

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Henrique Silveira Winter

**Avaliação da viabilidade sócio-técnico-ambiental
do biodiesel proveniente de microalgas usando
a metodologia LCA (Life Cycle Assessment)**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Florian Alain Yannick Pradelle
Coorientador: Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Rio de Janeiro
Julho de 2019

Resumo

A maior parte dos cenários traçados por economistas são baseados em um aumento global da demanda de energia para os próximos anos. Entretanto, ao longo das últimas décadas os biocombustíveis são vistos por diversos pesquisadores como uma alternativa mais sustentável para a produção de energia em relação aos combustíveis fósseis. Este estudo é uma meta-análise da produção do biodiesel de microalgas com o intuito de obter uma perspectiva mais concreta dos impactos causados ao meio ambiente, traçando um comparativo com o diesel fóssil. Para isso, foi utilizado o método de avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* – LCA) para quatro indicadores de impacto distintos: o potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* – GWP) medido em $\text{gCO}_2 \text{ eq} / \text{MJ}$; a razão energética do biodiesel (*Energy Ratio* – ER), que é subdividida em razão energética líquida (*Net Energy Ratio* – NER) e retorno energético do investimento (*Energy Return of Investment* – EROI), ambos medidos em MJ/MJ; o uso de terra (*Land Use* – LU), medido em $\text{dm}^2\text{a} / \text{MJ}$; e por último o uso da água, dado em m^3 / MJ . Cada um dos indicadores foi subdividido em três diferentes perímetros (*Well-to-Gate* - WtG, *Well-to-Tank* – WtT e *Well-to-Wheel* – WtW) e dois métodos de cultivos para a produção de microalgas (*open raceway ponds* – ORP e *photobioreactors* – PBR), a fim de fazer as avaliações nas mesmas bases de comparação. Continuando os trabalhos de Carneiro (2017) e Pessôa (2018), foram avaliados 62 estudos e 119 cenários ao todo, sendo que cerca de 23% dos artigos avaliou somente a produção de óleo e biomassa, sem avançar para a produção do biodiesel. Uma das vantagens constatadas do biodiesel de microalgas é a menor utilização de terra, com cerca de $1,62 \text{ dm}^2\text{a} / \text{MJ}$, sendo que existem casos de cultivo de microalgas em terras não férteis, o que aumenta ainda mais a vantagem deste em relação à outros biocombustíveis ou ao diesel fóssil. Os resultados de potencial de aquecimento global apresentaram grande variabilidade, o que dificulta uma comparação com outros combustíveis. Traçando uma média geral, o GWP para o cultivo em ORP foi de $519 \text{ gCO}_2 \text{ eq} / \text{MJ}$ contra $1266 \text{ gCO}_2 \text{ eq} / \text{MJ}$ do cultivo em PBR. Por ter apresentado resultados melhores no GWP e no LU, o ORP parece ser uma tecnologia menos prejudicial ao meio ambiente. A razão energética do biodiesel de terceira geração não se comprovou sustentável em diversos casos avaliados,

sendo a média de NER de 1,66 e o EROI de 1,15. Os resultados do uso de água são escassos, impossibilitando traçar um paralelo com outros combustíveis.

Palavras-Chave

Microalgas; Biodiesel; Biocombustíveis; Avaliação do Ciclo de Vida (AVC); Potencial de Aquecimento Global (GWP); Razão Energética (ER); Uso de Terra (LU); Uso de Água;

Abstract

Most scenarios traced by economists are based on an overall increase in energy demand for the coming years. Over the last few decades, however, biofuels have been viewed by many researchers as a more sustainable alternative to fossil fuels. This study is a meta-analysis of the production of biodiesel from microalgae in order to obtain a more concrete perspective of the impacts caused to the environment, drawing a comparison with fossil diesel. For this, the Life Cycle Assessment (LCA) method was used for four distinct impact indicators: Global Warming Potential (GWP) measured in $\text{gCO}_2\text{eq}/\text{MJ}$ / MJ; the Energy Ratio (ER) ratio, which is subdivided into Net Energy Ratio (NER) and Energy Return of Investment (EROI), both measured in MJ / MJ; land use (Land Use - LU), measured in dm^2a / MJ; and lastly the use of water, given in m^3 / MJ. Each of the indicators was subdivided into three different perimeters (Well-to-Gate - WtG, Well-to-Tank - WtT and Well-to-Wheel - WtW) and two cultivation methods for open raceway ponds - ORP and photobioreactors - PBR) in order to make the assessments on the same basis of comparison. Continuing the work of Carneiro (2017) and Pessôa (2018), 62 studies and 119 scenarios were evaluated in the whole, and about 23% of the articles evaluated only the production of oil and biomass, without progressing to biodiesel production. One of the advantages of microalgae biodiesel is the lower land use, with around $1.62 \text{ m}^3/\text{MJ}$, and there are cases of microalgae cultivation on non-fertile land, which increases even more the advantage of this in relation to other biofuels or fossil diesel. The results of global warming potential presented great variability, which makes it difficult to compare with other fuels. Generally, the GWP for ORP cultivation was $519 \text{ gCO}_2\text{eq}/\text{MJ}$ against $1266 \text{ gCO}_2\text{eq}/\text{MJ}$ of the PBR culture. Because it presented better results in GWP and LU, ORP seems to be a less environmentally harmful technology. The energy ratio of third generation biodiesel was not found to be sustainable in several evaluated cases, the mean NER being 1.66 and the EROI around 1.15. The results of the use of water are scarce, making it impossible to draw a parallel with other fuels.

Keywords

Microalgae; Biodiesel; Bioduel; Life Cycle Assessment; Global Warming Potential (GWP); Energy Ratio (ER); Land Use (LU); Water Consumption

Sumário

1. Introdução	8
2. Objetivo	10
3. Revisão Bibliográfica	11
3.1 Biocombustíveis	11
3.2 Biorrefinarias.....	12
3.3 Microalgas.....	13
3.3.1 Sistemas de Cultivo.....	13
3.3.2 Condições de Cultivo	16
3.4 Produção do Biodiesel	16
3.4.1 Coleta e separação da biomassa.....	17
3.4.2 Extração do óleo.....	17
3.4.3 Produção do biodiesel	18
3.5 Apresentação Geral do Método ACV	18
3.5.1 Definição de objetivo e escopo	19
3.5.2 Análise de inventário.....	20
3.5.3 Avaliação de impactos.....	20
3.5.4 Interpretação dos resultados	21
4. Metodologia	22
5. Resultados	24
5.1 Distribuições	24
5.2 Impactos ambientais	29
5.2.1 Potencial de Aquecimento Global (GWP).....	30
5.2.2 Uso de Terra (LU).....	35
5.2.3 Razão Energética	37
5.2.4 Uso de Água.....	44
6. Conclusão Final	47
7. Referências	49

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura de Consumo no Setor de Transportes [Balanço Energético Nacional 2018, base de dados de 2017]	8
Figura 2 - Biorrefinaria de Microalgas [Koutinas, 2014]	12
Figura 3 - Open Raceway Ponds [Jorquera, 2010].....	14
Figura 4 - Fotobioreator Tubular [Jorquera, 2010].....	15
Figura 5 - Fotobioreator Planar [Jorquera, 2010].....	15
Figura 6 – Reação química da transesterificação catalisada de triglicerídeo (óleo) [Mata, 2010].....	18
Figura 7 - Estrutura da ACV. Fonte: ILCD handbook, 2010.....	19
Figura 8 - Número de publicações estudadas sobre biocombustíveis derivados de algas por ano.....	24
Figura 9 - Número de publicações LCA com foco em biocombustíveis derivados de algas	25
Figura 10 - Número de casos LCA com foco em biocombustíveis derivados de algas	26
Figura 11 - Número de casos estudados sobre biocombustíveis derivados de algas por ano e por tipo de cultivo	27
Figura 12 - Indicadores mais estudados nos casos analisados	27
Figura 13 - Perímetros mais usados no Inventário LCA	28
Figura 14 - Alocações mais utilizadas.....	29
Figura 15 - (a) Óleo & Biomassa - PBR - GWP.....	30
Figura 16 - (b) Óleo & Biomassa - ORP - GWP	30
Figura 17 - (a) WtG - ORP - GWP	31
Figura 18 - (b) WtG - PBR - GWP.....	31
Figura 19 - (c) WtG - PBR & ORP - GWP	31
Figura 20 - (a) WtT - ORP - GWP.....	32
Figura 21 - (b) WtT - PBR - GWP	33
Figura 22 - (a) WtW - ORP -GWP.....	33
Figura 23 - (b) WtW - PBR - GWP.....	34
Figura 24 - (c) WtW - PBR & ORP - GWP.....	34
Figura 25 - (a) WtG - LU.....	35
Figura 26 - (b) WtW - LU.....	36
Figura 27 - (c) WtT - LU.....	36
Figura 28 - (d) Óleo e Biomassa- LU	36
Figura 29 - (a) Óleo e Biomassa- ORP - Energy.....	38
Figura 30 - (b) Óleo e Biomassa- PBR - Energy	38
Figura 31 - (a) WtG - PBR & ORP - Energy Ratio.....	39
Figura 32 - (b) WtG - ORP - Energy Ratio.....	39
Figura 33 - (c) WtG - PBR - Energy.....	40
Figura 34 - (d) WtG - PBR & ORP - Energy Ratio.....	40
Figura 35 - (e) WtG - ORP - Energy Ratio.....	40
Figura 36 - (f) WtG - PBR - Energy Ratio	41
Figura 37 - (a) WtT - ORP - Energy.....	42
Figura 38 - (b) WtT - PBR - Energy	42
Figura 39 - (a) WtW - ORP - Energy	43
Figura 40 - (b) WtW - PBR & ORP - Energy	44
Figura 41 - (c) WtW - ORP - Energy.....	44
Figura 42 - (a) WtG - ORP - Uso de água.....	45

Figura 43 – (b) WtT - ORP - Uso de água.....	45
Figura 44 – (c) WtW - ORP - Uso de água.....	45

1. Introdução

A maior parte dos cenários traçados por economistas são baseados em um aumento global da demanda de energia para os próximos anos [Carneiro, 2017]. Já existem especulações em 2019 da proibição de veículos movidos à combustíveis fósseis como gasolina e diesel até 2040 em potências europeias, como no Reino Unido e Holanda. Com isso, ao longo das últimas décadas, os biocombustíveis são vistos por diversos pesquisadores como uma alternativa mais sustentável para a produção de energia em relação aos combustíveis fósseis. O Brasil é hoje um dos maiores produtores de etanol do mundo em 2019 e está progredindo muito na produção do biodiesel, principalmente após a lei federal de dezembro de 2017 que tornou obrigatória a adição de 10% biodiesel ao diesel comum. O grande sucesso dos biocombustíveis no país (que faz do Brasil um modelo a ser seguido) está diretamente ligado a quantidade de terra arável disponível no território nacional e ao clima favorável a produção da cana-de-açúcar (matéria prima para a produção do etanol). Apesar disso, ainda há muitas barreiras a serem quebradas para o país alcançar uma diminuição do consumo de combustíveis fósseis. O Balanço Energético Nacional de 2018 aponta que, em 2017, 79% do consumo de combustíveis do setor de transportes rodoviários (meio de transporte mais utilizado em todo o Brasil) é proveniente de fontes não renováveis como o petróleo. A Figura 1 apresenta a estrutura de consumo no setor de transporte ao longo dos anos.

