida em três etapas: cultivo das microalgas, desenvolvimento e extração do óleo.

Quanto à cultura, pode ser feita de dois modos: em lagoa aberta ou em fotobiorreatores. O primeiro tem a vantagem de permitir menores despesas de tratamento das microalgas e manutenção dos equipamentos; no entanto, a eficiência do método não é tão satisfatória como a dos fotobiorreatores. O segundo, possui uma maior eficiência de produção visto que garante um melhor controlo das condições de desenvolvimento, mais concretamente, com este método é possível controlar a temperatura da colheita, assim como a quantidade de luz, podendo ser mantido o desenvolvimento das algas durante o período noturno. Por outro lado, o uso de fotobiorreatores aumenta consideravelmente o custo de produção. Aqui, mais uma vez, se verifica a importância da ACV, pois, para garantir lucros a nível económico e de produção, é necessário comparar rigidamente

ambos os fatores, quantidade produzida e investimento monetário de modo a atingir a solução ótima.

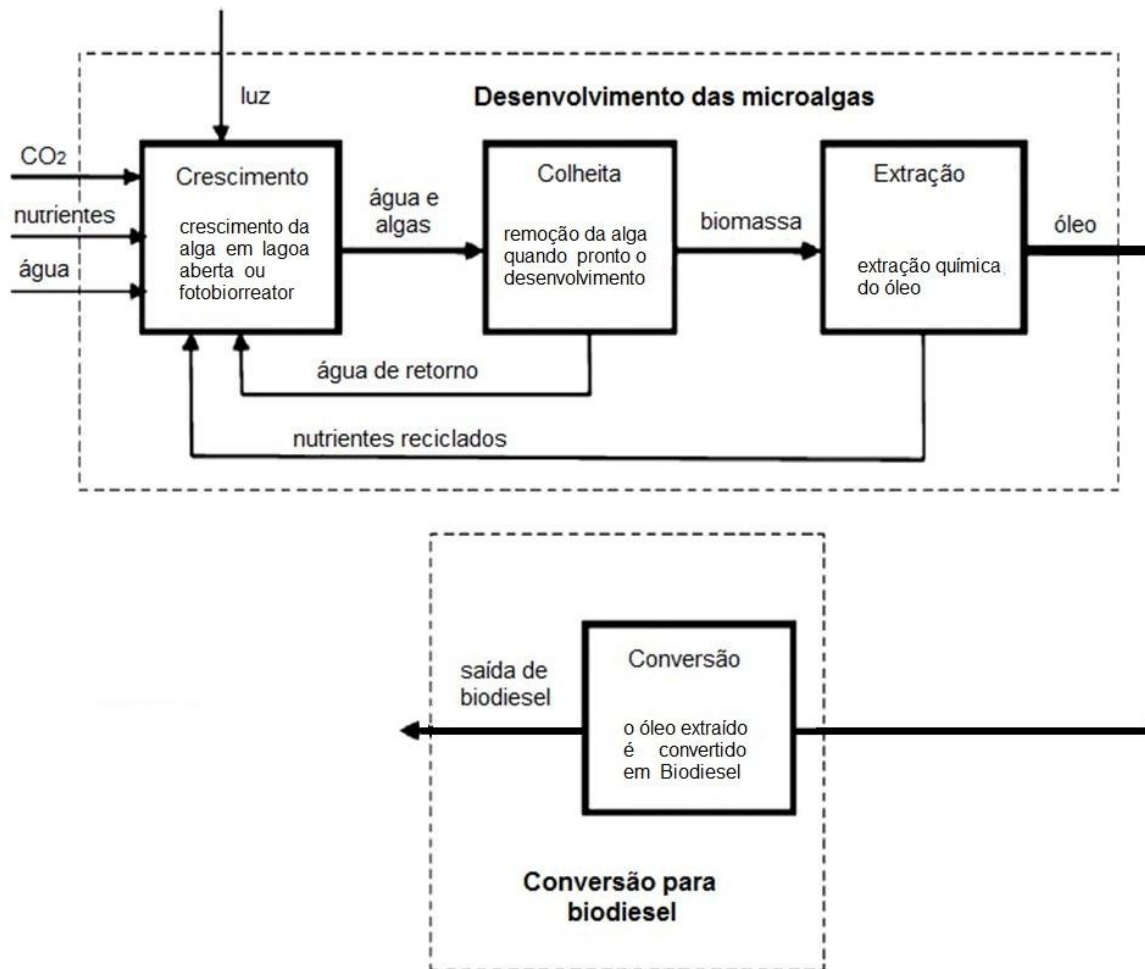


Figura 2 - obtenção do biodiesel de microalgas, adaptado da referência [3]

2.2.2. Comparação entre microalgas e culturas convencionais

De modo a poder visualizar melhor quais são as vantagens das microalgas relativamente às plantas oleaginosas (aquelas que possuem uma percentagem de óleo suficiente para tornar rentável a sua extração), apresentam-se de seguida algumas comparações entre ambas as opções.

Comparação de metodologias para análise de ciclo de vida de biodiesel

- Os custos de colheita e transporte das microalgas são mais baixos;
- O consumo de água é menor [9];
- A qualidade da água onde é feita a cultura não tem de ser rigidamente controlada, podendo até ser feitas culturas em água salgada [9];
- As microalgas não necessitam de condições climatéricas exigentes, precisam essencialmente de luz, água e nutrientes [9];
- A eficiência da fotossíntese é superior às culturas convencionais e as microalgas são melhores fixadores de CO₂ [10];
- Em condições ideais, as microalgas conseguem duplicar a sua massa em poucas horas.
- Um hectare de microalgas pode potencialmente produzir 45 mil litros de biocombustível por ano, ao passo que um hectare de soja produz 560 litros de biodiesel no mesmo período de tempo.
- O rendimento das microalgas é 10% superior ao das outras plantas [11].
- Enquanto o milho e a soja dão uma colheita por ano, as algas podem ser recolhidas semanalmente.

Se se considerar o espaço necessário à cultura de girassol e microalgas de modo a ser produzida a mesma quantidade de biodiesel, a área ocupada pelas microalgas será muito inferior àquela ocupada pelo girassol, abaixo de 6% [3], daí a grande vantagem das microalgas. Isto, juntamente com o facto de as microalgas não pertencerem à cadeia alimentar dos humanos – contrariamente ao que acontece com as outras plantas que são usadas para a produção de biodiesel, que também são consumidas pelo ser humano durante a sua alimentação –, faz com que o biodiesel de microalgas se torne atrativo quando comparado a outras culturas.

3. Revisão bibliográfica

Um estudo realizado por Figueiredo et al. [3] faz uma avaliação comparativa entre o ciclo de vida do biodiesel de girassol e de microalgas. Para o caso do girassol, foram feitas duas culturas: uma em regadio e outra em sequeiro. Para as microalgas, foram considerados diferentes valores de produtividades e de captação de CO₂, sendo a cultura em lagoa aberta com água salgada. Foi feita uma estimativa da diferença de áreas exigida pelo cultivo de girassol ou microalgas. A abordagem feita foi do tipo “*cradle-to-grave*” (desde o início da produção até à deposição final) e a unidade funcional foi de 1 kg de biodiesel. Concluiu-se que o tipo de alocação e os impactos mais relevantes são obtidos com a alocação energética em vez de mássica. Verificou-se que para a cultura de girassol em regadio seria exigida uma área superior à de sequeiro; e para microalgas maior área quando não se capta CO₂.

Hou et al. [12], em 2011, fizeram um estudo comparativo de ACV para produção de biodiesel a partir de microalgas, soja e jatrofa comparando os resultados obtidos com os do diesel a partir de fontes fósseis, tendo sido este estudo realizado com perspectiva ao cenário existente na China. As emissões de CO₂ e a redução da dependência fóssil diminuíram ao usar microalgas em vez de fonte fóssil. Quando comparados os impactos das microalgas com os da soja, as microalgas apresentam melhores resultados em todos os aspetos analisados (potencial de depleção abiótica, de aquecimento global, depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização, toxicidade humana, eco toxicidade aquática e eco toxicidade terrestre). Foi concluído que o impacto, nos aspetos analisados, da soja, jatrofa e microalgas é 54, 37.2 e 3.67 vezes o do diesel, respetivamente. É concluído que a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis apresenta vantagens quanto à redução de CO₂ e aquecimento global. No entanto, o biodiesel quando usado como combustível nos transportes apresenta piores prestações quanto à oxidação fotoquímica, eutrofização, acidificação e ecotoxicidade humana. A jatrofa e as microalgas demonstram melhores resultados relativamente à soja devido à menor necessidade de produtos agrícolas a utilizar.

Num estudo realizado por Lardon et al. [6], é feita uma ACV do biodiesel a partir da microalga *Chlorella vulgaris* onde são estudados dois casos de crescimento e dois casos de extração do biodiesel. Quanto à extração do óleo foi analisada a diferença entre uma extração em meio seco ou em meio húmido. Para o crescimento das microalgas são

comparadas a cultura em fotobiorreator e em lagoa aberta. Os autores afirmam que durante a produção o setor que apresenta maior investimento de tempo é o crescimento das algas. No final da extração, conclui-se que o melhor processo de tratamento de águas residuais é o secador de esteira, quando comparado a outros processos normalmente usados. Nesta análise é também considerada uma hipotética unidade fabril com o objetivo de analisar o balanço energético e os potenciais impactos ambientais de todo o ciclo de vida, desde a produção de biomassa até à combustão do biodiesel.

Sander et al. [7], em 2010, realiza um estudo ACV, do tipo do poço-à-bomba, com o intuito de averiguar se o biodiesel de microalgas é viável relativamente ao gasóleo, e qual o balanço energético associado ao processo de conversão do biodiesel. A unidade funcional usada foi de 1000 MJ. Os autores focam a análise no processo de secagem da biomassa, tendo obtido como resultado emissões de CO₂ de -20.9 kg/unidade funcional usando o filtro de prensa e de 135.7 kg/unidade funcional no caso do centrifugador. Os autores concluem que 89% da energia usada no processo é devida à secagem das algas. Também é referida a notória necessidade de novas técnicas de produção de algas para que o biodiesel a partir de algas possa ser rentável.

O estudo de Singh et al. [8], de 2011, diferencia duas gerações de biocombustíveis. Quantifica a eco toxicidade aquática, originada pelas águas residuais resultantes do processo de obtenção do biodiesel. A unidade funcional usada é 1 MJ. Durante esta análise, são ainda comparados dois tipos de metabolismos diferentes das microalgas, as autotróficas e as heterotróficas. Os resultados obtidos indicam que usando água do mar ou águas residuais é possível reduzir o impacto ambiental. Contudo são sempre necessários 400kg de água doce para a produção de 1 kg de biodiesel. Os autores concluem que as microalgas apresentam potencial quando usadas para produção de biodiesel, porém existe ainda a necessidade de reduzir o consumo de energia e fertilizantes utilizados durante a produção. Neste artigo, é mais uma vez posto em relevância o facto de as microalgas poderem ser plantadas em áreas reduzidas e não passíveis de interferir com a agricultura.

Num estudo realizado por Yang et al. [9], em 2010, foi feita uma ACV do biodiesel a partir de microalgas, onde foi analisado o ciclo de vida da água e nutrientes usados na cultura das algas. A cultura foi estudada tendo em conta o uso de reciclagem da água, das diferentes espécies de algas e da diferente distribuição geográfica. Procurou-se também identificar quais são os fatores onde é necessário investir de modo a rentabilizar a

produção de biodiesel. A unidade funcional escolhida foi a de 1 kg de biodiesel produzido. Com a reciclagem da água, foi reduzida a quantidade necessária de nutrientes. Usando água do mar, foi possível diminuir o consumo de água em 90% e eliminar a necessidade de nutrientes à exceção dos fosfatos. Todavia, os autores afirmam que, ao usar água do mar na cultura, torna-se ainda necessário o uso de uma percentagem considerável de água doce.

Ahmad et al. [13], em 2010, compara o biodiesel de microalgas com o de palma. Analisa a sustentabilidade dos dois produtos relativamente ao conflito entre a utilização de plantas para a produção de energia ou para a alimentação humana. Conclui que a produção de biodiesel a partir de palma não é sustentável a longo prazo. No caso das microalgas, estas apresentam emissões de gases de efeito de estufa inferiores e afirma serem uma fonte mais sustentável que a palma quando avaliada a segurança alimentar e o impacto ambiental. O autor afirma que devem ser explorados diferentes tipos de alga, com o intuito de averiguar qual o que torna a produção do biodiesel mais rentável.

Campbell et al. [14], em 2012, faz um estudo relativo às condições de produção de biodiesel a partir de microalgas na Austrália. Avalia o impacto ambiental e a viabilidade económica do processo. Para isso, cria um cenário fictício onde compara três quantidades diferentes de fornecimento de CO₂ à cultura, e mais dois para comparar o rácio de produção das microalgas. Confronta também o gasóleo convencional com o biodiesel de microalgas e de canola. O autor conclui que as emissões de gases de efeito de estufa das microalgas são inferiores ao da canola, sendo o diesel convencional o que apresenta maiores valores. No entanto, o preço de produção das microalgas é o que se mostra superior.

Khoo et al. [15], em 2011, elabora uma ACV do biodiesel de microalgas e foca a sua atenção na energia consumida pelo processo de obtenção do biocombustível e nas emissões de CO₂. A avaliação foi feita para um cenário otimista com uma cultura em fotobiorreator, percentagem de óleo da microalga de 45% e um poder calorífico superior de 42 MJ/kg. O autor conclui que deste modo é possível reduzir o consumo de energia em 60%.