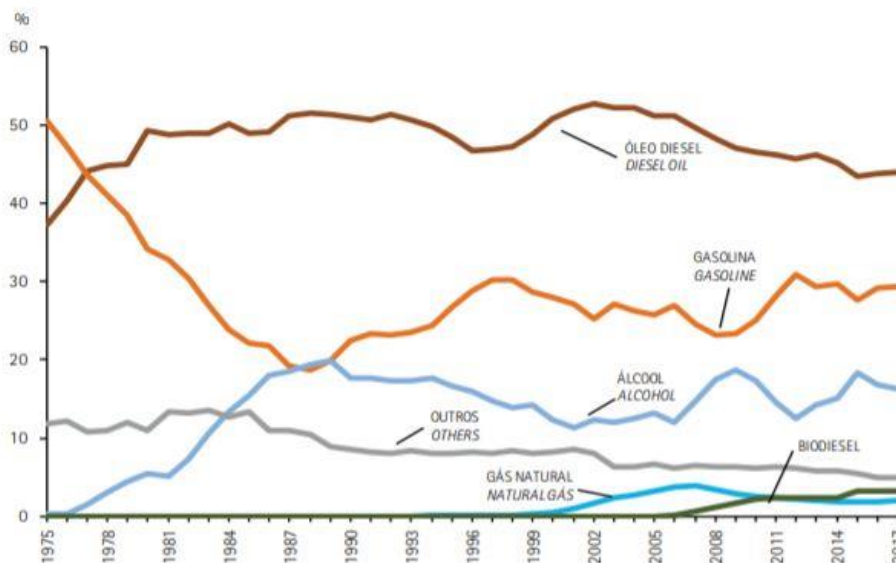


Figura 1 - Estrutura de Consumo no Setor de Transportes [Balanço Energético Nacional 2018, base de dados de 2017]

É possível observar um aumento substancial no consumo de biodiesel e a estabilização da utilização do álcool etílico (etanol) na faixa de 12 a 18%, dando uma perspectiva positiva de que o consumo de biocombustíveis tem aumentado e já está difundido no Brasil.

Por conta das políticas adotadas no em meados do século 20 para atrair indústrias automobilísticas, a maior parte do transporte de cargas e pessoas é feita pela extensa malha ferroviária, o que explica um consumo de diesel fóssil muito maior do que o consumo de outros combustíveis.

Uma gama de estudos mais recentes tem estudado o biodiesel proveniente de microalgas como um combustível com grande potencial, apesar de não existir uma produção comercial em larga escala deste que comprove essa expectativa, ou uma rota tecnológica madura que garanta uma maior eficiência energética do biodiesel em relação ao diesel comum.

2. Objetivo

O objetivo do estudo é avaliar a utilização do biodiesel proveniente de microalgas (terceira geração) como uma fonte alternativa de obtenção de energia. Para isso, serão levadas em consideração as contribuições de todas as etapas de produção (do poço a roda) em termos de aquecimento global, de uso de terra, de consumo de água e de eficiência energética do combustível. Serão analisados dados publicados na literatura, usando a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) para avaliar o impacto da maturidade das rotas estudadas para destacar os métodos mais eficientes de produção. A partir dessas análises, serão feitas comparações com outros biocombustíveis para podermos analisar a viabilidade da utilização da terceira geração de biocombustíveis. Note que o estudo será focado principalmente no contexto brasileiro, apesar de muitos resultados e dados também caberem em cenários de outros países.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Biocombustíveis

Os biocombustíveis são divididos em três gerações distintas. A primeira geração já é viável economicamente e produzida em escala industrial através de produções alimentícias como a cana de açúcar, a soja, o trigo, milho, girassol e etc. O grande debate envolvendo esse tipo de produção de biocombustíveis é a questão da competição por uso de terra arável com a indústria alimentícia, que pode gerar um aumento de preços nos produtos desse setor e, conseqüentemente, uma dificuldade na aceitação social da produção do biodiesel [Collet, 2011].

A segunda geração, produzida por resíduos de biomassa, plantações não comestíveis e rejeitos, e a terceira (algas, especialmente microalgas) estão sendo o foco de pesquisas e já foi observado um maior desenvolvimento dessas produções nos últimos anos [Carneiro, 2017]. Dentre as três, a última apresenta resultados promissores porque, estudos indicam que a capacidade de absorção de CO_2 na biomassa microalgal é de 10 a 50 maior que nas plantações terrestres [Ohse, 2007]. Além disso, esse tipo de produção permite a utilização de água não limpa para o cultivo, diferentemente de outros tipos de produção enquanto é alocado em terras não aráveis [Williams, 2009]. Entretanto, a colheita e a separação da biomassa nesse cultivo podem ser energeticamente demandantes, além de requerer aditivos químicos para a separação da biomassa. A colheita pode representar de 20 a 30% do custo total de produção e quando combinada com a extração do óleo, pode exceder 50% [Molina Grima *et al.*, 2003].

Avaliando todos os pontos, ainda existem restrições para a aplicação comercial desse tipo de produção que podem ser superadas com maior maturidade e efficientização dos processos existentes e, ao longo dos anos, com o advento de novas tecnologias. A utilização de técnicas que minimizam gastos energéticos e otimizam a produção, não só do combustível, mas também dos coprodutos, é o caminho para a viabilização do biodiesel da terceira geração.

3.2 Biorrefinarias

Para alcançar uma maior viabilidade econômica para a produção de biodiesel, é adotada uma abordagem de tipo biorrefinarias. O conceito é semelhante ao da refinaria de óleo que produz múltiplos combustíveis e coprodutos a partir do petróleo [Demirbas, 2008]. Estas instalações contemplam processos de conversão de biomassa e as tecnologias necessárias para produzir combustíveis, energia e produtos químicos com valor agregado, tendo como objetivo o mínimo desperdício de energia e emissões de poluentes e maximizar a rentabilidade da planta. O aproveitamento de produtos e minimização de gastos energéticos tornam a produção de biodiesel mais economicamente atraente.

Uma biorrefinaria de microalgas é capaz de gerar coprodutos importantes como o glicerol, óleos, proteínas, carboidratos e minerais. A figura 2 abaixo ilustra uma biorrefinaria de microalgas.

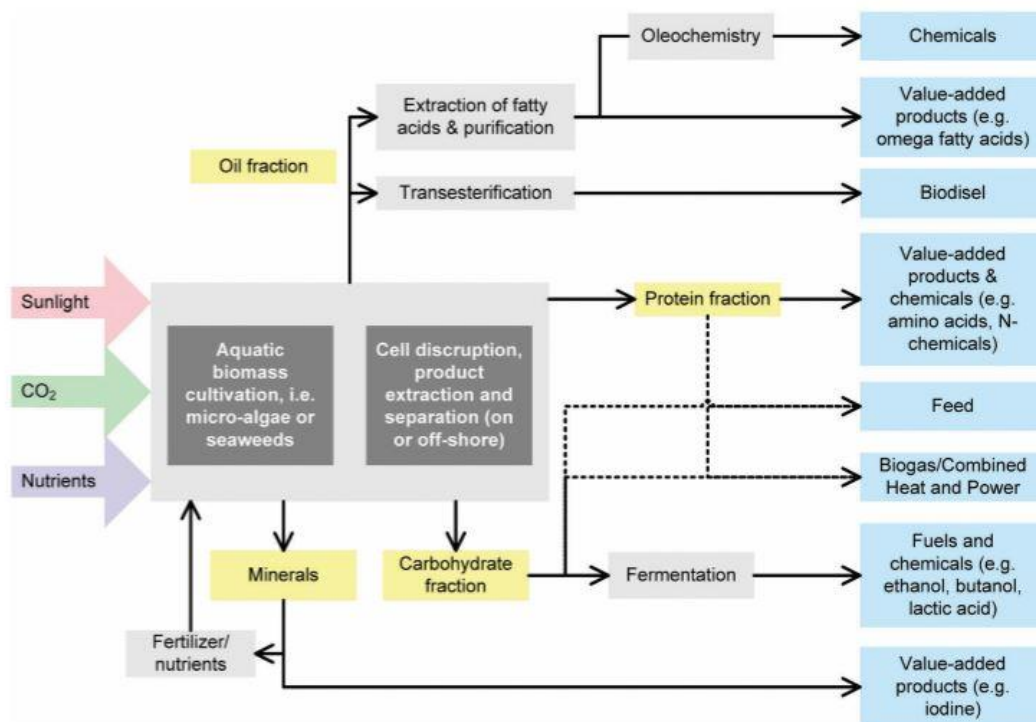


Figura 2 - Biorrefinaria de Microalgas [Koutinas, 2014]

Os coprodutos têm utilização em diversos campos industriais, como a glicerina por exemplo, que é um dos coprodutos da produção do biodiesel e pode ser empregada em diversos setores como o de cosméticos, saboaria, farmacêutico,

alimentício, entre outros [Mota, 2011]. Além disso, alguns outros servem como fonte para o próprio cultivo das microalgas [Koutinas, 2014]. Os rejeitos orgânicos podem ser queimados para geração de energia.

3.3 Microalgas

As microalgas são organismos unicelulares encontrados em água doce ou salgada. Dentre as diversas aplicações comerciais, as mais importantes são: alimentos naturais (*health food*); alimentos funcionais; aditivos alimentares; aquicultura; condicionadores de solo; indústria de cosméticos e aplicações na medicina [Derner, 2006].

3.3.1 Sistemas de Cultivo

A construção e instalação de sistemas de cultivo de microalgas tem alto custo em relação ao cultivo de plantas terrestres. Por outro lado, a luz do sol é utilizada como fonte primária de energia, o que reduz o custo operacional. Estas duas considerações limitam o cultivo à larga escala à dois métodos principais, um aberto e um fechado, cada um com as suas vantagens e desvantagens [Chisti, 2007]. A implementação de um sistema de cultivo de microalgas deve levar em consideração alguns critérios como (i) oferta de água da região (além de sua composição química e salina) e a sua demanda nas etapas de cultivo, (ii) a topografia da terra e a sua competição com a agricultura, (iii) as condições climáticas, de temperatura, de evaporação e de precipitação e (iv) a facilidade de acesso aos nutrientes e carbono necessários para a produção de microalgas [Mata, 2010].

3.3.1.1 *Open Raceway Ponds (Cultivo Aberto)*

Os lagos abertos em formato de pista de corrida são utilizados para cultivar as microalgas em uma camada de 10 a 50 cm de água corrente, como mostrado na figura 3.