Dos artigos analisados na revisão bibliográfica pode-se observar que o biodiesel de microalgas já é uma realidade, no entanto ainda falta quebrar algumas barreiras relativamente à sua produção. Verifica-se que as grandes vantagens da cultura das algas são a área – que é muito reduzida quando comparada com outras culturas de fontes de

biodiesel – e a água onde crescem – pois a sua qualidade não afeta fortemente o crescimento das microalgas.

No artigo de Figueiredo et al. [3] é utilizado o método ReCiPe, que conta com 18 indicadores de impacto de ponto médio e 3 indicadores finais, este método pode ser usado para avaliar impactos ambientais ou implicações na saúde humana. A abordagem feita foi a nível ambiental tendo sido dada ênfase à acidificação terrestre, alterações climáticas, depleção do ozono, eutrofização da água e consumo de combustíveis fósseis.

Hou et al. [12] opta por um método de ponderação baseado em ecotaxas. Neste caso são usados 10 pontos de impacto: potencial de depleção abiótica; de aquecimento global; depleção de ozono; oxidação fotoquímica; acidificação; eutrofização; toxicidade humana; eco toxicidade de água doce, do mar, e terrestre. Estes pontos foram comparados para a produção de biodiesel e gasóleo.

No artigo de Lardon et al. [6] (2009), a metodologia para análise de ACV, é focada no balanço energético, impactos ambientais e recursos inerentes à produção de biodiesel de microalgas. Os parâmetros analisados são a depleção abiótica, o potencial de acidificação, a eutrofização, o potencial de aquecimento global, a depleção da camada de ozono, a toxicidade humana e marinha e a competição por terreno de produção.

Sander et al. [7] (2010), foca o seu estudo na energia e emissões adjacentes à produção de biodiesel a partir de algas, mais concretamente nos mecanismos de centrifugação e filtragem usados durante a produção do biodiesel.

Singh et al. [8] (2011), usa uma metodologia que compara diferentes combustíveis provenientes das algas. É dada atenção ao biodiesel, biogás, bioetanol e biohidrogénio.

Yang et al. [9] (2010), foca o seu método de análise na água gasta durante o processo de obtenção do biodiesel, nutrientes usados e faz uma análise de sensibilidade aos parâmetros que envolvem o uso de água – taxa de evaporação, taxa de crescimento, percentagem de óleo constituinte da alga e ao teor de matéria em suspensão após o crescimento.

Ahmed et al. [13], em 2010, a metodologia usada para este caso baseia-se no impacto ambiental causado na produção do biocombustível, na energia usada, no efeito de estufa, na degradação do solo e impacto na qualidade da água e ar envolventes às instalações, e na influencia das microalgas no setor alimentar, relativamente à palma.

Comparação de metodologias para análise de ciclo de vida de biodiesel

Cambell et al. [14], em 2010, usa na sua metodologia os fatores associados às emissões de gases de efeito de estufa, emissões de CO₂, e a despesa associada à produção do biodiesel.

Khoo et al. [15], em 2011, adapta como metodologia a análise de sensibilidade relativa à energia consumida no processo, percentagem de óleo de constitui as algas e poder calorífico do combustível.

Concluindo, a metodologia a usar deve ser escolhida atendendo em primeiro lugar ao objeto final de estudo, para que se possam recolher todos os dados necessários à obtenção do mesmo. O objetivo de avaliar diferentes fatores resultantes da produção do biodiesel, obriga à escolha de um método de análise adequado ao mesmo.

De modo a melhor visualizar as diferenças das várias metodologias usadas optou-se por construir o Quadro 1, onde se apresentam as principais vantagens e desvantagens de cada uma.

Quadro 1 - Comparação das metodologias aplicáveis à ACV de biodiesel de microalgas

Referência	Parâmetros de avaliação	Vantagens	Desvantagens
12	Ecotaxas	Avalia desde impactes ambientais até implicações diretas na saúde humana.	Não considera fatores económicos, nem energéticos.
6	Balanço energético	Aquisição de dados reduzida, só são levados em conta fatores energéticos.	Não avalia fatores ambientais.
7	Energia e CO ₂	Aquisição de dados reduzida, foca apenas dados energéticos e emissões de CO ₂ .	Não analisa impactes ambientais além do CO ₂ .
8 e 10	Água e nutrientes	Dá especial atenção aos fatores de crescimento das algas.	Não dá relevância à extração e conversão das algas, ou a outras matérias-primas usadas.
13	Energia, influência no setor alimentar, GEE, depleção do solo, qualidade da água e ar	Modelo muito completo, avalia desde impactes ambientais até implicações na saúde humana.	Aquisição de dados muito extensa.
14	GEE, CO ₂ e custo monetário	Avalia a viabilidade económica e principais	Não inclui algumas emissões de gases.

		emissões de gases.	
15	Energia, quantidade de óleo das algas, poder calorífico do combustível	Foca a atenção no produto final obtido.	Não dá atenção a parâmetros relativos ao crescimento e extração.

4. Metodologia

A primeira fase do estudo foi focada na produção de biocombustíveis, mais concretamente, no biodiesel a partir de microalgas. Nesta fase, foram observados estudos semelhantes já realizados no mesmo âmbito, de forma a adquirir conhecimento relativamente à produção, ao transporte e à utilização de biodiesel a partir de microalgas. Foi também realizada uma pesquisa sobre produtores de biocombustíveis em Portugal de modo a conhecer o cenário nacional atual e como se podem corrigir os aspetos mais críticos na produção de biodiesel. Estes dados foram tratados de maneira a poder simular todo o ciclo de vida do produto, com o intuito de poder definir os parâmetros fundamentais a avaliar, tais como o impacto ambiental do biocombustível e a energia consumida.

Para satisfazer o objetivo do presente trabalho, comparar metodologias de avaliação de ciclo de vida, foi necessário efetuar a mesma análise através de variadas perspetivas. Esta deverá garantir uma avaliação fiável do ciclo de vida do biodiesel, permitindo averiguar a diferença de resultados obtida por diferentes metodologias, de modo a identificar quais as implicações de pressupostos desiguais e qual será a diferença encontrada nos resultados. Após identificadas as variações de valores obtidos, será de extrema relevância identificar a razão que levou a tal diferença, a fim de descobrir se o que originou um resultado numa perspetiva é diferente devido a pressupostos por parte dos dados de entrada ou por diferentes avaliações nos programas usados.

Na ACV, para combustíveis alternativos, as metodologias mais comumente usadas são a “*well-to-pump*” e “*well-to-wheel*” que correspondem respetivamente a uma avaliação desde “o poço à bomba” e desde “o poço à roda”. Segundo a análise “do poço à bomba”, são contabilizados todos os recursos, desperdícios e transporte usados na produção do biodiesel, desde o cultivo das microalgas, até que chega à bomba de serviço (biodiesel) onde é disponibilizado ao consumidor final, passando por todos os processos de transformação necessários à conversão de matéria bruta até ser colocada no local onde é vendido ao utilizador. No que concerne à análise “do poço à roda”, esta é mais completa, visto que inclui a anterior e ainda acrescenta uma nova parte da análise que

diz respeito à utilização do combustível pelo consumidor, desde o abastecimento na bomba até ao consumo do combustível no veículo.

Quanto aos programas usados, sabe-se, já á partida, que cada um pressupõe um método de cálculo diferente, assim como assumem alguns parâmetros de cálculo distintos entre ambos. Por este motivo, terão de ser mais uma vez comparados os valores obtidos com cada *software* de modo a investigar qual a origem da diferença de resultados para os mesmos parâmetros de entrada, para assim poder comparar fielmente os diferentes valores obtidos. Esta comparação não tem como objetivo principal identificar o melhor *software* de ACV, mas sim verificar como estes se adaptam á avaliação necessária para o caso da ACV do biodiesel a partir de microalgas.

Foram criadas algumas normas ISO (International Organization for Standardization) relativamente à ACV, desde a ISO14040 até à ISO14044. A norma ISO14040 (avaliação de ciclo de vida, princípios e procedimentos gerais) publicada em 1997, especifica quais as ferramentas e metodologias para a avaliação dos conceitos de ACV. Em 1998 e 1999 foram criadas as normas ISO14041 (Inventário do Ciclo de Vida) e ISO14042 (Avaliação dos Impactes no Ciclo de Vida). A norma ISO14041 estabelece os requisitos e recomendações para o inventário, tais como, o modo como são feitos os fluxos entre diferentes postos de produção ou o modo como o produto pode ser reciclado, garantindo que a profundidade e o grau de detalhe do estudo são compatíveis e suficientes para atender ao objetivo estabelecido. Quanto à norma ISO14042, examina o inventário de entradas e saídas tanto dos materiais usados durante o fabrico, como da energia consumida em cada setor, para melhor identificar o impacte ambiental. Resumidamente, é feita a estruturação, caracterização e avaliação dos possíveis impactes identificados no inventário. Em 1999 foi criada a norma ISO14043 que diz respeito à interpretação do ciclo de vida. Tem como ponto de partida identificar, qualificar, conferir e avaliar as informações dos resultados do inventário do ciclo de vida, facilitando a interpretação do mesmo de modo a criar uma base onde as conclusões e recomendações serão materializadas num relatório final. Finalmente surge a norma ISO14044, que especifica os requisitos e fornece as linhas de orientação para a ACV de um sistema de produto, desde a obtenção de matérias-primas, ou produção a partir de recursos naturais, até ao destino final.

Numa fase inicial serão apresentados alguns programas que permitem simular os dados necessários à ACV. Existem diversos programas que poderiam ser usados num estudo

ACV, no entanto cada um se pode focar em diferentes sectores. No caso em estudo tem-se como requisito a avaliação de uma fonte de energia aplicada aos transportes. Assim, os *softwares* selecionados devem incluir dados relativos a produção, transporte, e utilização de combustíveis. As bases de dados devem incluir, de preferência, o fabrico do combustível e todos os materiais, fontes de energia e processos necessários à obtenção de biodiesel. Alguns *softwares* permitem, além da aplicação da sua base de dados, a introdução de novos materiais e processos ou a alteração dos valores originais. Este facto pode implicar por um lado uma simulação mais fiável de todos os processos inerentes ao ciclo de vida do produto, visto que pode ser replicado cada passo do fabrico real; por outro lado torna a introdução de valores mais exigente. Se o programa a usar já possuir a sequência essencial à ACV, a introdução de dados torna-se mais fácil, no entanto pode dar-se o caso de não ser criada uma simulação tão próxima da realidade. Quanto mais fiel for a simulação, haverá menos possibilidade de obtenção de erros, pelo que os resultados obtidos serão mais realistas. Dos modelos computacionais disponíveis foram selecionados três que mostram ter algumas das características mencionadas necessárias à ACV do biodiesel de microalgas.

Os *softwares* a apresentar são o SimaPro pertencente à *Pré Consultants*; GEMIS, *Global Emission Model for Integrated Systems*, da *Oko-Institut*; e GREET, *Green gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*, produzido pela *Argonne national laboratory*. O Quadro 2 [16] foi criado de modo a poder comparar as principais características de cada um dos programas, apresentando de modo sucinto uma breve descrição do *software*, do âmbito para o qual o modelo foi desenvolvido, a fonte primária de informação que serve a base de dados, assim como as principais vantagens e desvantagens.

Quadro 2 - Principais aspetos de comparação entre o GREET, SimaPro e GEMIS [16]

	GREET	SimaPro	GEMIS
Descrição	Apresenta um conjunto de processos <i>standard</i> de produção de biodiesel. O utilizador pode ajustá-los à sua medida.	Módulos de dados de inventário, baseados em processos que vão sendo construídos pelo utilizador.	Módulos de dados de inventário, começando pela construção de produto, seguido de processo e cenário.

Âmbito	Transportes dos Estados Unidos, contendo combustíveis alternativos e tradicionais. Calcula emissões atmosféricas e energia consumida.	Grande abrangência de sectores (que podem ser expandidos). Possui dados relativos à Europa e Estados Unidos. Inclui emissões atmosféricas, resíduos produzidos, energia e custos.	Transportes e indústria, dos 27 da Europa e Estados Unidos. Compreende combustíveis convencionais e alternativos, transportes, materiais e processos. Calcula emissões atmosféricas, resíduos sólidos, uso de terreno, energia e custo.
Fonte de dados primária	Documentos pertencentes à US EPA AP-42 ¹ , documentos governamentais e estudos publicados.	Franklin US LCI, BUWAL ² 250, IDEMAT 2001 ³ , ETH-ESU 96 ⁴ . Dados provenientes da indústria.	Öko-Institut ⁵
Vantagens	Permite alterações dos valores de origem, por parte do utilizador. Relativamente rápido de programar. Licença gratuita.	Modelo aplicável a qualquer processo. Interface com o utilizador múltipla. Inventário de grande dimensão. Possibilidade de expansão da base de dados, e criação de novos materiais e processos.	Possui alguns processos industriais, permitindo a sua alteração. Permite criar novos processos e materiais. Licença gratuita.
Desvantagens	Limitado ao setor dos transportes. Não permite a introdução de novos processos.	Licença não gratuita. Introdução de valores intensiva. Possibilidade de inconsistências entre diferentes módulos.	Introdução de dados intensiva.

¹ AP-42: documentos relativos ao *U.S. Environmental Protection Agency's, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*.

² BUWAL: *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft*, (agência federal do ambiente, florestas e território, Suíça).

³ IDEMAT: *Inventory Data of Materials*, (Universidade Técnica de Delft, Holanda)

⁴ ETH-ESU: *Eidgen Össische Technische Hochschule*, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt, (grupo de energia, materiais e ambiente do instituto federal de tecnologia de Zurique, Suíça).

⁵ Öko-Institut: *Institut für angewandte Ökologie*, (instituto de pesquisa e consultoria de Berlim, Alemanha).

Foram analisados de forma intensiva os três programas apresentados relativamente à metodologia definida em cada um deles. Para cada *software* foram averiguados parâmetros como a base de dados, a introdução de novos processos e materiais, e a adaptabilidade dos dados existentes caso de estudo. Quanto à base de dados, apenas o GREET possui o biodiesel de microalgas, sendo apenas necessário adaptar os seus valores aos praticados no cenário em análise, enquanto nos outros dois modelos seria necessário criar de raiz o biodiesel de microalgas. Relativamente à introdução de novos processos e materiais apenas o SimaPro e o GEMIS permitem a criação de um novo modelo adaptado às necessidades do utilizador. No entanto esta tarefa é mais exigente pois cada processo acarreta uma teia de materiais e subprocessos, que têm de ser definidos em concordância uns com os outros de modo a permitir a viabilidade dos processos. O GREET não permitindo a criação de processos novos, conta com uma descrição pormenorizada do processo de obtenção de biodiesel a partir de microalgas. Este facto permite ao utilizador focar-se apenas nos valores a introduzir e não tanto na relação entre processos, visto que estes já se encontram inicialmente interligados. Depois de testados os três *softwares* referidos, tomou-se como ponto de partida a utilização do GREET, pois a utilização dos restantes revelou-se mais demorada. Assim, de modo a obter os resultados iniciais, foi feita a primeira análise com este programa, com a intenção de aplicar posteriormente a mesma análise no SimaPro e no GEMIS e comparar as diferenças obtidas entre ambos.

Posto isto, optou-se por se iniciar o estudo recorrendo ao GREET, visto que a sua base de dados já inclui a sequência de produção do biocombustível, faltando apenas quantificar os recursos que descrevem o processo. No caso do SimaPro e do GEMIS, é necessário descrever a sequência de produção do biodiesel de microalgas, assim como a interação entre os diversos processos que caracterizam a produção do combustível. Assim, basta apenas introduzir os dados relativos ao cenário a analisar, que estão indicados mais adiante.

4.1. Metodologia GREET APD (*Algae Process Description*)

O modelo GREET contém um ficheiro denominado “GREET APD”, que explica sucintamente o funcionamento do modelo. Os dados deste documento foram recolhidos da literatura pública, inventários de ACV, relatórios governamentais, relatórios de conferências e discussões entre investigadores, e foram compilados na informação e inventário de processo presentes neste documento. A pesquisa apresentada destaca relatórios de larga escala, mas também são citados frequentemente simulações de casos onde não foram encontrados dados empíricos sobre o tema. O APD foi implementado num ficheiro Excel de forma a facilitar a distribuição para os demais investigadores e para a integração deste modelo no GREET, que tem como base a plataforma do Excel [17].

4.1.1 Fronteira do sistema

A fronteira define uma análise do tipo “do poço-à-roda” do ciclo do combustível. O ciclo de vida do veículo, a sua construção e fim de vida, não estão incluídos nesta análise. A construção, manutenção e demolição do equipamento e das instalações dedicadas à produção das microalgas e consecutiva conversão em biodiesel também não são tomadas em consideração nesta análise. No que diz respeito aos materiais não-combustíveis consumidos durante o processo de obtenção do biocombustível, apenas são tidos em conta os fertilizantes, pois estes correspondem à maior percentagem de energia relativa aos materiais. A metodologia GREET inclui os efeitos diretos do processo de conversão de microalgas, mas não os indiretos, tais como a alteração do terreno e a preparação de infraestruturas para as instalações que permitirão o fabrico do combustível, assim como a preparação da lagoa de cultivo necessária ao crescimento das microalgas. O transporte de água até às instalações é também excluído, contudo a deslocação e utilização da água dentro das instalações já é contabilizada. Na análise em causa, os nutrientes requeridos no crescimento foram reduzidos a elementos base necessários ao crescimento autotrófico. Os modos de crescimento heterotrófico e mixotrófico não são considerados. O modelo de produção de lípidos derivados das algas é restrito ao cultivo em suspensão seguido da extração dos mesmos. Os combustíveis foram restritos a biodiesel obtido por transesterificação e diesel renovável, e gasolina renovável obtida por hidrotratamento produzida a partir de lípidos das algas. Os veículos

considerados são os de ignição por compressão e injeção direta, no caso dos veículos a gásóleo; e ignição por faísca, no caso dos veículos a gasolina renovável [17, 18].

4.1.2 Contagem do carbono

A metodologia GREET APD estuda o crescimento das algas com CO_2 proveniente dos gases de combustão resultantes de uma instalação industrial. Apesar deste gás poder ter origem fóssil, nesta análise é tratado como gás atmosférico. Este princípio é admitido tendo em conta que a fábrica operará quer as algas cresçam quer não, e o CO_2 das instalações será emitido para a atmosfera. Ou seja, o modelo GREET, toma em consideração que existe CO_2 suficiente para alimentar as microalgas, cabe ao utilizador contabilizar se as instalações em causa produzem a quantidade de CO_2 necessária ao crescimento das algas.

Na figura 3, pode ser observado o fluxo do carbono no ciclo das algas. O carbono tem origem nos combustíveis fósseis usados nas unidades fabris. É capturado pelas algas e continua o seu percurso na biomassa, nas partes lipídica e não lipídica. Também pode ser transformado em CH_4 (metano) durante a formação de biogás e novamente em CO_2 durante a combustão do biogás ou de outro combustível final. Além disso, o carbono também pode ser exportado para os campos de cultivo como coprodutos de aditivo do solo, bio metano e lípidos extraídos das algas se usadas na alimentação.

No caso dos perfis de emissões do gás de combustão original e os perfis de emissão dos processos divergirem (como se vê na figura 3), o carbono do CO_2 primário pode ser emitido como CO, VOC e CH_4 . A conversão para CH_4 é possível quando o carbono, presente nas algas, é convertido em biogás, através da queima de biomassa. Nesta metodologia, é usada uma contagem de carbono do tipo *back-end*, onde as emissões de carbono biogénico são determinadas a partir dos fatores de emissão dos vários processos existentes na fábrica. O carbono nos gases VOC e CO são pesados convenientemente nas emissões totais de CO_2 . O carbono biogénico presente no CH_4 é acrescentado depois de determinada a massa do CH_4 correspondente ao fator de aquecimento global calculado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Depois de determinadas todas as emissões, é dado um crédito pelo CO_2 original capturado pelas algas [18]. A contagem de carbono encontra-se ilustrada em síntese na figura 4.

A contagem do carbono pode ser usada como indicador de impacto ambiental, relativamente às emissões de gases de efeito de estufa. Este termo pode ser utilizado de forma a quantificar as emissões de uma unidade fabril, visto que está associado ao CO₂ emitido pela mesma. Esta metodologia tem como pressuposto uma unidade de comparação de gases de efeito de estufa, o CO₂, que é obtida multiplicando a massa de gases de efeito de estufa pelo respetivo potencial de aquecimento global [18].

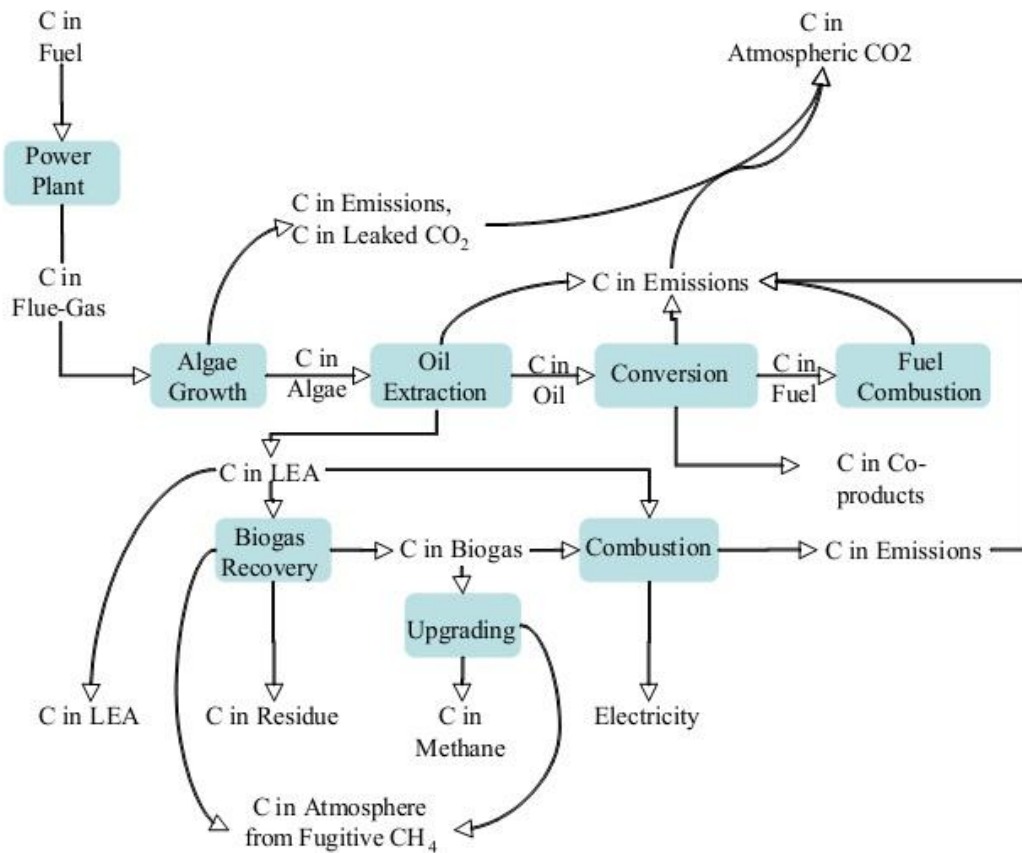


Figura 3 - Ciclo do carbono [18]

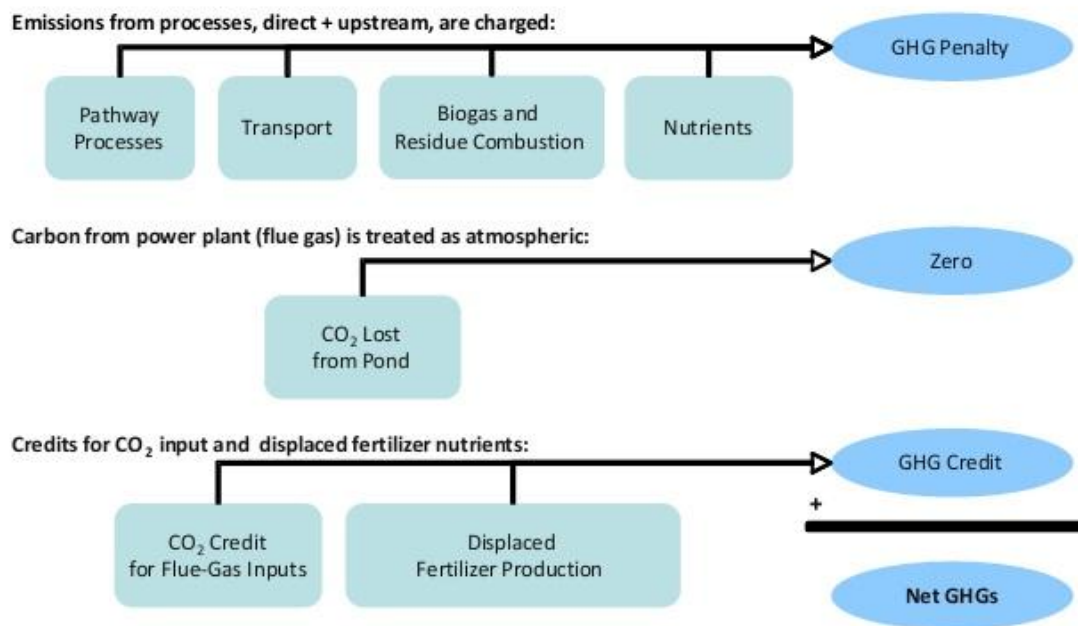


Figura 4 - Esquema de contagem do carbono [18]

4.1.3 Unidade funcional

Atendendo à necessidade de quantificar o desempenho do sistema em análise de modo a poder comparar posteriormente os resultados obtidos, é preciso aplicar uma unidade que possa traduzir a função, eficácia e durabilidade do sistema em estudo [20].

A unidade funcional aplicada numa ACV define a base comum para o cálculo de emissões e energia nos diferentes cenários estudados. Existem várias opções, e a escolhida afetará a interpretação da análise efetuada. Para produtos que produzam energia, é utilizada uma unidade funcional energética (por exemplo kW.h ou J). Quando comparados combustíveis com tecnologias de combustão e eficiências de utilização semelhantes (como gasóleo derivado do petróleo e biodiesel) a unidade funcional de energia a usar é clara, pois a eficiência na utilização final é constante ao longo dos diferentes cenários considerados. No entanto, se forem comparados combustíveis que usem tecnologias de combustão e eficiências diferentes, a unidade funcional de energia pode não ser apropriada. Por exemplo, os óleos provenientes das algas podem ser convertidos em gasóleo renovável ou gasolina renovável, mas os veículos a gasóleo são geralmente 20% mais eficientes que os veículos a gasolina. Nestes casos, uma “unidade funcional de serviço” (por exemplo veículo.quilómetro) apresentará melhores resultados

mesmo que estes dependam do consumo de combustível, propulsão e tempo de ciclo de condução.