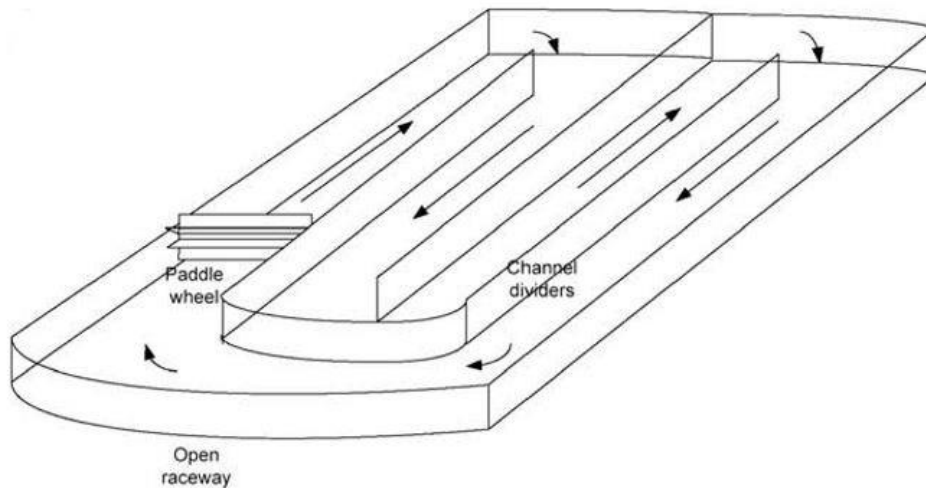


Figura 3 - Open Raceway Ponds [Jorquera, 2010]

Uma pá no circuito que gira com baixo custo energético garante o movimento e mistura constante da água e dos gases ao longo do circuito. Esse sistema utiliza a luz solar e o CO₂ proveniente da atmosfera como fonte de energia e carbono, respectivamente. Esse método, apesar de menor custo para construção e de mais fácil manutenção, apresenta altos níveis de contaminação por organismos indesejados que se instalam no cultivo (vide Tabela 1) e taxas de evaporação elevadas [Jorquera, 2010].

3.3.1.2 Fotobioreator (Cultivo Fechado)

Fotobioreatores podem ser tubulares ou planares e o fluido aquoso para o cultivo das algas escoa por dentro dos tubos ou placas. As figuras 4 e 5 abaixo explicitam as geometrias dos fotobioreatores.

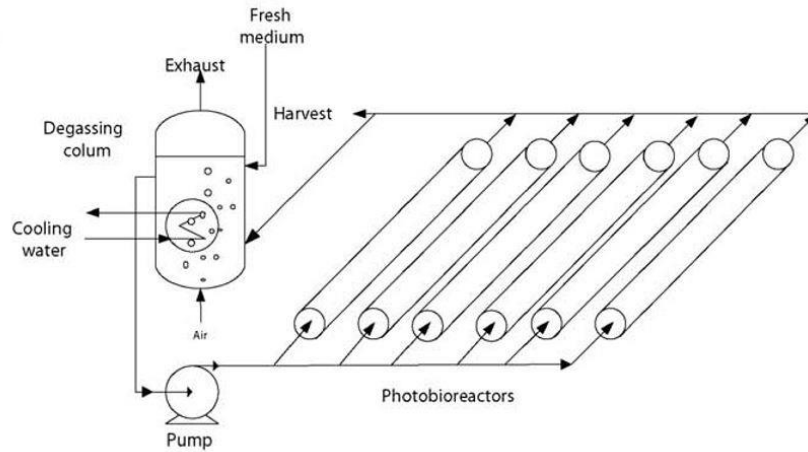


Figura 4 - Fotobioreator Tubular [Jorquera, 2010]

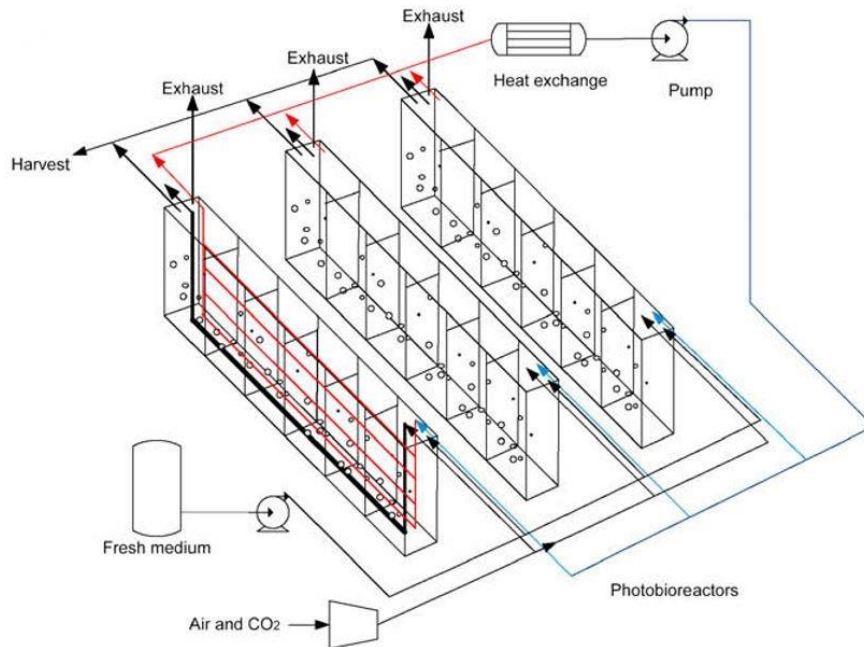


Figura 5 - Fotobioreator Planar [Jorquera, 2010]

Esses reatores são construídos com material transparente para que haja uma maior penetração de luz. Por serem meios fechados, eles permitem um maior controle das condições de cultivo e menor risco de contaminação por ser fechado e uma maior produção volumétrica. Contudo, os custos de implementação e operação são mais elevados quando comparados aos sistemas abertos [Jorquera, 2010].

A tabela 1 faz uma comparação dos parâmetros requeridos pelos dois tipos de cultivo abordados nesse estudo.

Parâmetro	Tanques (<i>raceway</i>)	Sistemas fechados (fotobiorreatores)
Espaço requerido	muito	pouco
Risco de contaminação	alto	médio a baixo
Perdas de água	alto	baixo
Concentração de oxigênio	usualmente baixa	deve ser removido continuamente
CO ₂ -perdas	alto	quase nenhuma
Reprodutibilidade da produção	variável, mas consistente	possível dentro de determinadas tolerâncias
Controle do processo	limitado	possível
Desgaste do material de construção	baixo	usualmente alto
Dependência de condições climáticas	alto	menor, por ser protegido
Temperatura	variável	necessário resfriamento
Custo de colheita	alto	médio
Manutenção	fácil	difícil
Custos de construção	médio	alto
Concentrações de biomassa na colheita	baixo	alto

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos sistemas de cultivo aberto e fechado [Franco, 2013]

3.3.2 Condições de Cultivo

As microalgas possuem três principais mecanismos para produzir material orgânico:

- Autotrófico, onde as microalgas utilizam a luz como fonte de energia e o CO₂ atmosférico como fonte de carbono;
- Heterotrófico, tendo compostos orgânicos como açúcares como fonte de energia e carbono;
- Mixotrófico, que é o tipo mais versátil, mas pouco representado nas pesquisas, porque as algas utilizam compostos orgânicos e inorgânicos como fonte de energia e CO₂ e compostos orgânicos como fonte de carbono.

3.4 Produção do Biodiesel

A produção do biodiesel a partir de biomassa de microalgas é separada em 3 etapas principais.

3.4.1 Coleta e separação da biomassa

A coleta consiste na recuperação da biomassa da cultura. Esta etapa contribui de 20 a 30% do custo de produção [Mata, 2010]. Existe vários métodos para essa separação e, de acordo com [Mata, 2010], os principais são:

- i. Centrifugação, que é eficiente, porém tem alta demanda energética e elevado custo de operação;
- ii. Biofloculação, que consiste na adição de polímeros catiônicos que aglomeram a massa de microalga em grandes flocos que facilitam a sua separação;
- iii. Coagulação, que garante um resultado semelhante à biofloculação por variação do pH ou adição de eletrólitos ao fluido com microalgas.

Como a biofloculação e a coagulação são processos de baixo custo e não contaminantes, é muito comum combinar um dos dois processos com uma centrifugação como último processo, barateando o custo da separação da biomassa e garantindo uma alta eficiência.

3.4.2 Extração do óleo

Essa etapa consiste na remoção de lipídeos e ácidos graxos da biomassa já separada. A extração pode ser obtida por prensagem (método muito utilizado para extrair óleo de sementes) ou extração por solventes químicos [Mata, 2010]. Como a produção do biodiesel é feita a partir de lipídeos neutros apenas, é aplicada uma separação dos lipídeos totais por extração em hexano ou etanol, garantindo que só os lipídeos neutros permaneçam. De acordo com Mata (2010), apesar do etanol ser um solvente muito eficiente, ele pode extrair componentes contaminantes como açúcares, aminoácidos, sais e pigmentos indesejados. Um estudo realizado por Cravotto *et al.* (2008) mostra que quando métodos de extração clássicos são auxiliados por ultrassom e micro-ondas, os óleos são extraídos com maior eficiência.

3.4.3 Produção do biodiesel

Para produção de biodiesel, o método mais comumente aplicado é a transesterificação catalisada, que consiste na mistura do óleo extraído da biomassa microalgal com um álcool na presença de um catalisador.

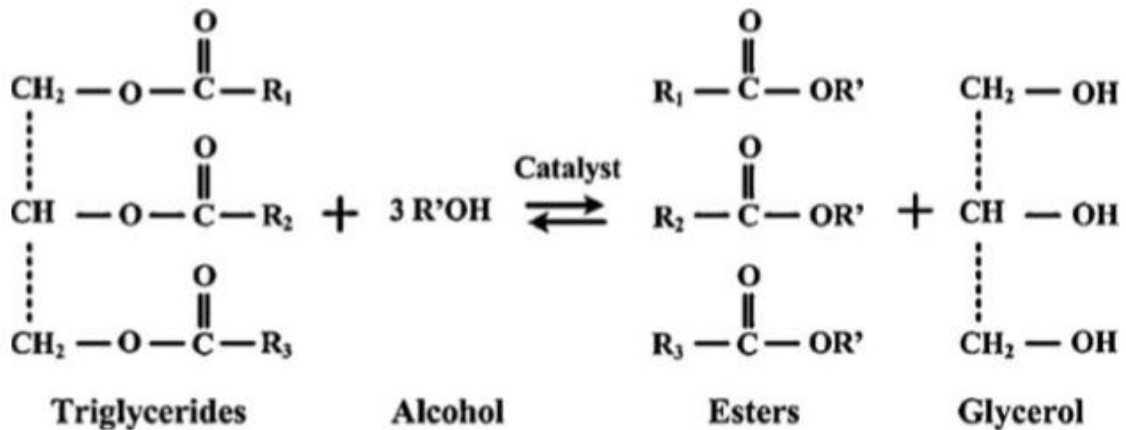


Figura 6 – Reação química da transesterificação catalisada de triglicerídeo (óleo) [Mata, 2010]

Alguns outros processos alternativos também podem ser aplicados, como a esterificação seguida de transesterificação ou até mesmo a extração do óleo e a transesterificação em uma única etapa, chamada de transesterificação *in situ* [Mata, 2010].

3.5 Apresentação Geral do Método ACV

Para o trabalho de conclusão de curso, será usada resultados obtidos pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), padronizada pelas normas ISO14040 e ISO14044. A ACV é um método de avaliação de impactos ambientais de um produto, levando em consideração todos os passos do ciclo de vida do produto, do poço a roda. A sua estrutura é dividida em 4 etapas: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto e interpretação dos resultados, como representado na figura 7.