Para biocombustíveis uma unidade de biomassa de entrada (por exemplo massa, PCI (Poder Calorífico Inferior) ou PCS (Poder Calorífico Superior)) pode ser interessante quando o objetivo da análise é mostrar restrições tecnológicas no potencial de produção de biomassa (exemplo produtividade máxima resultante de 2 toneladas de biomassa por dia). A unidade funcional de biomassa pode também comparar diferentes métodos de produção de combustível mostrando a quantidade de energia e as emissões que são poupadas relativamente a um caso de referência.

A unidade funcional de energia usada pelo GREET é o mmBTU, que corresponde no sistema internacional ao kW.h (através do fator de conversão: $1 \text{ mmBTU} = 293,07107 \text{ kW.h}$) [18, 21].

4.1.4 Organização do documento APD

O documento que serve de base ao GREET para a análise do biodiesel de microalgas é o “algaeprocessdescription_v0.4” que será brevemente descrito nesta secção.

Na figura 5, está apresentado um esquema da produção do biodiesel de microalgas, onde os blocos representados correspondem a folhas do ficheiro Excel.

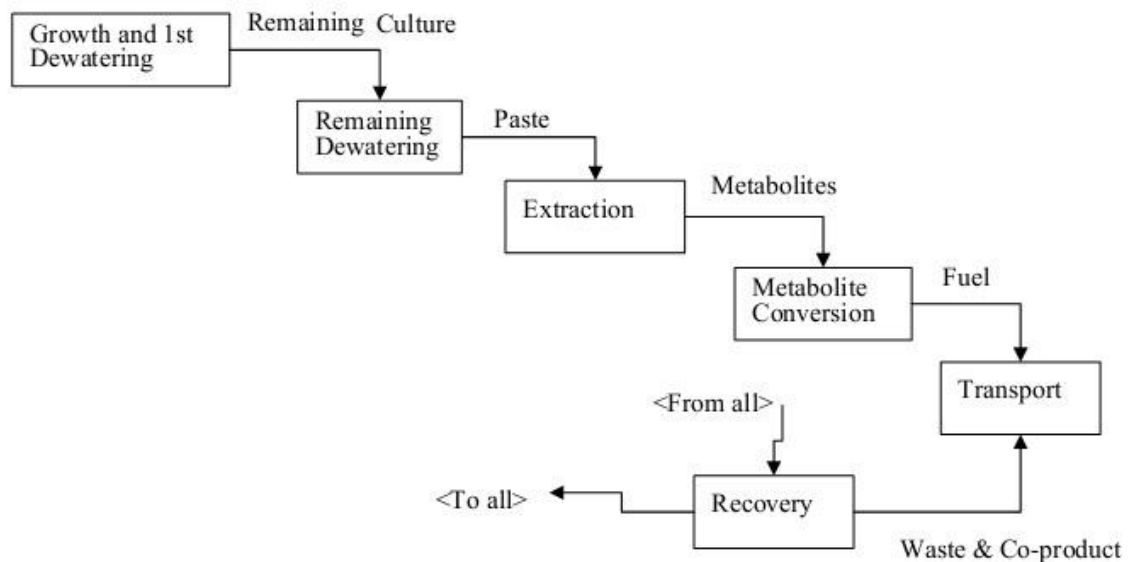


Figura 5 - Esquema de produção [17]

Cada uma das folhas tem uma configuração geral, onde na base se encontra um quadro relativo à descrição do processo; no meio, os parâmetros que determinam os valores presentes no quadro de descrição do processo; e, no topo, a seleção dos processos a usar na análise.

O quadro descrição do processo encontra-se dividido em três blocos.

O primeiro contém a informação necessária para ligar os processos à posição que ocupam no ciclo do combustível. Subdivide-se ainda em mais três parcelas:

- Unidade de entrada por unidade de saída – alguns processos são essencialmente transformações que convertem uma matéria de entrada numa de saída. Neste processo, é definido o rácio entre a matéria que entra e a que sai.
- CO₂ recuperável – é o valor da quantidade de CO₂ emitida durante o processo de obtenção do biodiesel, que é recolhida novamente para alimentar as microalgas

Comparação de metodologias para análise de ciclo de vida de biodiesel

(por exemplo: os gases de combustão libertam CO_2 , é possível recuperar uma parcela deste, enviando-a novamente para a cultura de microalgas).

- Massa a recuperar – representa a massa enviada para recuperação por grama de produto, numa base de peso a seco.

O segundo bloco refere-se aos materiais que entram no processo. Contém os materiais de entrada, numa base mássica. Os materiais são selecionados numa lista configurada a partir do quadro de materiais, presente na folha de cálculo “Materiais”.

O terceiro bloco contém as entradas de combustível, numa base energética. Estas entradas, tais como o gás natural, são disponibilizadas pelo modelo numa base energética expressa em $\text{kW}\cdot\text{h/g}$ de produto.

Todos os quadros do documento encontram-se codificados por cores, de modo a guiar mais facilmente o utilizador. Normalmente só as células amarelas ou verdes devem ser alteradas.

- Células bege – contêm os dados que são processados pelo modelo GREET de modo a calcular os resultados obtidos.
- Amarelas – parâmetros para processamento.
- Verdes – ferramentas que ajudam o utilizador a calcular os valores de entrada. Não afetam o cálculo a menos que sejam copiadas para as células amarelas.
- Vermelhas – mostram erros de condições.

Os dados inseridos nas folhas de cálculo apenas são considerados após a sua transição para o GREET, que ocorre depois de ser premido o botão “*copy to GREET*” que surge na folha de cálculo com o mesmo nome. Ao premi-lo, são atualizados os cálculos do modelo APD, a informação é copiada para o GREET, o GREET passa a ser configurado para o estudo do processamento do óleo de algas e faz com que a folha ativa passe a ser a das algas. O Quadro 3 mostra o nome dos blocos definidos no Excel que são usados quando os dados são transferidos para o GREET [18].

Quadro 3 - Conteúdo dos blocos do ficheiro Excel relativo aos dados de microalgas

Nome do bloco	Conteúdo
APD_CO2_Transfer	Descrição do processo para introdução do CO ₂ na cultura de algas
APD_Growth_Cooling	Descrição do processo de arrefecimento do fotobiorreator
APD_Growth_Nutrient_Use	Descrição do processo para o uso de nutrientes
APD_Growth_Summary_of_Water	Descrição do processo relativo ao transporte de água
APD_Summary_Growth_1st_Dewater	Compilação dos dados das três linhas anteriores
APD_Summary_of_CO2	Descrição do processo do transporte, introdução e captura de CO ₂
APD_Summary_of_Extraction	Descrição do processo de extração dos metabólitos
APD_Summary_of_Remaining_Dewatering	Descrição do processo de secagem seguinte à primeira desidratação
APD_Summary_of_Recovery	Descrição do processo de recolha de CO ₂ , geração de eletricidade e outros coprodutos
APD_Materials	Materiais incluídos no processo

Folhas de cálculo iniciais:

- **CO₂**

Nesta folha, são calculados a energia e materiais associados ao abastecimento de CO₂ requerido pelo crescimento das algas. A quantidade de energia despendida para comprimir o CO₂ dos gases de combustão, transportá-lo para o local de produção e transferi-lo para a lagoa de cultivo das microalgas, é combinada de modo a definir a quantidade de energia necessária para importar o CO₂ para o local de produção. O GREET determina a procura total de CO₂ do seu ciclo e determina a totalidade de CO₂ recuperada; depois, usa estes resultados para calcular a necessidade total de CO₂ a importar. A energia necessária para importar o CO₂ para o local é aplicada à parcela de

CO₂ importado, mas apenas a energia requerida para a transferência de CO₂ para a cultura é aplicada à parcela de recuperação de CO₂ [17, 18].

- **Nutrientes**

Contém diversas informações que ajudam a definir parâmetros necessários a outras folhas de cálculo. Estes valores não são usados diretamente no APD, é necessário introduzi-los nas devidas folhas de cálculo [17].

- **Crescimento e primeira desidratação**

Nesta folha de cálculo, são contabilizados praticamente todos os dados associados ao movimento de água durante o processo de obtenção de biodiesel de microalgas, sendo que, tanto a água necessária ao crescimento das algas como a da primeira desidratação são contabilizadas em conjunto. Aqui é descrita a necessidade de energia e nutrientes nestas operações. Estão disponíveis dois cenários possíveis de crescimento: lagoa aberta e fotobiorreator. Os parâmetros a definir nesta folha são:

Parâmetros das instalações:

- Fração de óleo das algas – percentagem mássica de lípidos.
- Número de dias de produção anual.
- Parâmetros comuns ao fotobiorreator e lagoa.
- Energia de fornecimento de água até à lagoa.
- Energia de fornecimento de água à cultura – calcula a energia necessária desde o movimento de água da cultura até à primeira desidratação.
- Quantidade total de CO₂ que chega à cultura, por grama de algas produzidas, quantidade de CO₂ consumida por grama de biomassa.

Parâmetros da lagoa:

- Produtividade específica – área de produção de matéria seca por metro quadrado por dia.

- Potência de homogeneização da lagoa – potência necessária ao movimento das pás que misturam a cultura.
- Perdas evaporativas na lagoa – quantidade de água evaporada durante o crescimento.
- Perdas de CO₂ – percentagem de CO₂ que não é absorvido pelas algas.
- Água perdida por meios que não a evaporação.
- Concentração de biomassa na água no fim do crescimento.

Parâmetros relativos à primeira desidratação:

- Concentração de biomassa na água no final do processo de desidratação [17].

- **Restantes desidratações**

Aqui surge a folha onde são contabilizados os restantes dados associados ao movimento de água, que agora se processa apenas nas seguintes fases de desidratação da biomassa. Tendo como parâmetros de entrada, dados relativos (neste caso) à centrifugação, tais como a percentagem inicial de sólidos, existente no início da centrifugação [17].

- **Extração**

Nesta folha de cálculo, são introduzidos os valores de energia necessária à ruptura das células das microalgas e energia associada à extração do óleo. Nesta análise, a extração é feita através de agitação magnética – de modo a misturar os solventes com a biomassa –, ultrassons, filtração por vácuo e separação por solvente (hexano) [17], obtendo-se no final o biodiesel.

- **Recolha**

Esta secção diz respeito à biomassa que após o processo de extração não foi convertida em biodiesel. A recolha pode ser descrita como o reaproveitamento de alguns coprodutos (através de digestão anaeróbia), como o CH₄ e o CO₂, e que serão utilizados para outros

fins. Com estes dados o GREET modela o aproveitamento do CH₄ para a produção de eletricidade, através da sua queima. É também calculada a quantidade de CO₂ produzida durante o processo, permitindo que este seja reaproveitado durante o crescimento das algas [17].

- **Folha de cálculo relativa às algas**

Esta folha encontra-se dividida em 6 secções principais: parâmetros chave dos dados de entrada para o processo, parâmetros chave dos dados de entrada relativos à gestão dos coprodutos, parcela do processo de combustão de cada etapa, cálculo do consumo de energia e emissões por etapa, sumário do consumo energético e emissões relativos ao rendimento do combustível em cada fase, e materiais usados no processo. A quarta secção calcula a energia e emissões de cada fase do processo, a partir dos parâmetros presentes nas três primeiras secções, levando em conta os créditos associados aos coprodutos. A quinta secção compila a energia e emissões associadas ao biodiesel produzido [17].

4.1.5 Coprodutos

Os processos industriais consomem energia e produzem diversos produtos e emissões. Por exemplo, uma cultura destinada à produção de etanol produz suplementos alimentares ao mesmo tempo que produz o combustível, etanol. Assim, nem toda a energia consumida pelos elementos de entrada e emissões devem ser responsabilizados pelo mesmo produto, o etanol. Existem duas perspetivas diferentes de cálculo: o método de alocação e o de substituição. O de alocação é mais apropriado para ACV quando o produto primário e coproduto podem ser medidos por um único fator, como massa ou energia.

O método de alocação atribui o uso de matéria-prima, de energia, e emissões entre o produto primário e o coproduto, numa base mássica, energética ou até de valor de mercado do produto. Por exemplo, numa alocação energética, se E_i for o conteúdo energético de um produto i , e E_t for a energia total da combinação de todos os produtos, então E_i/E_t da energia do processo e emissões são atribuídas ao coproduto i , e o produto principal é creditado nessa parcela. Numa alocação mássica, as massas do produto primário e do coproduto são usadas de modo a dividir o peso relativo à energia de entrada do processo, matéria-prima de entrada e emissões poluentes. Numa alocação de

base energética, o conteúdo de energia do produto primário e coproduto é usada de modo a dividir o peso da energia, da matéria-prima e das emissões poluentes de entrada. Para o caso de uma alocação por valor de mercado, o valor de mercado do produto torna-se o fator determinante de divisão do peso. A alocação por valor de mercado é sujeita a variações no preço do produto, o que pode levar a algumas incertezas nos resultados da ACV [17, 19].

Quanto ao método de substituição, assume-se que um produto convencional é deslocado por um coproduto do processo sob avaliação. O ciclo de vida energético que deveria ser usado e as emissões que deveriam ser geradas durante a produção do produto deslocado são contabilizados como créditos do produto primário. Estes créditos são subtraídos à energia total consumida e emissões resultantes do processo sob avaliação. Numa alocação de mercado, os fatores de entrada e emissões do processo a ser analisado são divididas pelo valor de mercado dos coprodutos. No método de substituição, são consideradas as emissões do processo deslocado. Assim, o método de substituição envolve a expansão dos limites do sistema de modo a incluir os produtos deslocados.

A dificuldade no método de substituição é identificar os produtos deslocados e o seu ciclo de vida energético e emissões. Além do mais, se a contabilização de coprodutos for relativamente grande, quando comparada com a do produto primário de um dado processo, o método de substituição deixa de ser apropriado para estimar a energia e emissões dos produtos primários, visto que o volume de coprodutos pode exceder o tamanho do mercado. Nesse caso, a substituição referente às emissões estará sobrestimada [17, 18].

4.1.5.1 Coprodutos da produção de biodiesel de microalgas

Usualmente, são considerados cinco coprodutos resultantes da produção de óleo de algas: eletricidade, calor, biometano, azoto e fertilizantes à base de fósforo. A eletricidade e calor podem ser produzidos diretamente através da combustão dos lípidos extraídos das algas, ou da combustão de biogás produzido na digestão ou gasificação dos lípidos extraídos das algas. Na figura 6, podem ser observados os possíveis fluxos resultantes do processo da extração de lípidos das microalgas.

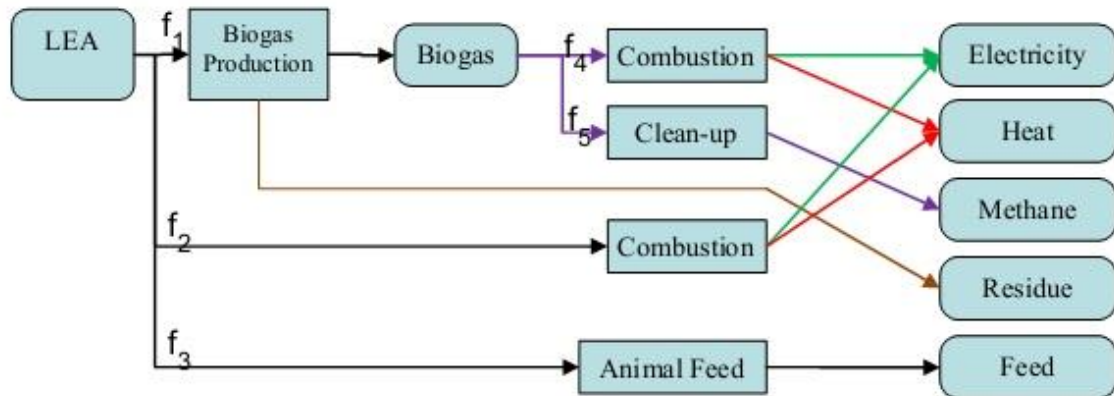


Figura 6 - Formação de coprodutos [17]

O APD calcula a totalidade de lípidos extraídos das algas por grama de lípido extraído, e a quantidade de metano e CO₂ formada durante a produção de biogás por grama de lípido extraído. O GREET está configurado de modo a dar a escolher ao utilizador como é que a extração deve ser considerada em três coprodutos: produção de biogás, combustão direta e alimentação animal. Estas frações são representadas por f1, f2 e f3 na figura 6. O biogás é dividido numa parcela para a combustão no sistema combinado de calor e potência para produzir eletricidade e calor e outra parcela para ser aproveitada na qualidade da conduta de bio metano [17].

Eletricidade e calor

Tanto a eletricidade como o calor podem ser obtidos através da combustão da biomassa ou biogás das microalgas. Para a queima de biomassa deve ser indicada previamente a humidade específica. A eletricidade daí produzida pode ser consumida no local de modo a satisfazer as necessidades do processo, ou pode ser exportada. Pelo método de substituição, a eletricidade exportada pode substituir a energia proveniente de um determinado mix energético, como de um ciclo combinado de gás natural, carvão ou biomassa. Se a quantidade de eletricidade produzida no local for inferior à requerida pelo processo, terá de ser usada eletricidade da rede para compensar o défice de energia.

O calor resultante da combustão de biomassa ou biogás, está disponível para reutilização no local e para exportação. No método de substituição, o calor exportado pode substituir a mesma quantidade de calor produzida por uma caldeira de gás natural que tenha uma eficiência de 80%. Do mesmo modo, se o calor produzido não for suficiente para cobrir o calor necessário ao processo, é assumido que o défice de calor é dado pela caldeira.

O modelo GREET inclui três sistemas combinados de calor e potência. O parâmetro chave, aqui presente, é a eficiência elétrica e a taxa de recuperação de calor. A eficiência elétrica é a energia elétrica produzida dividida pela energia presente no combustível consumido tendo em conta o seu PCI. A taxa de recuperação de calor é o quociente entre a saída de calor após a geração de eletricidade que é recuperada como calor útil pelo sistema de ciclo combinado de calor e potência. Considerando que F é a energia contida no combustível E_e a eficiência elétrica, $Q_{saída} = F(1-E_e)$ representa o calor de saída e Q_r é a quantidade de calor útil recuperada, então a taxa de recuperação de calor é dada por $Q_r/Q_{saída}$. Este procedimento não é o mesmo que da eficiência total do sistema de calor e potência, Q_r/F . A taxa de recuperação de calor é especificada no PCI do combustível [17].

Bio metano

A partir do momento em que o bio gás é exportado deve ser melhorado de modo a aumentar a qualidade do transporte de bio metano, a energia e emissões associadas aos processos de limpeza deveriam ser tomadas em conta, assim como o crédito de substituição do gás natural. Se o método de substituição for usado, a energia e emissões associadas à produção da mesma quantidade de energia de gás natural são contabilizadas como crédito [17].

4.2. Apresentação do cenário a utilizar

Para um melhor entendimento do modo como será produzido o biodiesel de microalgas é conveniente definir como estão relacionadas as diferentes etapas da obtenção do combustível.

Em primeiro lugar vai-se indicar o local de produção das microalgas. Como um dos objetivos do estudo é a análise da viabilidade da produção de biodiesel em território nacional, decidiu-se projetar as instalações necessárias à produção de biodiesel junto à fábrica da PORTUCEL em Cacia, Aveiro. Esta escolha foi feita visto que as microalgas, durante o seu metabolismo, vão precisar de absorver CO_2 , que é indispensável ao seu crescimento. Deste modo pode-se utilizar como fonte de CO_2 as emissões resultantes da laboração desta fábrica, evitando o transporte deste gás de uma outra fonte mais

distante. Além disso, segundo o ciclo do carbono – abordado no capítulo 4 – ao utilizar as emissões de uma instalação fabril para a alimentação das algas, este consumo será benéfico, pois está a ser aproveitado um produto que é prejudicial ao ambiente – o CO₂ – na produção de um outro elemento – o biodiesel. Assim, durante a fase de crescimento, haverá um consumo de CO₂ por parte das algas, o que não acontece durante a produção de gasóleo, onde apenas existe libertação deste gás. Além do mais, as instalações da PORTUCEL encontram-se junto a uma fonte abundante de água, a ria de Aveiro, que é outro elemento fundamental ao crescimento das microalgas. Para permitir o desenvolvimento das algas é preciso então recorrer a uma condução de gases, para o transporte do CO₂, com o respetivo equipamento de ventilação; e um sistema de alimentação de água, que permita o bombeamento da água da ria até à lagoa de cultura e outro que posteriormente fará a recirculação de água dentro da lagoa. O crescimento das microalgas será feito em lagoa aberta, o que requer um mecanismo de movimentação das águas dentro da lagoa (movimento com pás mecânicas). Terminado o crescimento da biomassa procede-se à recolha das microalgas, extração e conversão do óleo em biodiesel. De modo a reduzir o transporte durante o processo de conversão deste biocombustível, é conveniente que as instalações essenciais à extração estejam o mais perto possível do local de cultura. Para a conversão do óleo em biodiesel é necessário recorrer a uma determinada sequência de ações, que se descrevem a seguir.

Começa-se por recorrer a uma junção de solventes à biomassa previamente separada da lagoa. O solvente usado é constituído por diclorometano e metanol, numa proporção de 2:1. Esta fase pode ocorrer como extração seca – numa proporção mássica de 50 partes de solvente para uma de algas – ou como extração húmida – numa proporção mássica de 30 partes de solvente para uma de algas. A solução resultante é agitada durante 3 horas. De seguida recorre-se ao uso de ultrassons de forma a agitar a solução anterior – desta vez com um solvente de 1:2 de ácido clorídrico em metanol – durante meia hora, sendo que a mistura é feita a uma temperatura de 70 °C. Sucede-se a adição de Hexano numa proporção de uma parte de algas para 20 de solvente, continuado de 5 minutos de centrifugação e evaporação de 1,5 horas a 70 °C. O processo conclui-se com mais 1,5 horas de ultrassons, ao fim do qual se obtém o biodiesel puro.

Após compilada a informação descrita anteriormente foram construídos os Quadros 4 a 7, onde se mostram os dados que foi necessário inserir no modelo GREET (e qual a sua origem) para obter a simulação do processo de obtenção de biodiesel a partir de microalgas. Os dados recolhidos dividem-se em 3 grupos: a cultura das microalgas, que

teve origem na Universidade de Almeria (Quadros 4 e 5); a extração e conversão do óleo, feita na Universidade de Aveiro; e alguns dados técnicos aproveitados do modelo GREET.

Os Quadros 4 e 5 apresentam a diferença de valores entre um cenário otimista e um cenário pessimista. No primeiro é considerado um rendimento do processo inferior à média, ou seja, considera-se que durante o crescimento das microalgas não se deu nas melhores condições, levando a uma produção reduzida. No segundo caso é considerado um rendimento do processo superior à média, ou seja, considera-se que o crescimento das microalgas ocorreu em condições ideais, sendo a produção superior ao primeiro caso. Os resultados destes dois cenários são utilizados de modo a limitar o intervalo de dados usado na análise de sensibilidade, com o objetivo de limitar os valores máximo e mínimo usados em cada parâmetro, de modo a que a análise de um parâmetro não influencie os valores utilizados para os restantes.

Quadro 4 - Cenário pessimista

Sistema de cultivo	Lagoa aberta		Fotobiorreator	
	Unidade	Valor	Unidade	Valor
Cenário pessimista				
Parâmetros técnicos				
Produtividade de biomassa	g/m ² /dia	30	g/m ² /dia	20
CO ₂ introduzido	kg/kg de alga	3	kg/kg de alga	2,61
Evaporação de água	L/m ² /dia	6	L/m ² /dia	0,5
Potência do mecanismo de mistura	W/m ³	2	W/m ³	500
Trabalhadores	peçoas/ha	0,18	peçoas/ha	0,36
Dias de produção	Dias	300	Dias	300
Área ocupada	ha	100	ha	10
Rácio V/S	m ³ /m ²	0,4	m ³ /m ²	0,07
Eficiência de fixação de CO ₂		0,60	0	0,69
Grau de diluição	1/dia	0,25	1/dia	0,4
Volume total da cultura	m ³	400000	m ³	7000
Produção total de biomassa	ton/ha/ano	90	ton/ha/ano	60
Consumo total de CO ₂	ton/ha/ano	270	ton/ha/ano	156,6
Evaporação total de água	ton/ha/ano	18000	ton/ha/ano	1500
Consumo de fertilizantes	kg/kg alga	0,3	kg/kg alga	0,3
Potência para crescimento e outros	kW.h/m ³ crescimento	1	kW.h/m ³ crescimento	1

Comparação de metodologias para análise de ciclo de vida de biodiesel

Preço do fotobiorreator	€/m ³	2	€/m ³	2000
Capacidade do equipamento				
Unidade média de preparação	m ³ /h	10.000	m ³ /h	280
Processo de esterilização	m ³ /h	-	m ³ /h	280
Ventilador de ar	m ³ /h	-	m ³ /h	42.000
Fotobiorreatores	m ³	400.000	m ³	7.000
Unidade de sedimentação	m ³ /h	10.000	m ³ /h	280
Tanque de crescimento	m ³	1.000	m ³	28
Unidade de decantação	m ³ /h	1.000	m ³ /h	28
Bomba para crescimento	m ³ /h	1.000	m ³ /h	28
Unidade de fornecimento de CO ₂	Kg/h	9.000	Kg/h	522

Quadro 5 - Cenário otimista

Cenário otimista				
Sistema de cultivo	Lagoa aberta		Fotobiorreator	
	Unidade	Valor	Unidade	Valor
Parâmetros técnicos				
Produção de biomassa	g/m ² /dia	30	g/m ² /dia	20
CO ₂ introduzido	kg/kg alga	9,15	kg/kg alga	2,61
Evaporação de água	L/m ² /dia	10	L/m ² /dia	0,5
Potência do mecanismo de mistura	W/m ³	1	W/m ³	500
Trabalhadores	peçoas/ha	0,18	peçoas/ha	0,36
Dias de produção	Dias	360	Dias	360
Área ocupada	ha	400	ha	10
Rácio V/S	m ³ /m ²	0,25	m ³ /m ²	0,07
Eficiência de fixação de CO ₂	0	0,20	0	0,69
Grau de diluição	1/dia	0,02	1/dia	0,4
Volume total da cultura	m ³	1000000	m ³	7000

Produção total de biomassa	ton/ha/ano	108	ton/ha/ano	72
Consumo total de CO ₂	ton/ha/ano	988,2	ton/ha/ano	187,92
Evaporação total de água	ton/ha/ano	36000	ton/ha/ano	1800
Consumo de fertilizantes	kg/kg algae biomassa	0,3	kg/kg algae biomassa	0,3
Potência para crescimento e outros	kW.h/m ³	1	kW.h/m ³	1
Preço do fotobiorreator	€/m ³	2	€/m ³	2000
Capacidade do equipamento				
Unidade média de preparação	m ³ /h	2.000	m ³ /h	280
Processo de esterilização	m ³ /h	-	m ³ /h	280
Ventilador de ar	m ³ /h	-	m ³ /h	42.000
Fotobiorreatores	m ³	1.000.000	m ³	7.000
Unidade de sedimentação	m ³ /h	2.000	m ³ /h	280
Tanque de crescimento	m ³	200	m ³	28
Unidade de decantação	m ³ /h	200	m ³ /h	28
Bomba para crescimento	m ³ /h	200	m ³ /h	28
Unidade de fornecimento de CO ₂	Kg/h	109.800	Kg/h	522

Quadro 6 - Dados relativos ao transporte do CO₂

Transporte por gasoduto		Origem dos dados
Pressão, Pa	6000	1
Eficiência adiabática da pressurização	80,0%	1
Eficiência do motor elétrico	95,0%	1
Distância do transporte, m	100	2

¹ Devido à variação de dados relativamente a este valor, optou-se por usar o definido por defeito do modelo GREET.