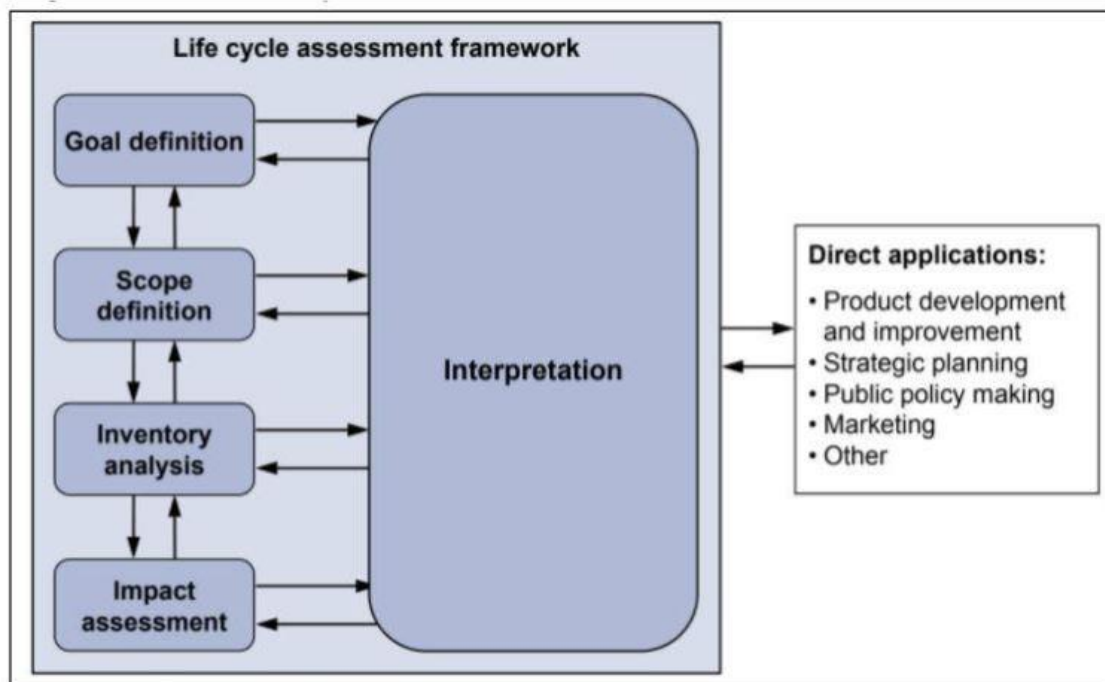


Figura 7 - Estrutura da ACV. Fonte: ILCD handbook, 2010.

3.5.1 Definição de objetivo e escopo

Nesta etapa, define-se o objetivo do estudo, além de definir o escopo e a unidade funcional que será adotada. A unidade funcional (FU) é uma unidade de referência para o sistema do produto com a qual entradas e saídas podem ser relacionadas. Diferentes escolhas de unidade funcional para um mesmo sistema podem acarretar diferentes resultados [Carneiro, 2017].

É neste momento também que se determina se a abordagem do método será por atribuição ou por consequência. Na primeira, as entradas e saídas do sistema são consideradas pelos seus ciclos de vida, dando uma visão estática para o sistema. Já na segunda abordagem, o sistema ganha uma característica mais dinâmica, levando em consideração mudanças climáticas associadas às etapas de desenvolvimento do produto. No caso de biocombustíveis, a abordagem consequencial é usada mais frequentemente, sendo o uso de terra direto e indireto o impacto que requer mais atenção, além dos outros que também serão abordados neste estudo [Carneiro, 2017].

3.5.2 Análise de inventário

A análise de inventário é a coleta de dados e procedimentos de cálculos para quantificar os fluxos de entrada e saída relevantes. Um fator de influência é a alocação dos coprodutos, que é a distribuição de impactos entre a unidade funcional e todos os coprodutos. Existem 4 formas de diferenciação definidos a seguir de acordo com Pessôa (2018):

- i. Alocação nula, onde todos os impactos são atribuídos ao produto principal, deixando os coprodutos com quantidade de emissões e consumo de recursos nulos;
- ii. Alocação econômica ou de valor de mercado, onde os impactos são distribuídos de acordo com o valor de mercado dos produtos;
- iii. Alocação por conteúdo mássico ou energético, no qual os impactos são distribuídos de acordo com alguma propriedade física do produto (massa ou energia);
- iv. Método de expansão do sistema (também chamado de substituição ou deslocamento), onde são atribuídos impactos substitutos aos coprodutos, ou seja, desconta qual seria o impacto do coproduto para ser produzido por um outro processo individual.

Dentre as opções descritas, é incomum encontrar a alocação nula como uma opção para avaliação de estudos de biocombustíveis, já que esse método distorce os resultados obtidos, não representando uma condição realística dos cenários estudados. Dentre as opções ii e iii, a alocação por conteúdo mássico ou energético leva uma pequena vantagem por apresentar um resultado estável com o tempo, diferentemente da alocação econômica que flutua de acordo com o mercado [Börjesson, 2011].

3.5.3 Avaliação de impactos

A avaliação de impactos tem como objetivo mensurar a magnitude e a significância do potencial de impacto ambiental de um produto ou serviço. Dentre várias categorias de impacto, é possível identificar as que mais influenciam no estudo pela fase de “Definição de Objetivo e Escopo” [Carneiro, 2017]. Para este estudo, serão consideradas:

- Potencial de aquecimento global resultante da contribuição do biocombustível para a mudança climática, dado por $\text{gCO}_2_{\text{eq}}/\text{MJ}$;
- Uso de terra, medido em $\text{dm}^2\cdot\text{a}/\text{MJ}$, que mede o potencial de uso de terra do biocombustível em um ano por unidade de energia de biocombustível. Esse indicador é extremamente importante do ponto de vista de aceitação social dos biocombustíveis, já que a terra demandada para o cultivo de microalgas pode, em alguns casos, competir com a indústria alimentícia. Este fator pode causar um fenômeno de deslocamento de plantações agrícolas para outras regiões, o que implica em consequências como o aumento do preço de produtos ou desmatamento de zonas florestais preservadas.
- Uso de água, que mede o consumo de água necessário na produção do biocombustível por unidade de energia, dado por m^3/MJ .

É também avaliado a razão energética, que analisa a quantidade de energia necessária para produzir 1 MJ de biocombustível. Este parâmetro de eficiência energética pode ser calculado de duas formas. A primeira é chamada de razão energética líquida (*Net Energy Ratio* - *NER*) e a segunda de retorno energético do investimento (*Energy Return on Investment* - *EROI*);

$$NER = \frac{\text{Total de energia produzida (biocombustível + co - produtos)}}{\text{Total de energia investida (fóssil + renovável)}}$$

$$EROI = \frac{\text{Total de energia produzida (biocombustível + co - produtos)}}{\text{Total de energia fóssil investida}}$$

A razão energética é a razão entre a energia produzida pelo total de energia investido no ciclo de vida. Esse medidor se dá em MJ/MJ, e pode ser calculado pela razão energética líquida (NER) ou pelo retorno energético do investimento (EROI). Para a produção de um biocombustível ser considerada sustentável, o valor de NER tem que ser superior à 1 MJ/MJ e o EROI tem que superar 3 MJ/MJ.

3.5.4 Interpretação dos resultados

Esta fase se baseia nas duas etapas anteriores da metodologia ACV para analisar a consistência do escopo e objetivo. Com base nos resultados obtidos, é possível descrever as limitações da metodologia [Carneiro, 2017].

4. Metodologia

São selecionados artigos que utilizaram o método ACV com uma unidade funcional relacionada a biodiesel de microalgas publicados entre 2009 e 2019, continuando o estudo de Pessoa (2018). Aos dados previamente analisados e aos que são adicionados, são acrescentadas a utilização da água como um dado de influência no ACV e também a origem dos dados. Cada artigo escolhido é analisado e é definido um cenário baseado na localização geográfica, no tipo de biocombustível e nas condições de contorno estabelecidas (unidade funcional, por exemplo).

Seguindo o estudo de Pessoa (2018), o biodiesel de terceira geração será investigado considerando uma unidade funcional de 1 MJ de acordo com três diferentes perímetros [Carneiro, 2017]:

- i. *Well to Gate* (WtG), que inclui o cultivo, a separação da biomassa e a transformação da massa algal em biodiesel;
- ii. *Well to Tank* (WtT), também conhecido como *Well to Pump*, que inclui o cultivo, a separação da biomassa, a transformação da massa algal em biodiesel e o transporte aos postos de gasolina;
- iii. *Well to Wheel* (WtW), que inclui o cultivo, a separação da biomassa, a transformação da massa algal em biodiesel, o transporte aos postos de gasolina e o uso do combustível nos motores dos veículos.

A escolha do perímetro depende unicamente do objetivo da análise da ACV. Espera-se comparar os resultados de cada caso pelas categorias de impacto selecionadas no estudo e em função tecnologia que foi utilizada (ORP ou PBR). Ao final, é possível, por meio da análise dos resultados, definir qual é a rota preferencial para a produção do biodiesel de terceira geração, assim como o seu grau de maturidade.

A partir da coleta de dados disponível na literatura ao longo desses anos, é traçado um comparativo entre os biocombustíveis (para as três gerações) e o diesel fóssil para as categorias de impactos previamente descritas, de acordo com a tabela abaixo retirada de Carneiro (2017).

	GWP ($gCO_2e q/MJ$)	LU ($dm^2 a/MJ$)	EROI (MJ/MJ)	NER (MJ/MJ)
WtG	87.0 ± 2.9	-	0.81	-
WtT	87.1 ± 4.2	-	0.88	5.13 ± 0.13
WtW	96.0	-	0.84 ± 0.01	5.55

Tabela 2 - Categorias de impacto por perímetro abordado. Adaptado de Carneiro, (2017) .

O mapeamento de dados e construção de indicadores permitem definir qual a rota mais eficiente entre o cultivo aberto e fechado com o intuito de chegar em conclusões sobre a viabilidade da utilização do biodiesel de terceira geração como uma fonte alternativa de produção de energia.

5. Resultados

Este estudo foi uma atualização das meta-análises de Carneiro (2017) e Pessoa (2018). Foram englobados 119 cenários de 62 artigos distintos de 2009 até 2018 ao todo, sendo que esta atualização abordou 20 cenários de 11 artigos, principalmente dos anos de 2017 e 2018.

Foi construído um banco de dados com as informações contidas na Tabela 3, o que permitiu que fossem montados gráficos com as distribuições geográfica, temporal e metodológica de todos os cenários.

Primeiro Autor	Ano	Título da publicação	País	Continente	Biocombustível	Geração	Biomassa	Horizonte de tempo	Processo de cultivo	Fonte de dados	Perímetro	Coprodutos armazenáveis	Coprodutos não armazenáveis	Método de alocação	Unidade Funcional	Potencial de aquecimento global (g CO ₂ eq/MJ)	Uso de terra (dm ² / MJ)	Razão energética Output / Input (-)	Uso de Água (m ³ /MJ)
----------------	-----	----------------------	------	------------	----------------	---------	----------	--------------------	---------------------	----------------	-----------	-------------------------	-----------------------------	--------------------	-------------------	---	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------

Tabela 3: Tópicos analisados para 62 artigos selecionados entre 2009 e 2018

5.1 Distribuições

Os artigos foram separados pelos anos de publicação, dando uma ideia geral da dinâmica da temática no mundo acadêmico. A Figura 8 mostra a distribuição das publicações ao longo dos anos.