² Este valor foi determinado assumindo que as instalações de conversão de biodiesel estão instaladas no mesmo espaço fabril.

Quadro 7 - Dados relativos à introdução do CO₂ na lagoa

Energia para introduzir o CO ₂ na lagoa		Origem dos dados
Profundidade da lagoa, m	0,4	³
Queda de pressão no difusor, Pa	7000	¹
Eficiência combinada do motor e pressurização	67%	¹

Os Quadros 6 e 7 descrevem os parâmetros que caracterizam o transporte do CO₂ que é usado para abastecer a lagoa de crescimento das microalgas.

Quadro 8 - Dados relativos aos parâmetros da lagoa

Parâmetros da lagoa		Origem dos dados
Energia de bombeamento de água para a lagoa, kW.h/L	1,1E-03	³
Energia de bombeamento de água na cultura, kW.h/L	5,6E-04	³
Fornecimento de CO ₂ , g/g(algas)	3,0	³
Produtividade específica, g/m ² /d	30,0	³
Potência de movimento da água da lagoa, W/m ³	2,0	³
Perdas por evaporação, L/g	0,2	³
Perdas de CO ₂	0,4	³
Concentração de algas na colheita, g/L	0,8	⁴

O Quadro 8 refere-se aos parâmetros técnicos da lagoa de crescimento das microalgas

³ Dados provenientes da Universidade de Almeria (Quadro 4).

⁴ Dados adquiridos na extração de biodiesel efetuada na Universidade de Aveiro

Quadro 9 - Dados relativos à extração do óleo

Extração		Origem dos dados
Local da extração	No local	2
Consumo de hexano, g/g-óleo produzido	30,3	4
Calor necessário, kW.h/g-óleo produzido	2,8	4
Fonte de calor	Eletricidade	4
Eletricidade requerida, kW.h/g-óleo produzido	8,5	4

No Quadro 9 estão apresentados os valores que dizem respeito aos consumos exigidos durante a extração do óleo.

Com o intuito de completar a informação necessária à ACV do biodiesel de microalgas, foi ainda necessário introduzir os dados relativos ao mix energético praticado em Portugal, em 2012, Quadro 10.

Quadro 10 - Dados relativos ao mix energético nacional [22]

Fonte	Percentagem
Hídrica	21
Eólica	4
Outras fontes renováveis	5
Gás Natural	26
Cogeração fóssil	10
Carvão	25
Outras fontes não renováveis	9

5. Resultados obtidos

Os resultados obtidos dividem-se em duas secções, na primeira encontram-se os valores obtidos para o cenário base – obtido a partir dos valores fornecidos pela Universidade de Almeria (crescimento das microalgas) e Universidade de Aveiro (extração e conversão do óleo) – e na segunda secção os resultados da análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade foi realizada tendo em conta a variação individual dos parâmetros de entrada, de modo a procurar qual a influência da sua variação nos resultados finais. Esta análise pode ser usada para otimizar a produção de biodiesel de microalgas, visto que através dos resultados obtidos se podem verificar quais são os processos onde se podem efetuar alterações que produzam reduções significativas da energia e emissões de CO₂ resultantes do processo de obtenção do biodiesel.

5.1. Cenário base

Após a introdução de dados recolhidos (Quadros 4 a 10) no modelo GREET, foi realizada a simulação destes, de modo a obter os valores das emissões de CO₂ e da energia associada ao processo de obtenção do biodiesel de microalgas. A análise efetuada foi do tipo “do poço-à-roda”, que, como referido no quarto capítulo, é a mais completa, sendo que já inclui a análise “do poço-à-bomba”.

Com os parâmetros definidos nos Quadros 3 a 7 foram obtidos os valores de energia e emissões de CO₂ de 3093 kW.h/km e 463 g/km, respetivamente.

Para o cenário base foram também comparadas as emissões de gases para a atmosfera e a energia consumida durante a produção do biodiesel de microalgas, quando se usa diferentes misturas do biocombustível com o diesel. As misturas usadas foram o BD10, BD30, BD50 e BD100; e os gases analisados foram o CO, o NO_x, as PM, os VOC e os gases de efeito de estufa CO₂, CH₄ e N₂O (Óxido Nitroso).

Nas emissões de CO, verificou-se que o gasóleo apresenta valores superiores às misturas de biodiesel (0,037 g/km), contrastando com o BD100 onde a emissão deste gás é menor (-0,029 g/km), sendo a diferença entre ambos de quase 200%. Como pode ser confirmado na figura 7 à medida que a mistura utilizada passa a conter uma maior

quantidade de biodiesel, as emissões de CO tendem a diminuir, verificando-se a descida desde os 0,037 g/km (para o diesel) até aos -0,029 g/km (para o BD100). O valor negativo apresentado mostra que neste caso ocorreu um sequestro de CO durante a obtenção do biocombustível.

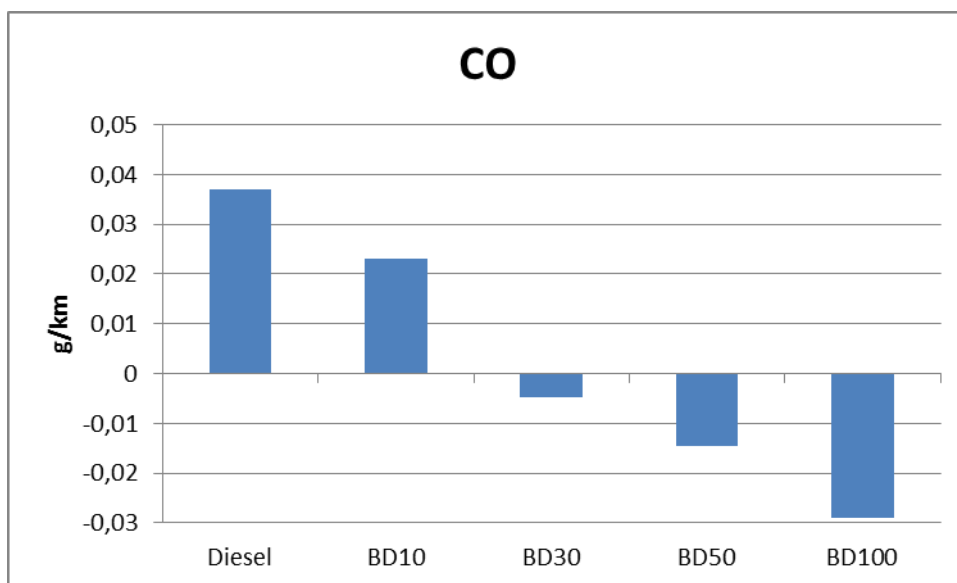


Figura 7 – Emissões de CO obtidas nos diferentes combustíveis

O gás que apresentou menores variações, 10%, em função da mistura de combustível usada foi o NOx (figura 8), onde o diesel registou o menor valor (0,839 g/km). Neste caso, foi com o biodiesel puro (BD100) que se registou o valor mais elevado (0,932 g/km), sendo a tendência a aumentar com o aumento do teor de biocombustível na mistura.

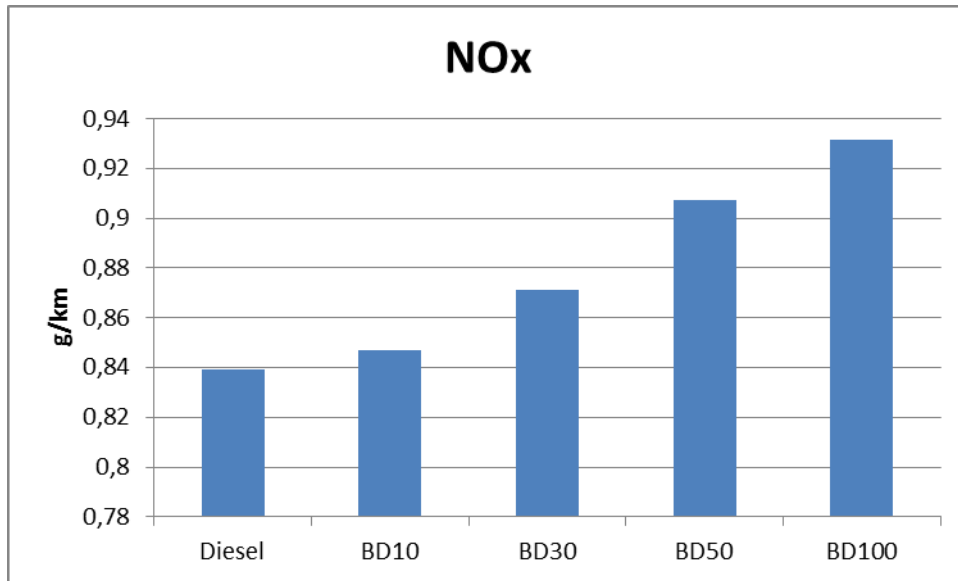


Figura 8 - Emissões de NOx obtidas nos diferentes combustíveis

Ao analisar a variação das partículas emitidas durante o ciclo de vida do biodiesel de microalgas (figura 9) verificou-se uma grande variação dos valores, chegando a ultrapassar os 100%. Foi novamente com o BD100 que se verificou o menor valor, -0,018 g/km, ao passo que o gasóleo convencional superou as outras misturas tendo atingido os 0,18 g/km.

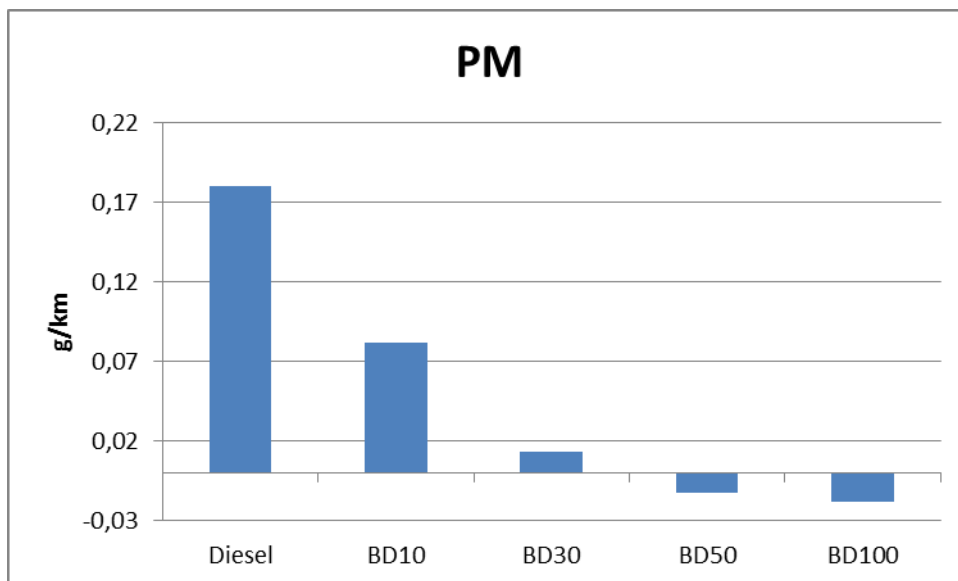


Figura 9 - Emissões de PM obtidas nos diferentes combustíveis

Foram também analisadas as emissões dos gases VOC (figura 10), onde se verificou um máximo para o gasóleo (0,039 g/km), tendo o valor mínimo ocorrido para o BD100 (0,004 g/km). Comparando o diesel com o biodiesel puro, observou-se que as emissões do diesel são 90% superiores relativamente ao biodiesel. Verificou-se que, com o aumento da mistura de biodiesel no gasóleo, as emissões deste gás tendem a diminuir.