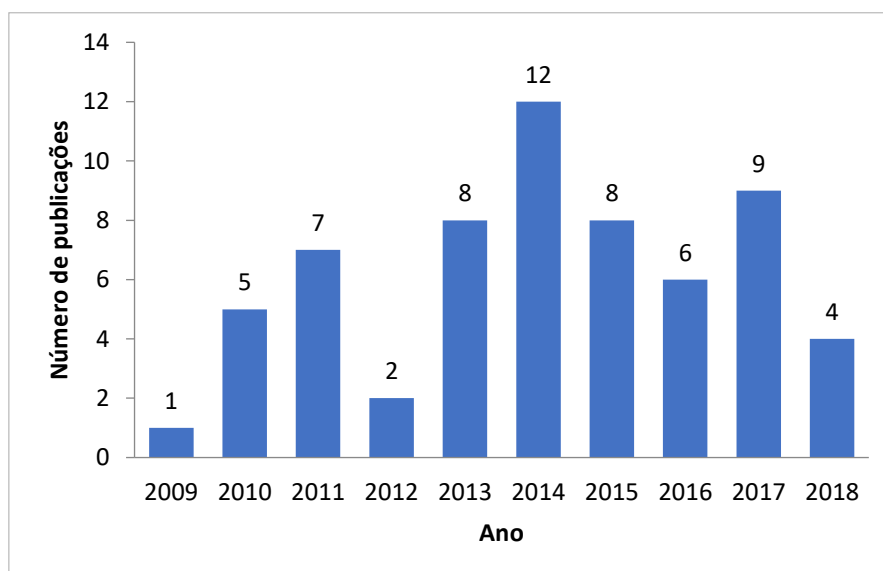


Figura 8 - Número de publicações estudadas sobre biocombustíveis derivados de algas por ano

É possível dizer que, a partir de 2013 existiu uma constância no número de publicações, fator este que mostra a importância que a comunidade científica tem dado aos estudos sobre os biocombustíveis feitos a partir de microalgas.

A Figura 9 mostra a distribuição geográfica das pesquisas, mostrando uma superioridade bastante significativa na quantidade de publicações nos EUA (48% das pesquisas) durante o período analisado. O Brasil ocupa uma fatia tímida da quantidade de pesquisas sobre a terceira geração com apenas 3% de aparições. Estes dados corroboram os analisados por Pessoa, (2018), que indicavam os EUA com 49% e o resto do mundo com 51%.

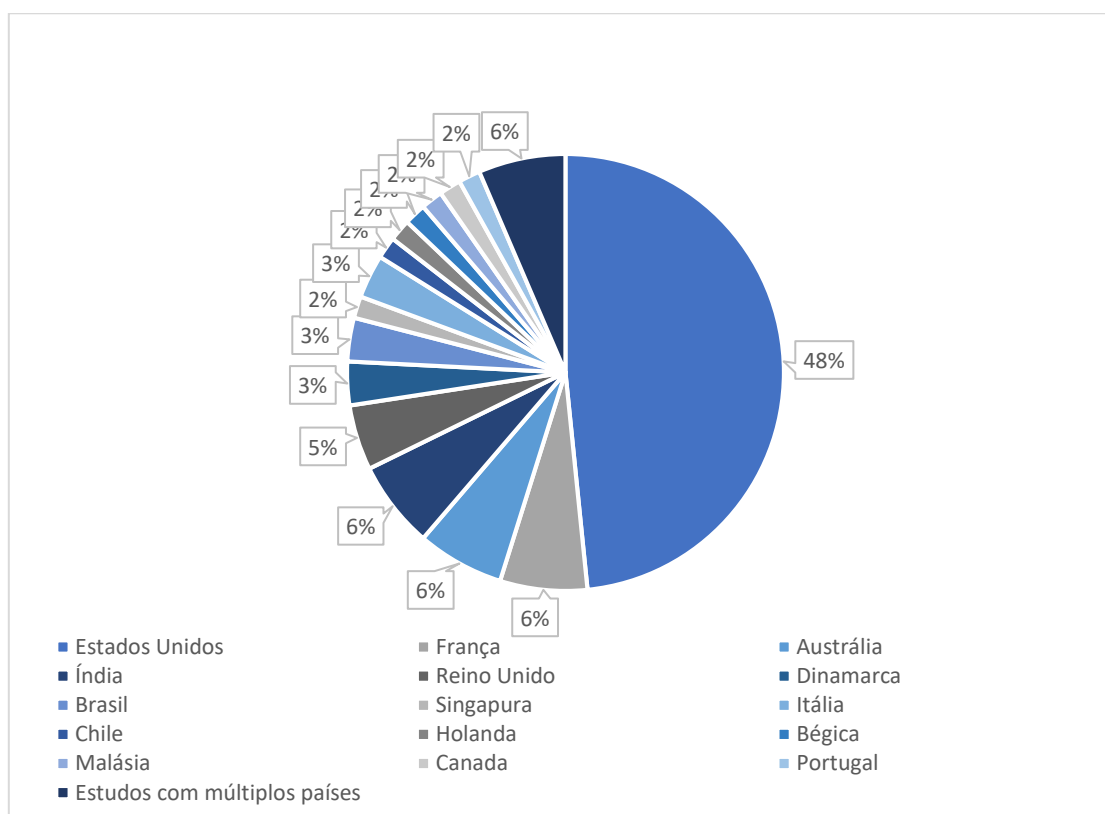


Figura 9 - Número de publicações LCA com foco em biocombustíveis derivados de algas

É possível fazer uma análise semelhante a partir da Figura 10, dessa vez comparando as pesquisas por continentes.

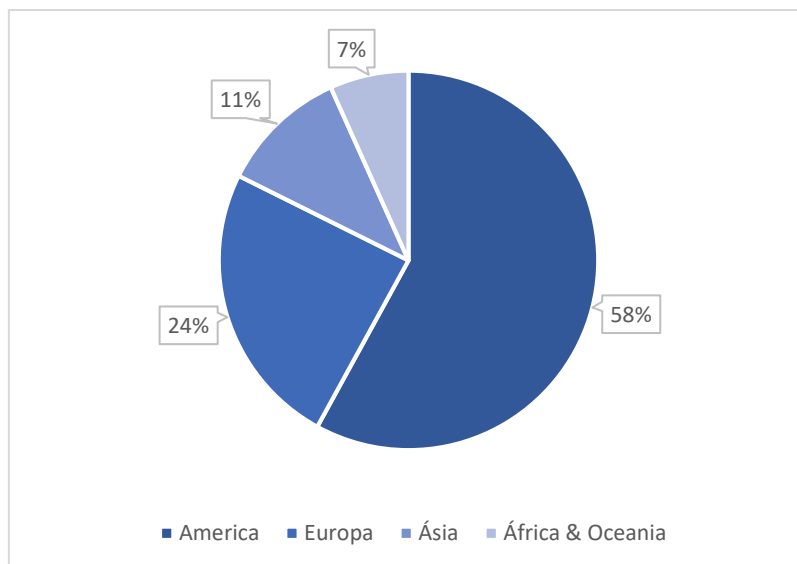


Figura 10 - Número de casos LCA com foco em biocombustíveis derivados de algas

Essa divisão geográfica mostra a superioridade da América em relação aos outros continentes, com 58% do total. A Europa aparece em segundo nessa análise com 24%, seguida da Ásia com 11% e da união entre África e Oceania com apenas 7% dos estudos, dados parecidos aos de Pessôa (2018) que mostraram 57%, 23%, 12% e 8%, respectivamente.

Analisando os tipos de cultivo de microalgas pela Figura 11, é possível ver que o modelo ORP é o que mais aparece nos estudos (69% dos casos analisados), o que pode ser explicado pelo baixo custo de aplicação e manutenção do sistema. O modelo de PBR estava presente em 20% dos estudos apesar do seu custo mais elevado de instalação. Existiram ainda cenários com uma produção híbrida utilizando as duas formas de cultivo já mencionadas, que somaram 8% do total. Os 3% restantes vem de métodos não abordados nesse trabalho.

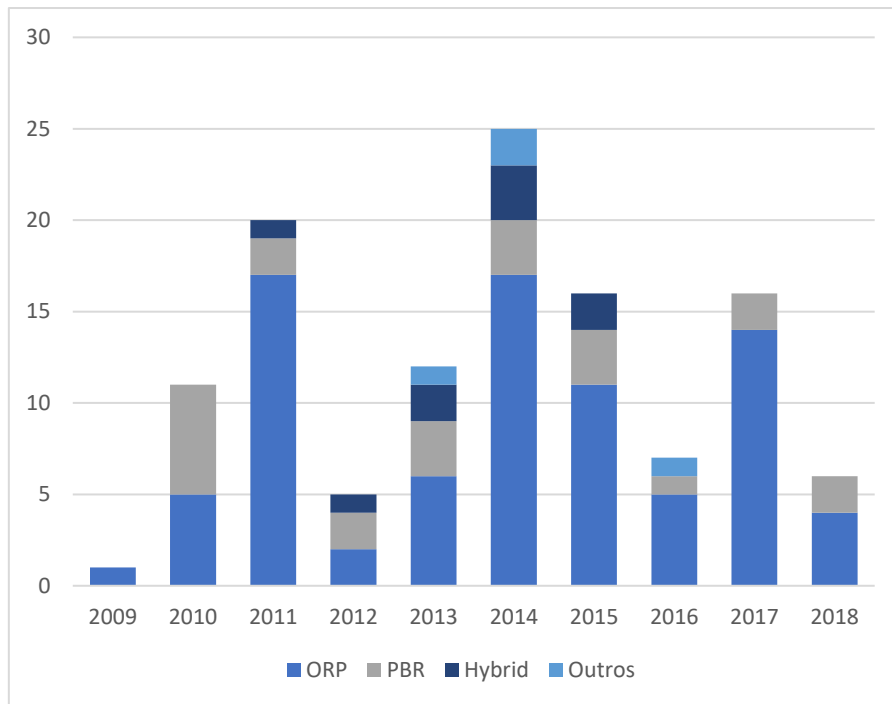


Figura 11 - Número de casos estudados sobre biocombustíveis derivados de algas por ano e por tipo de cultivo

Para as avaliações de impacto, é importante ressaltar que os artigos de ACV do biodiesel de microalgas não seguem uma regra sobre quais impactos ambientais deve ser avaliados. A Figura 12 mostra a quantidade de cenários abordados para cada um dos 4 indicadores que foram tratados neste trabalho.

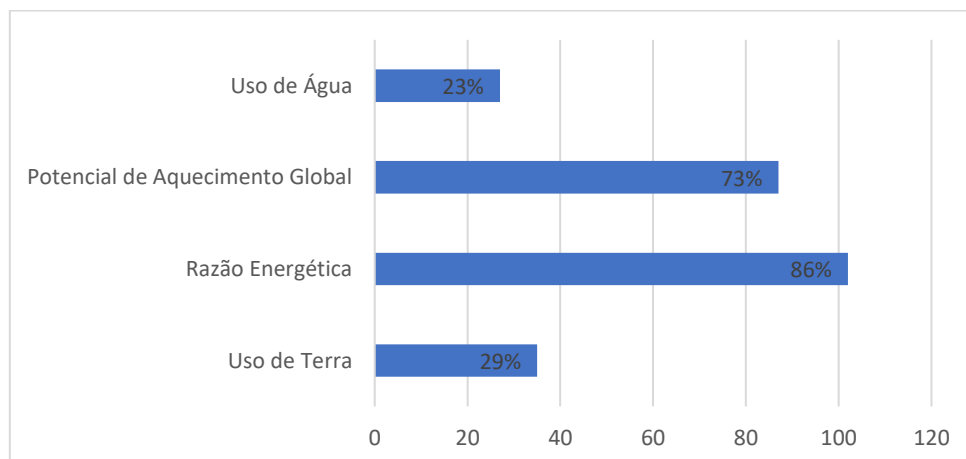


Figura 12 - Indicadores mais estudados nos casos analisados

O impacto que mais analisado foi a Razão Energética, presente em 102 dos 119 cenários com 86% de aparições. O Potencial de Aquecimento Global foi calculado em 87 casos, o Uso de Terra em 35 e o Uso de Água em 27 casos, sendo suas porcentagens de 73%, 29% e 23%, respectivamente. Os dois últimos indicadores são menos comuns nos estudos pelo elevado grau de complexidade

para serem calculados. Isso se deve por não existirem métodos precisos para as medições do Uso de Terra ou de Água, gerando uma maior incerteza.

O estudo de Pessôa (2018) encontrou resultados um pouco diferentes, onde 92% dos casos possuíam informações sobre a razão energética, 80% continham dados sobre o potencial de aquecimento global e 33% abordaram o uso de terra. Naquele estudo não foi avaliado o uso de água.

Dentre os perímetros avaliados nas avaliações de ciclo de vida do biodiesel, o mais recorrente foi o WtG por ser o menos abrangente e consequente o mais fácil de ser parametrizado. A implicação desse tipo de abordagem é a exclusão de fatores importantes no impacto ambiental, como o transporte do combustível aos postos de gasolina e a combustão dentro dos motores de ignição por compressão (que acarretariam em um aumento significativo dos impactos ambientais, que será explicado mais à frente neste estudo). O WtW aparece em segundo lugar no número de aparições, o que torna esses estudos os mais completos em termos de impactos ambientais. As porcentagens de casos estudados em cada perímetro estão descritas na Figura 13.

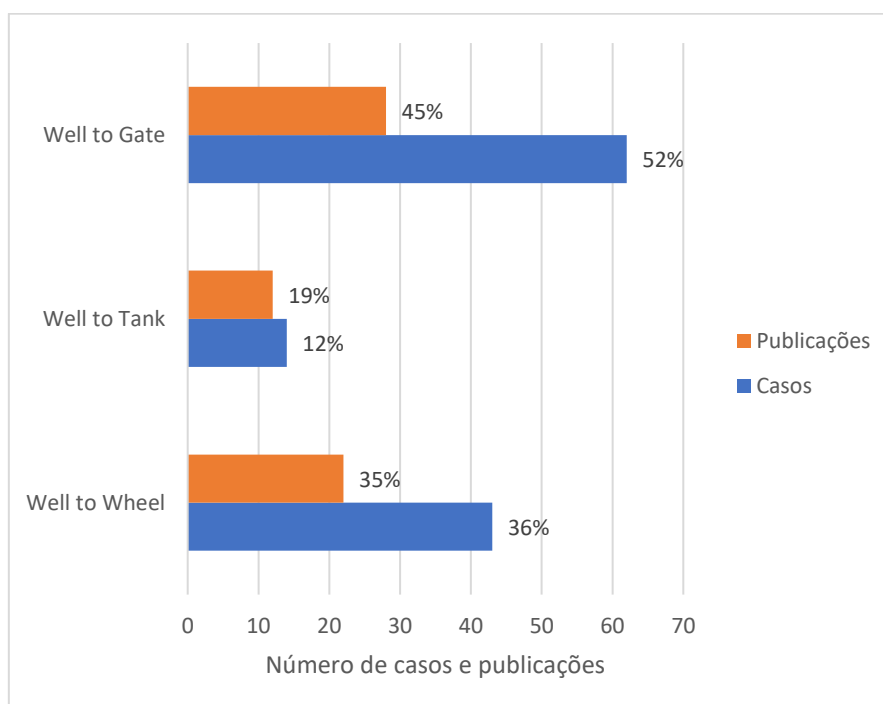


Figura 13 - Perímetros mais usados no Inventário LCA

Os tipos de alocações previamente descritos foram mapeados na Figura 14 para cada cenário dentro das 62 publicações estudadas. Em um fenômeno parecido ao relatado por Pessôa (2018), cerca de 29% dos casos não especificaram qual o tipo de alocação foi utilizado para os subprodutos gerados no processo de produção do biodiesel.

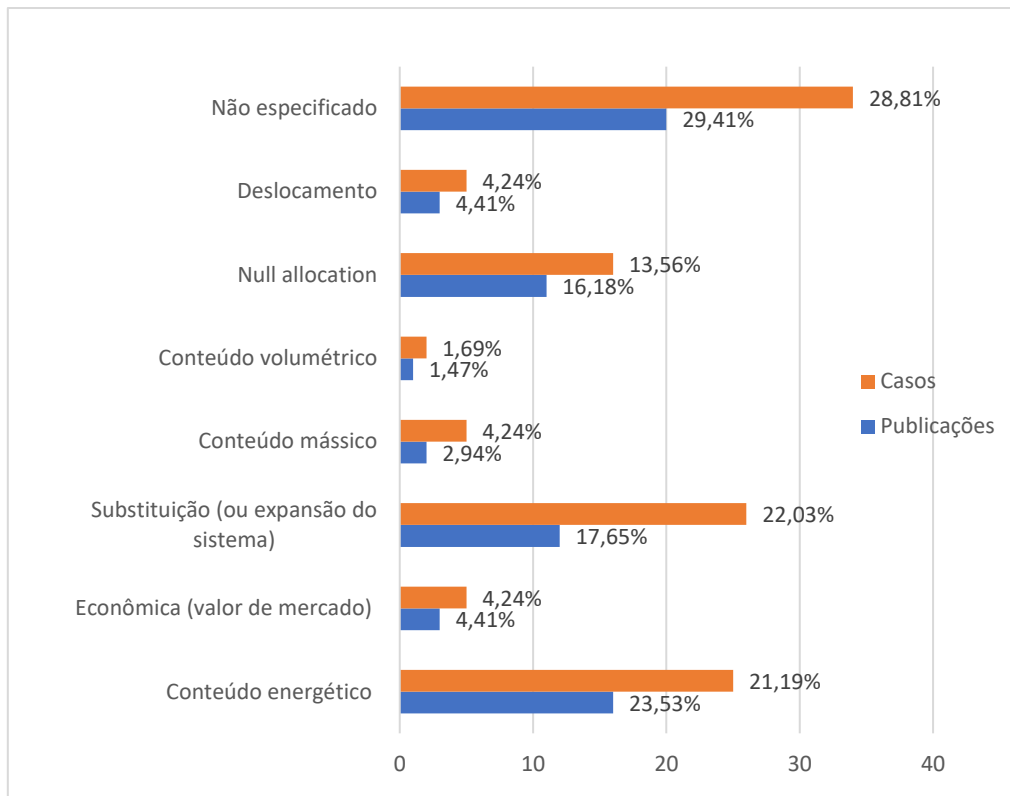


Figura 14 - Alocações mais utilizadas

Os valores percentuais obtidos foram parecidos com os retratados no estudo original, mostrando que a maior parte dos casos não especificou o tipo de alocação, sendo que o conteúdo energético e o método da substituição apresentaram valores próximos a 22%, vindo logo em seguida. A alocação nula, que dedica todo o impacto ambiental ao produto principal, também obteve uma aparição significativa com cerca de 16% das publicações, sendo o restante dividido entre o deslocamento, conteúdo mássico e o conteúdo volumétrico.

5.2 Impactos ambientais

A análise de impactos ambientais foi subdividida entre os quatro impactos abordados no estudo. Os gráficos foram separados pelo perímetro abordado em cada cenário. Cada impacto foi separado pelo tipo de cultivo em gráficos distintos para que pudessem ser identificadas as variações de impacto por diferentes formas de produção de microalgas. Os gráficos que serão apresentados a seguir foram representados por uma dispersão de valores encontrados em cada artigo, além de uma linha de referência (em laranja) para os dados de referência do diesel fóssil (encontrados na Tabela 2) e uma linha (em cinza) do valor médio dos pontos para cada ano.

5.2.1 Potencial de Aquecimento Global (GWP)

5.2.1.1 Óleo e Biomassa

O GWP gerados pela produção de óleo e biomassa foram divididos em dois gráficos: o gráfico (a), na Figura 15, para a produção de microalgas por PBR e (b), na Figura 16, para a produção por ORP. Esse tipo de medição não apresenta valores de referência de diesel fóssil para servir de comparação, então os dois gráficos são traçados com os pontos de dispersão e a linha para o valor médio anual. É possível observar que existem valores negativos ou muito próximos de zero para os dois casos, onde a absorção do dióxido de carbono na produção do óleo ou da biomassa chega a superar ou igualar a sua emissão (captura de CO₂). Como o tanque aberto capta mais carbono do ambiente por estar em contato direto com a atmosfera, os valores médios do gráfico de ORP são consideravelmente menores do que os valores do gráfico de PBR.