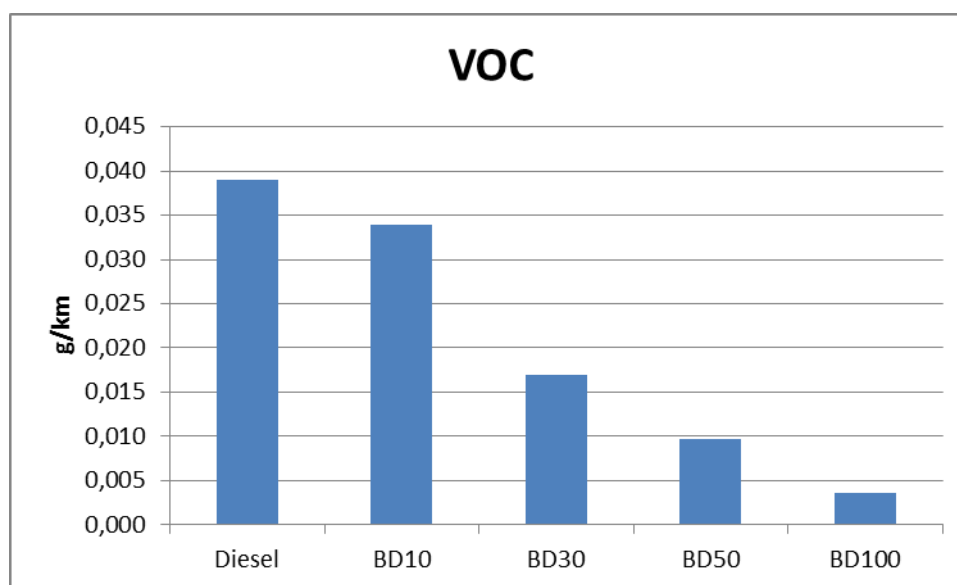


Figura 10 - Emissões de VOC obtidas nos diferentes combustíveis

Finalmente foram confrontadas as emissões de gases de efeito de estufa (figura 11), provando-se que o biodiesel emite menor quantidade destes gases (40 g/km) que o gasóleo (111 g/km). A diferença observada foi de 36% entre os casos de maior e menor emissão destes gases. Ao utilizar misturas de biodiesel foi verificado que as emissões de gases de efeito de estufa têm tendência a aumentar, quando a quantidade de gasóleo misturada aumenta.

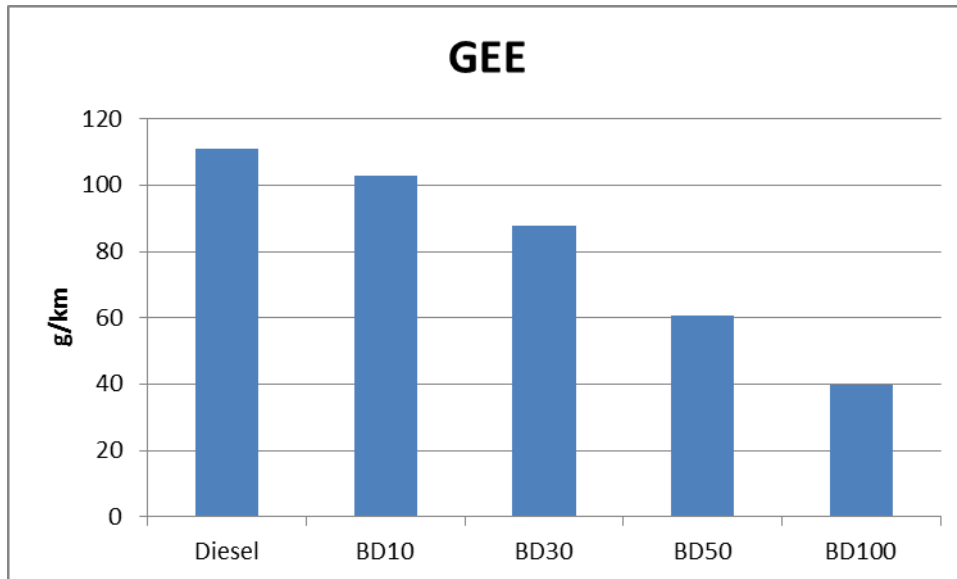


Figura 11 - Emissões de GEE obtidas nos diferentes combustíveis

Analisando de uma forma global as emissões de gases durante a obtenção de biodiesel, observam-se dois casos distintos: à exceção do NO_x, os restantes gases mostram tendência a ser menores no biodiesel relativamente ao diesel; apenas o NO_x apresenta maiores emissões para o biodiesel. Este fenómeno pode ser explicado tendo em conta que o NO_x é libertado durante a operação do veículo, e no caso da utilização de BD100, esta parcela tem um maior peso. Nos restantes gases, a tendência mostrada é de maiores emissões no gasóleo, pois estes gases são emitidos maioritariamente durante a produção do combustível e na conversão de matéria-prima. Os valores negativos observados devem-se ao facto de haver sequestro de gases durante o ciclo de vida do biodiesel, quando o sequestro é superior às emissões efetuadas do mesmo gás.

Outro resultado interessante de se analisar é a energia envolvida no processo, que se pode dividir em três componentes: a energia associada à operação do veículo, a energia despendida na produção do combustível, e a energia necessária à conversão de matéria-prima. Esta comparação pode ser vista através da figura 12. Observou-se que a grande diferença entre o gasóleo e o biodiesel está na componente relativa à matéria-prima, que no caso do biodiesel é algo superior – desde 5,2% no diesel até 60% no BD100. Ao usar biodiesel a parcela que diz respeito ao combustível é inferior a zero, o que neste caso se deve à utilização de uma parte na alocação dos coprodutos derivados.

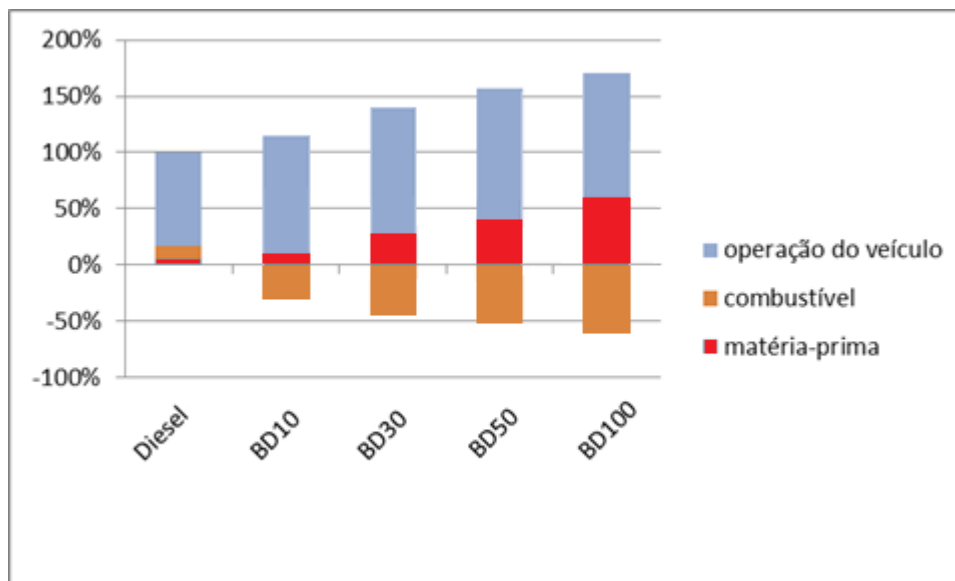


Figura 12 - Percentagem associada às diferentes componentes da energia.

5.2. Análise de sensibilidade

Na análise de sensibilidade foi estudada a influência da variação de diversos parâmetros. No entanto, apenas são apresentados os parâmetros para os quais foram obtidas diferenças no resultado final superior a 5% relativamente ao valor adquirido no primeiro cenário. Esta medida foi tomada tendo em consideração que está a ser analisado um modelo teórico e que é necessário levar em conta que, num caso prático de produção de biodiesel de microalgas, podem ser observadas pequenas diferenças entre os valores alcançados no modelo teórico e obtidos na prática. Visto que o objetivo da análise de sensibilidade é procurar onde podem ser feitas transformações no processo de obtenção do biodiesel de microalgas, de modo a otimizar a sua produção, não se justifica investir numa mudança que implique um aumento de eficiência do processo muito reduzido.

Os parâmetros escolhidos para a análise de sensibilidade foram os dados de entrada fornecidos pela Universidade de Almeria (Quadros 4 e 5), e os recolhidos na Universidade de Aveiro (Quadro 9), pois foi a partir destes que se iniciou a ACV de biodiesel de microalgas. O intervalo de valores a utilizar na variação em estudo foi o fornecido no mesmo documento, onde se compararam dois cenários distintos, um optimista e um pessimista. Por conseguinte o intervalo de valores selecionado foi o

existente entre estes dois cenários, evitando deste modo o uso de valores fora de um intervalo coerente, que tornem a análise inviável.

Quadro 11 - Dados referentes ao processo de extração

Equipamento	Potência (W)	Tempo de atuação (h)
Agitador magnético	1020	3,00
Agitador ultrassons	720	2,00
Centrifugador	1100	0,08

Os parâmetros estudados na análise de sensibilidade foram os seguintes:

- Mistura do biodiesel;
- Produtividade diária de biomassa;
- Quantidade de CO₂ absorvida;
- Quantidade de água evaporada;
- Percentagem de óleo constituinte da alga;
- Quantidade de hexano utilizada;
- Potência necessária para a extração;
- Profundidade da lagoa;
- Potência do mecanismo de movimento da água da lagoa;
- Pressão de transporte do CO₂ em gasoduto;
- Distância do gasoduto de CO₂.

Dos parâmetros apresentados apenas se verificou uma variação superior a 5% da energia consumida e da quantidade de CO₂ emitida nos seguintes parâmetros:

- Mistura do biodiesel;
- Produtividade diária de biomassa;
- Quantidade de CO₂ absorvida;
- Percentagem de óleo constituinte da alga;
- Potência do mecanismo de movimento da água da lagoa;

- Potência necessária para a extração.

Comparação da mistura de biodiesel

Para a variação da percentagem de biocombustível misturada com gasóleo de origem fóssil foram obtidas as variações registadas no Quadro 12. Nesta fase optou-se por considerar valores de mistura de biocombustível entre 100 e 10%, de modo a comparar gradualmente os impactos de um combustível 100% renovável e de um combustível fóssil com mistura de renovável.

Quadro 12 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à mistura de biodiesel

	BD10	BD30	BD50	BD100	Diesel
Energia	-78,8	-62,1	-44,7	-	-90,0
CO ₂	-47,4	-37,2	-26,5	-	-58,7

Explorando a influência da mistura de biocombustível com gasóleo de origem mineral, observa-se que a variação de energia envolvida no processo pode reduzir até 90%. No caso da emissão de CO₂, pode-se obter uma redução até 59%. Verifica-se que tanto o valor da energia como o das emissões tem tendência a diminuir com a redução da quantidade de biodiesel. Este fenómeno indica que a produção deste biocombustível é mais dispendiosa relativamente à obtenção de gasóleo de origem fóssil.

Percentagem de óleo que constitui as microalgas

Foi variado o tipo de alga usada na cultura de modo a avaliar a influência da percentagem de óleo que a alga pode conter. Considerou-se para o caso o uso da *Chlorella Vulgaris*, que permite uma variação de 11, 27 e 43% de óleo na sua constituição. Esta variação é conseguida através do crescimento da alga em diferentes meios alcalinos [23]. No Quadro 13, observa-se que quanto maior for a percentagem de óleo constituinte da algas, maior será a redução de energia e emissões. Neste caso, ao usar-se uma alga constituída por 43% de óleo em vez de 27%, pode reduzir-se a energia

Comparação de metodologias para análise de ciclo de vida de biodiesel

e as emissões em 48% e 37% respetivamente. Se se usar uma alga com um teor de 11% obtém-se um aumento de energia e emissões de 384% e 297%. Desta forma, vê-se que usando uma alga com maior quantidade de óleo são obtidos melhores resultados. Este facto era espectável visto que, ao usar uma alga que possua maior quantidade de óleo, vão ser obtidos menos desperdícios; ou, por outro lado, ao usar uma alga de elevado teor de óleo, a energia gasta na sua conversão será para obter mais óleo e menos biomassa sem valor energético.

Quadro 13 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à quantidade de óleo que constitui as microalgas, em %

	11%	27%	43%
Energia	383,5	-	-47,7
CO ₂	296,9	-	-37,4

Produção diária de biomassa

De modo a averiguar se a produtividade diária é um fator que influencia a produção de biodiesel de microalgas, este valor foi variado entre 20 e 30 g/m²/dia, que são os valores registados entre o cenário pessimista e otimista, respetivamente (Quadros 8 e 9), tendo sido acrescentado um ponto médio de modo a tornar mais perceptível a sua variação. Dos valores resultantes desta variação (Quadro 14), foi observado que se pode reduzir o consumo de energia em 12% e as emissões de CO₂ em 18%. Daqui conclui-se que o aumento da produtividade diária pode levar ao melhor aproveitamento dos recursos, pois desta maneira é possível reduzir tanto a energia como as emissões finais de CO₂ decorrentes do processo de obtenção de biodiesel de microalgas.