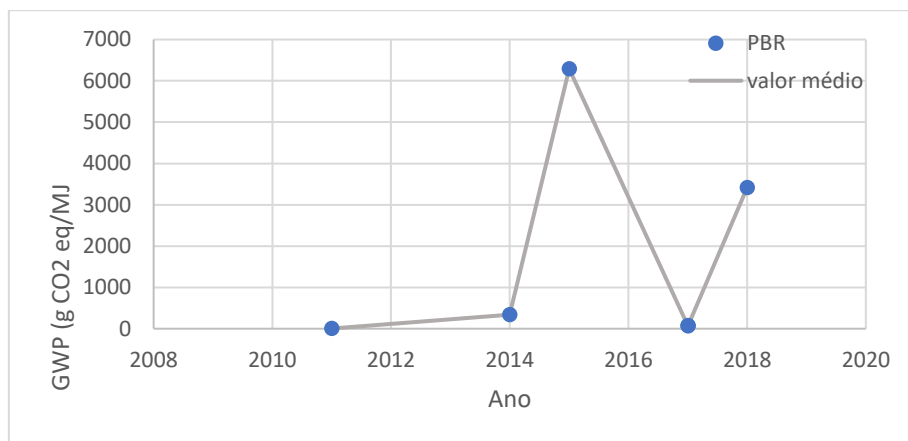


Figura 15 - (a) Óleo & Biomassa - PBR - GWP

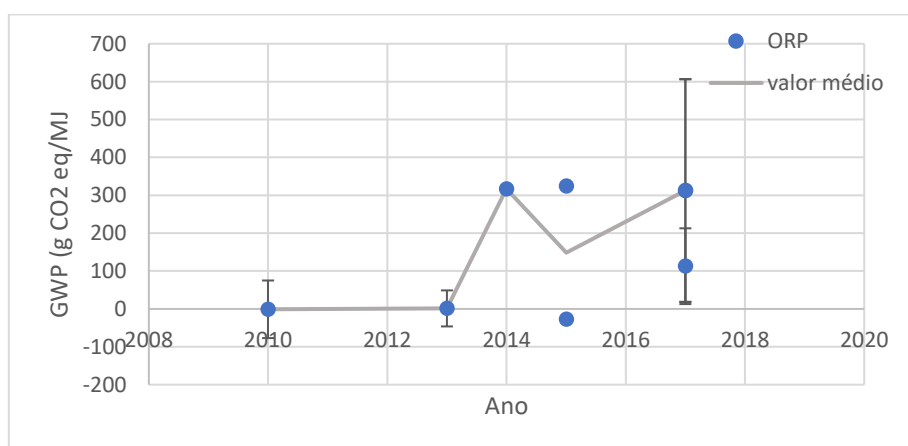


Figura 16 - (b) Óleo & Biomassa - ORP - GWP

5.2.1.2 Well to Gate (WtG)

As Figura 17, 18 e 19 mostram a distribuição do potencial de aquecimento global para o perímetro WtG para os diferentes tipos de cultivo.

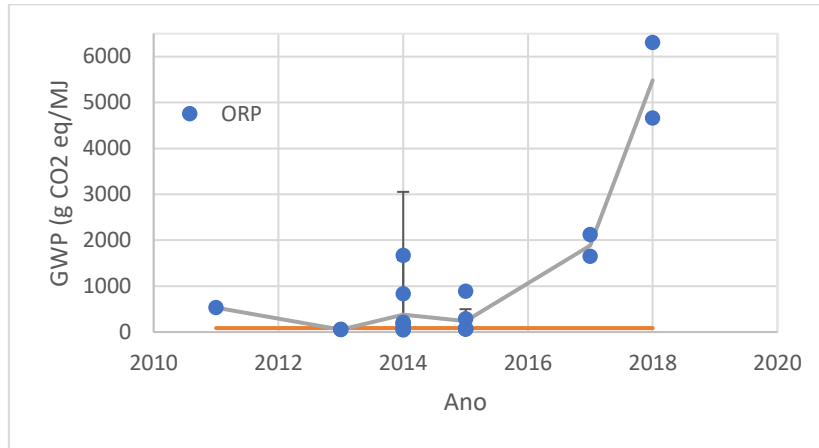


Figura 17 - (a) WtG - ORP - GWP

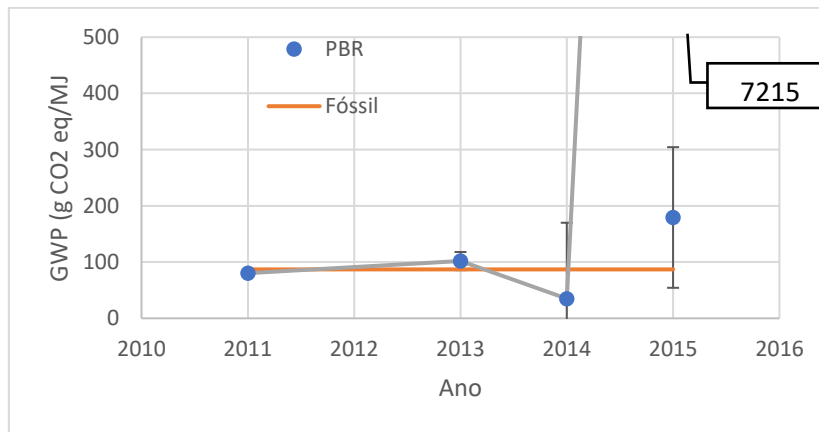


Figura 18 - (b) WtG - PBR - GWP

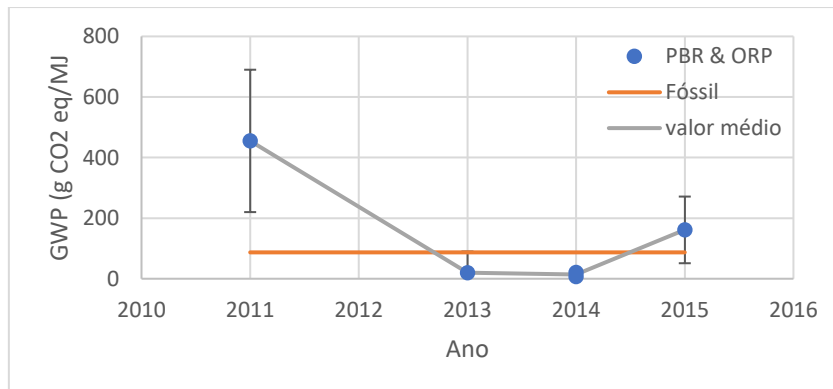


Figura 19 - (c) WtG - PBR & ORP - GWP

Existiu uma quantidade maior de estudos com a utilização do método ORP, garantindo um resultado mais conclusivo sobre esse tipo de cultivo. Apesar dos casos de PBR e híbrido apresentarem uma quantidade inferior de estudos, eles mostraram uma média de emissão de dióxido de carbono equivalente menor para a atmosfera, dificultando uma conclusão de tendência a ser seguida.

Os estudos ORP mostram uma constância de resultados até o ano de 2015, somente apresentando resultados fora da tendência nos estudos de 2017 e 2018 em casos que podem ser considerados pontuais, já que a aparecem em quantidade menor se comparados aos anos anteriores. A linha média não ultrapassa os $500 \text{ gCO}_{2eq}/\text{MJ}$, obtendo um resultado médio um pouco maior que PBR e que o cultivo híbrido.

Os casos de cultivo híbrido se mostraram uma possibilidade sustentável em relação ao potencial de aquecimento, apesar de necessitarem de mais estudos comprovando sua eficácia.

5.2.1.3 Well to Tank (WtT)

Apesar de ser um perímetro menos usual por ser um perímetro intermediário que ignora a queima do combustível nos motores, o WtT apareceu em alguns casos de ORP e PBR. As Figuras 20 e 21 mostram que o cultivo em tanques abertos aparece com um desempenho médio bastante superior ao diesel fóssil em termos de emissão de CO_2 .

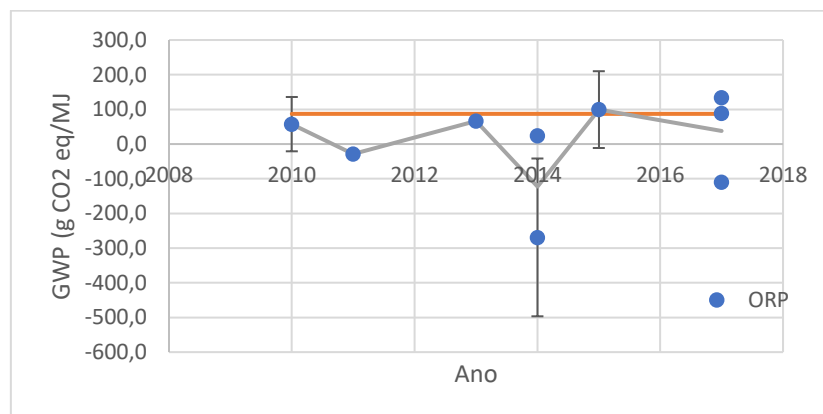


Figura 20 - (a) WtT - ORP - GWP

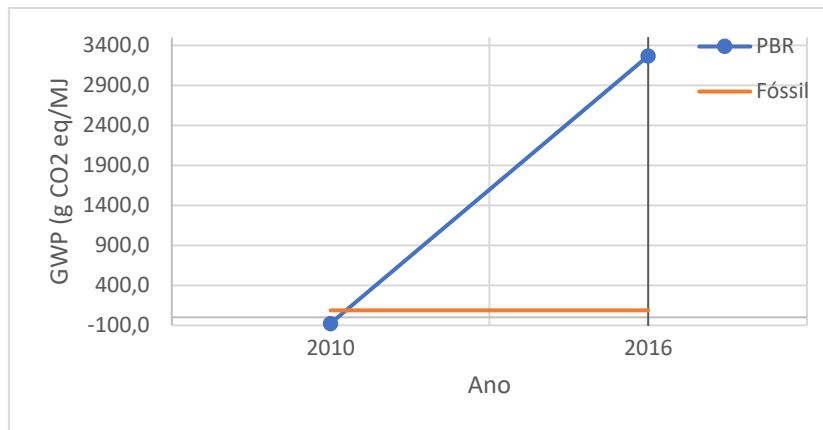


Figura 21 - (b) WtT - PBR - GWP

Esses resultados podem ser considerados sólidos por mostrarem uma distribuição de estudos ao longo dos anos com resultados bastante aproximados.

Por outro lado, o cultivo em photobiorreatores não pode ser considerado conclusivo para o WtT por mostrar apenas dois pontos com valores totalmente distintos. O cenário de Batan (2010) mostra uma emissão negativa de CO_2 , ou seja, uma captura do componente da atmosfera, ao passo que Monari (2016) possui um intervalo de possíveis emissões de -175 à $6710 \text{ gCO}_{2eq}/\text{MJ}$, impossibilitando uma conclusão pela grande variabilidade.

5.2.1.4 Well to Gate (WtW)

De maneira semelhante ao que aconteceu no perímetro WtT, o Well to Wheel também possui poucos resultados para os cultivos em PBR e híbrido. Como mostram as Figuras 22, 23 e 24, somente o cultivo aberto possui uma amostra de dados significativa, inviabilizando qualquer conclusão sobre a melhor alternativa.