Quadro 14 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à produção diária de biomassa, em g/m²/dia

	20	25	30
Energia	-	-7,0	-11,8
CO ₂	-	-10,7	-17,9

Potência do sistema de movimento da água da lagoa

O mecanismo que movimenta a cultura das microalgas na lagoa – um sistema de pás mecânicas – representa uma parcela da componente elétrica na produção do biodiesel de microalgas. Mais uma vez a comparação de valores é feita entre os dois cenários dos Quadros 8 e 9. Os resultados obtidos na variação deste parâmetro encontram-se no Quadro 15, onde se verifica que usando metade da energia despendida no movimento da água da lagoa se pode reduzir as emissões de CO₂ em 26%, e a energia em 16%. Como seria de esperar, o aumento da energia associada à cultura das microalgas, faz com que a energia e as emissões totais do processo aumentem também. O aumento da energia envolvida numa parte do processo aumenta diretamente a energia total inerente ao processo.

Quadro 15 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à potência de movimento da água da lagoa, em W/m³

	1	1,5	2
Energia	-15,9	-10,6	-
CO ₂	-26,1	-17,3	-

Quantidade de CO₂ introduzida na cultura

De modo a saber se a quantidade de CO₂ introduzida na lagoa é um fator de peso na produção de biodiesel de microalgas, foi analisada a sua influência no consumo de energia e emissões de CO₂ finais. Tal como nos casos anteriores a sensibilidade foi testada entre os dois cenários já referidos.

Pela análise do Quadro 16, conclui-se que este fator não é dos mais relevantes, pois a variação nos resultados foi quase sempre inferior a 5%, apenas no caso de usar 9 g(CO₂)/g(biomassa) – 3 vezes superior ao valor inicial – se verificou um aumento de 7% das emissões de CO₂.

Quadro 16 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à quantidade de CO₂ introduzida na cultura, em g(CO₂) /g(biomassa)

	3	6	9
Energia	-	<5	<5
CO ₂	-	<5	7,1

Potência necessária para a extração

O último parâmetro cuja influência foi analisada foi a energia necessária à extração do óleo das algas e a respetiva conversão em biodiesel. Neste caso, os valores variantes foram obtidos tendo em conta o consumo energético dos dispositivos usados na extração do óleo das microalgas. Para tal foi calculado o consumo elétrico dos aparelhos durante o tempo durante o qual estiveram ativos, e considerou-se que estes usavam entre 60 e 100% da potência máxima disponível, com o intuito de criar um cenário onde o consumo é máximo, e outro onde o dispêndio de energia é mais contido.

Através do Quadro 17, pode-se verificar que a potência requerida pela extração do óleo das microalgas tem um peso considerável tanto na energia consumida como nas emissões de CO₂, podendo chegar a variação a 46% na energia e 48% nas emissões.

Quadro 17 - Variação percentual da análise de sensibilidade relativa à potência necessária à extração, em kW.h/g(óleo)

	8,5	6,4	4
Energia	-	-21,3	-45,6
CO ₂	-	-22,1	-47,5

6. Conclusões e trabalho futuro

O objetivo da presente dissertação foi comparar diferentes metodologias de ACV do biodiesel de microalgas. Para isso foram comparados alguns programas de simulação de ACV – nomeadamente o GREET, SimaPro e GEMIS – tendo sido explorados parâmetros como base de dados, a possibilidade de introdução de novos processos e materiais, e a adaptabilidade dos dados existentes ao caso de estudo. Após a seleção do *software* a usar (GREET) iniciou-se a compilação de dados relativos à ACV do biodiesel de microalgas, de modo a possibilitar a simulação dos resultados pretendidos, energia consumida e emissão de gases. Foi selecionado o GREET, atendendo a que já possui os processos e materiais essenciais ao tratamento da ACV do biodiesel de microalgas, ao passo que nos outros dois programas seria ainda preciso criar a sequência de produção do biocombustível e analisar as interações entre os diversos processos. Com os dados recolhidos seguiu-se a criação do cenário de partida, e elaborou-se a análise de sensibilidade aos parâmetros de produção do biodiesel de microalgas.

Após a análise de ACV efetuada, pôde observar-se a quantidade de energia e as emissões de CO₂ envolvidas na produção do biodiesel de microalgas, tendo sido estes valores comparados com os resultantes do diesel. A análise de sensibilidade permitiu averiguar quais são os aspetos onde devem ser efetuadas melhorias no sentido de otimizar o processo de obtenção do biodiesel.

No estudo do cenário base criado, concluiu-se que a energia total associada à produção, calculada pela análise “do poço-à-roda”, foi de 3093 kW.h/km e as emissões de CO₂ foram de 463 g/km. Estes resultados foram obtidos para uma situação de utilização de BD100, produtividade diária de 20 g(biomassa)/m²/dia, quantidade de CO₂ introduzida na lagoa de 3 g(CO₂)/g(biomassa), percentagem de óleo na alga de 27% e uma potência do mecanismo de movimentação da água da lagoa de 2 W/m³. No caso do gasóleo convencional a energia associada à produção foi 39% inferior, já as emissões de CO₂ mostraram ser 34% superiores.

Na análise de sensibilidade, foi determinado que os parâmetros onde são obtidas maiores variações de resultados são a mistura de biodiesel usada, a produtividade diária de biomassa, a quantidade de CO₂ inserida na cultura, a percentagem de óleo que constitui as algas e a potência do mecanismo que movimenta a água na lagoa. Com estes resultados, sabe-se que aqueles são os parâmetros em que se deve investir para

otimizar o processo de obtenção do biodiesel de microalgas. As melhorias obtidas relativamente ao cenário testado inicialmente foram as seguintes:

- Para o caso da mistura de biocombustível: -79% de energia e -47% de emissões de CO₂, para uma mistura de BD10.
- Produtividade diária de biomassa: -12% de energia e -18% de emissões de CO₂, ao utilizar-se uma produção de 30 g/m²/dia.
- Quantidade de CO₂ introduzida: -7% de emissões de CO₂, na quantidade de 9 g(CO₂)/g(biomassa).
- Percentagem de óleo constituinte da alga: -48% de energia e -38% de emissões de CO₂, quando constituídas por 43% de óleo.
- Potência do mecanismo de movimento da água da lagoa: -16% de energia e -26% de emissões de CO₂, para uma potência de 1 W/m³.
- Potência necessária para a extração: -46% de energia e -48% de emissões de CO₂, ao reduzir o consumo de 8,5 para 4 kW.h/g(óleo produzido)

No caso da análise da mistura de combustível, observou-se que o valor mínimo de energia é apresentado quando é usada uma maior percentagem de gasóleo de origem mineral. Tal fenómeno é verificado uma vez que a produção de biodiesel de microalgas consome mais energia do que a produção de combustível fóssil – mais 39%; assim, quanto maior for a parcela de biodiesel usada, maior será o consumo de energia.

Quanto à produtividade diária de biomassa, o melhor valor registado verifica-se para uma maior quantidade de biomassa produzida. Assim, conclui-se que serão obtidos melhores resultados quanto maior for a produção diária de microalgas.

Relativamente à quantidade de CO₂ introduzida, mostrou-se que quanto mais CO₂ for fornecido á cultura, mais eficiente será o processo. Tal facto era de esperar, pois as microalgas estão a utilizar um produto do processo de obtenção de biodiesel. O CO₂ é um produto indesejável proveniente do processo, quanto maior for a quantidade consumida menos emissões finais de CO₂ serão obtidas. Uma situação ideal ocorreria se a quantidade de CO₂ absorvida pelas algas, fosse igual à produzida durante o ciclo de vida do biodiesel. Neste caso o balanço final seria nulo.

Ao analisar a influência da quantidade de óleo que constitui as algas, verifica-se que o aumento da percentagem de óleo na alga aumenta a eficiência do processo de obtenção

do biodiesel. Isto deve-se ao maior aproveitamento de biomassa durante o processo. Ao ser cultivada uma alga com maior proporção de óleo, o desperdício resultante da extração do óleo da alga é menor, e, quanto menores forem os resíduos resultantes do processo, menor será a parcela de tratamento dos mesmos, o que provoca uma redução na energia total despendida no ciclo de vida.

Uma parte do consumo energético associada à ACV pertence aos mecanismos elétricos. Neste caso, um dos fatores de grande peso é o mecanismo que permite o movimento da água da lagoa. Como é de esperar, quanto maior for a potência de uma máquina, maior é o seu consumo; por isso, ao aumentar o consumo do mecanismo de movimentação da água da lagoa, aumentou a energia total gasta durante o processo de obtenção do biodiesel de microalgas.

Como trabalho futuro seria importante verificar se os resultados obtidos com o modelo GREET se verificam na aplicação ao caso real. Por vezes os valores resultantes de cálculos teóricos tornam-se um pouco incertos relativamente a factos reais que não são levados em conta no modelo.

A análise realizada poderia ser complementada se fossem considerados os aspetos económicos associados ao processo, assim seria possível avaliar a viabilidade económica do biodiesel de microalgas.

Seria também interessante ver a evolução deste estudo ao longo do tempo, para averiguar a influência de novos métodos de produção nos resultados obtidos.

7. Referências bibliográficas

1. DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia (2010). Caracterização energética nacional. <http://www.dgeg.pt/>, acedido em 22/10/2012.
2. Malça, J. Freire, F. – Life-cycle studies of biodiesel in Europe: A review addressing the variability of results and modeling issues. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, nº 1 (2011), p.338-351
3. Figueiredo, F. (2011) – **Biodiesel de girassol ou microalgas em Portugal: Uma avaliação comparativa de ciclo de vida**, Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente, apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia do Ambiente da Universidade de Coimbra.
4. Ferrão, P. – **Introdução à gestão ambiental: A avaliação do ciclo de vida de produtos**. Editado pelo IST PRESS: Coleção Ensino de Ciência e Tecnologia, 1998. ISBN: 972-8469-05-05.
5. Ferreira, J. (2004) – **Gestão Ambiental: Análise de Ciclo de Vida dos Produtos**. Instituto Politécnico de Viseu.
6. Lardon, L. Hélias, A. Sialve, B. Steyer, J. Bernard, O. - Life-Cycle Assessment of biodiesel Production from Microalgae. Environmental Science and Technology. Vol. 43, nº 17 (2009), p. 6475-6481.
7. Sander, K. Murphy, G. – Life cycle analysis of algae biodiesel. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol. 15, nº7 (2010), p.704-714.
8. Singh, A. Olsen, S. – A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. Applied Energy. Vol. 88, nº 10 (2011), p. 3548-3555.
9. Yang, J. Xu, M. Zhang, X. Hu, Q. Sommerfeld, M. Chen, Y. – Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. Bio resource Technology. Vol. 102, nº1 (2010), p. 159-165.
10. Murakami, M. Ikenouchi, M. – The biological CO₂ fixation and utilization project by rite (2) — Screening and breeding of microalgae with high capability in fixing CO₂. Energy Conversion and Management. Vol 38, Suplemento (1997), p. S493-S497.
11. Singh, R. Sharma, S. – Development of suitable photobioreactor for algae production – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 16, nº4 (2012), p. 2347-2353.

12. Hou, J. Zhang, P. Yuan, X. Zheng, Y. – Life cycle assessment from soybean, jatropha and microalgae in China conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, nº 9 (2011), p. 5081-5091.
13. Ahmad, A. Yasin, N. Lim, J. Derek, C. – Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, nº 1 (2010), p. 584-593.
14. Campbell, P. Beer, T. Batten, D. – Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. Bioresource Technology. Vol. 102, nº 1 (2011), p. 50-56.
15. Khoo, H. Sharratt, P. Balasubramanian, P. Shaik, P. – Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons. Bioresource Technology. Vol. 102, nº 10 (2011), p. 5800-5807.
16. Miller, S. Theis, T. – Comparison of Life-Cycle Inventory Database: A Case Study Using Soybean Production. Journal of Industrial Ecology. Vol. 10, nº 1-2 (2006), p. 133-147.
17. Frank, E. Han, J. Palou-Rivera, I. Elgowainy, A. Wang, M. – User Manual for Algae Life-Cycle Analysis with GREET: Version 0.0. Argonne National Laboratory, (2011), [Consultado em 15/07/2012]. Disponível internet: <http://greet.es.anl.gov/publications>
18. Frank, E. Han, J. Palou-Rivera, I. Elgowainy, A. Wang, M. – Life-Cycle Analysis of Algal Lipid Fuels with the GREET Model. Argonne National Laboratory, (2011), [Consultado em 15/07/2012]. Disponível internet: <http://greet.es.anl.gov/publications>
19. Valente, M. (2010) – **Avaliação de ciclo de vida relativo a bens em contexto de 4R's. Casos de estudo**. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente, apresentada à Universidade de Aveiro.
20. Vale, A. Paiva, V. (2003) – **Avaliação do ciclo de vida de embalagens de 33 cl para néctares**. Projeto de investigação de Engenharia Química, faculdade de engenharia do Porto.
21. Davis, R. Fishman, D. Frank, E. Wigmosta, M. Aden, A. Coleman, A. Pienkos, P. Skaggs, R. Venteris, E. Wang, M. – Renewable Diesel from Algal Lipids: An integrated baseline for cost, emissions, and resource potential from a harmonized model. Argonne National Laboratory, (2011), [Consultado em 15/07/2012]. Disponível internet: <http://greet.es.anl.gov/publications>
22. <http://www.edpsu.pt>, consultado em 23/03/2012.
23. Mitra, D. Leeuwen, J. Lamsal, B. – Heterotrophic/mixotrophic cultivation of oleaginous *Chlorella vulgaris* on industrial co-products. Algal Research. Vol 1, nº 1 (2012), p. 40-48.