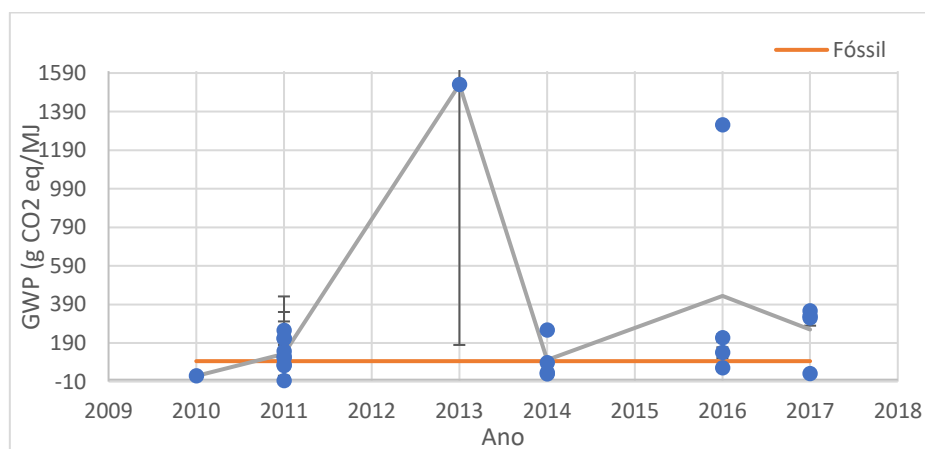


Figura 22 - (a) WtW - ORP - GWP

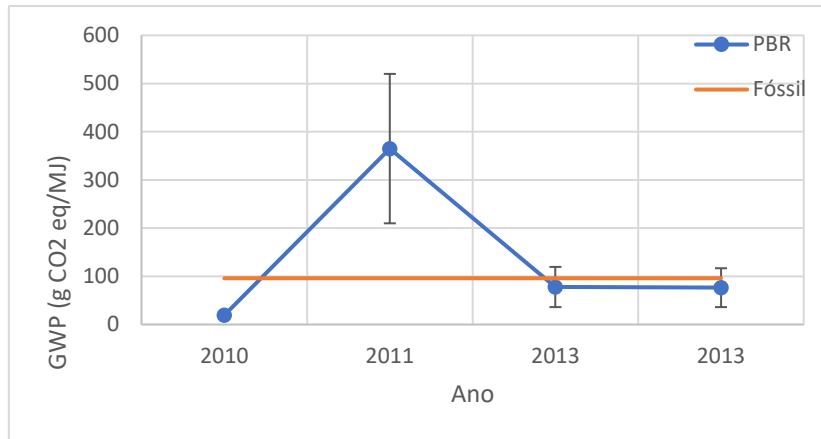


Figura 23 - (b) WtW - PBR - GWP

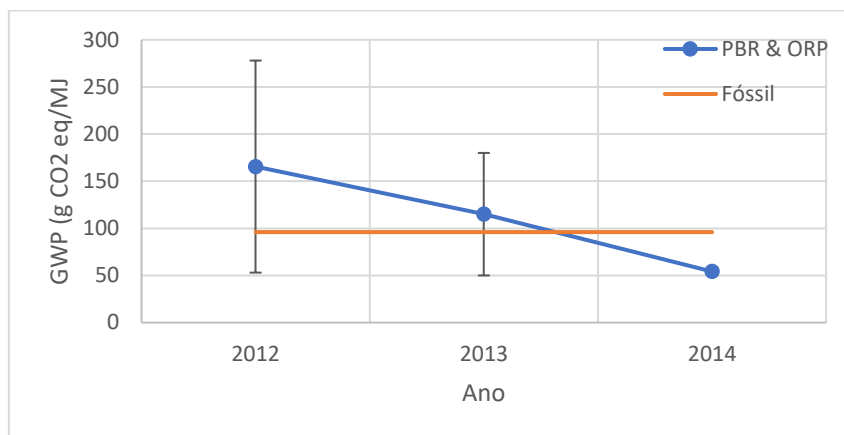


Figura 24 - (c) WtW - PBR & ORP - GWP

Quando comparada à linha de referência do diesel fóssil, a média dos resultados colhidos para o cultivo aberto se mostrou elevada. Esse resultado pode ser explicado por esse perímetro levar em consideração o último processo do ciclo de vida do biocombustível, que é a sua combustão nos motores. Esse processo tende a ser o que mais agride a atmosfera com a emissão de gases, fazendo com que os dados para o potencial de aquecimento global aumentem consideravelmente em relação aos perímetros anteriores.

Assim como no estudo de Pessôa (2018), os resultados apresentaram grande variabilidade e uma média de emissão de CO_2 elevada. No estudo original, Pessôa constatou que somente o caso o ORP do perímetro WtT mostrou valores abaixo dos obtidos para o óleo e a biomassa. Esse fato se repetiu neste estudo, apesar da grande variabilidade dos resultados.

5.2.1.5 Conclusão parcial

O GWP do biodiesel ainda não apresenta resultados conclusivos por si só. É necessário fazer um paralelo com outros indicadores para conseguir avaliar a melhor metodologia de produção e perímetros a ser seguida. Apesar de estar

presente em uma grande gama de avaliações de ciclo de vida do biodiesel de microalgas, os resultados do GWP mostraram uma variabilidade alta.

Nos trabalhos de Carneiro (2017) e Pessôa (2018), esse mesmo padrão se repetiu, onde esse índice de impacto ambiental não apresentou resultados conclusivos devido às grandes variações de dados. Para avaliar a viabilidade da produção do biodiesel será preciso combinar os resultados do potencial de aquecimento global com os demais indicadores de impacto ambiental.

5.2.2 Uso de Terra (LU)

Apesar da importância deste indicador, ele aparece pouco nas avaliações de ciclo de vida dos biocombustíveis de microalgas por conta da dificuldade agregada à medição do uso de terra por unidade de energia do biodiesel. A pequena quantidade de informações que foi coleta nesta meta-análise dificultou a comparação entre os diferentes perímetros. As Figuras 25 à 28 mostram os dados coletados separados por perímetro, além do caso de produção apenas do óleo ou de biomassa.

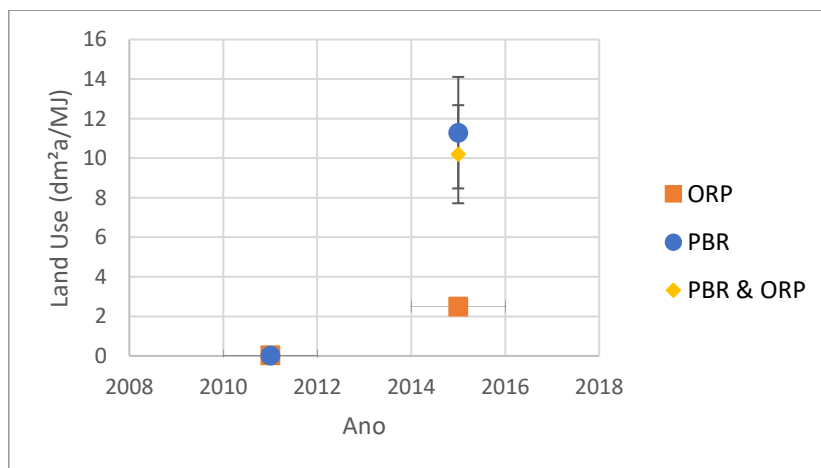


Figura 25 - (a) WtG - LU

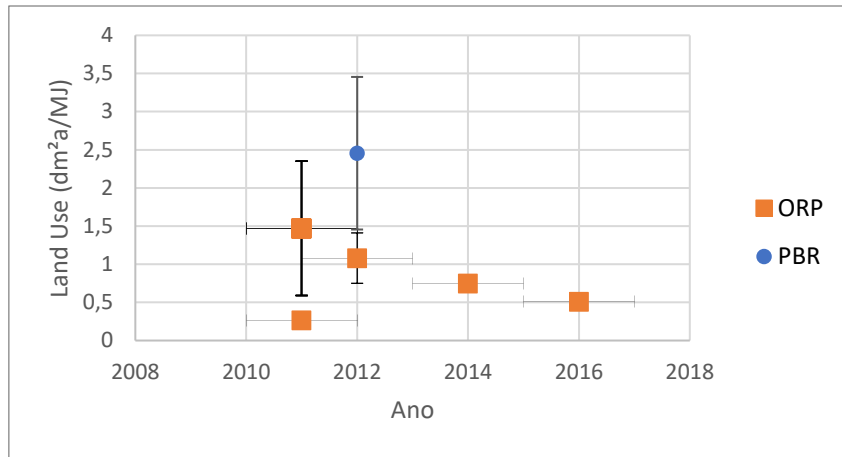


Figura 26 - (b) WtW - LU

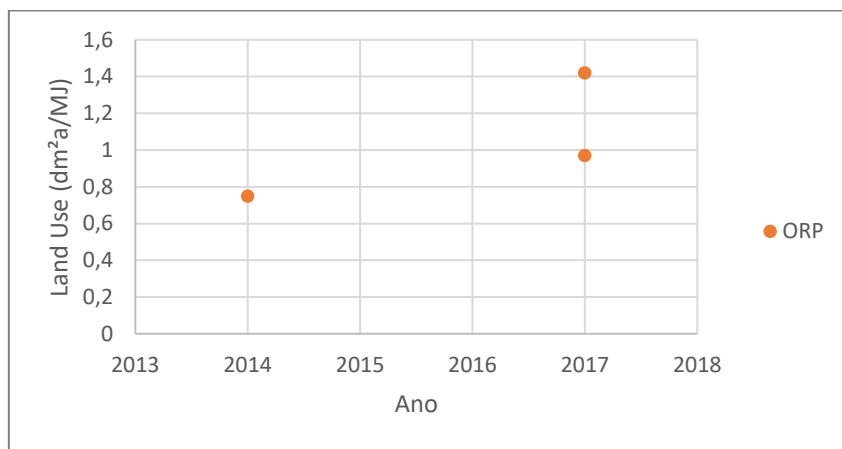


Figura 27 - (c) WtT - LU

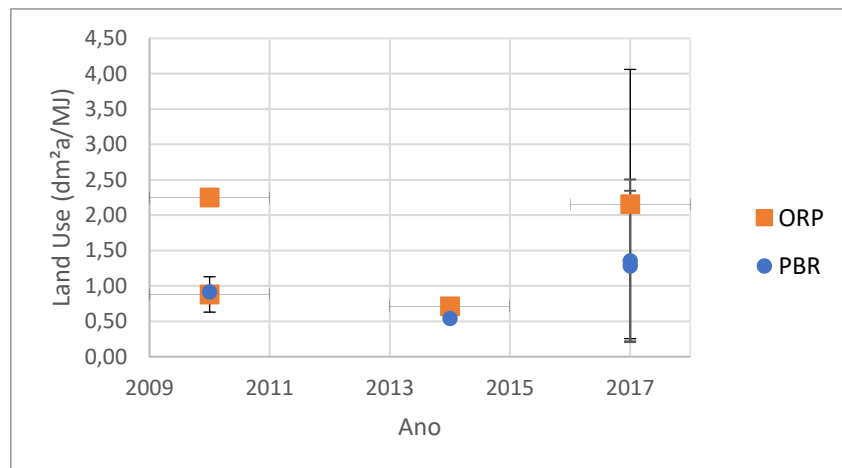


Figura 28 - (d) Óleo e Biomassa- LU

Apenas o perímetro de produção de óleo e biomassa mostrou uma vantagem do cultivo em PBR, já que foi o único modelo em que o uso da terra foi menor para esse tipo de cultivo. Para os casos de WtG e WtW, o cultivo em ORP mostrou uma menor necessidade de terras para a produção do biodiesel. Esse resultado é interessante se for levado em consideração que os PBR podem ser construídos

verticalmente, demandando uma menor utilização de terra horizontalmente. Para o perímetro WtT, apenas o cultivo em OPR foi registrado, impossibilitando uma comparação entre métodos de cultivo.

Tirando o perímetro WtT que não conteve uma amostra de dados significativa para uma melhor análise, a menor variação de dados foi registrada na produção de óleo e biomassa, que registrou dados entre 0,54 e 2,25 $\text{dm}^2\text{a}/\text{MJ}$. Isso pode ser explicado porque esse perímetro é um denominador comum entre todos os quatro, já que todos os outros três também englobam a produção de óleos para fabricação do biodiesel. Com o aumento das fronteiras dos perímetros, é natural que apareçam mais variações e incertezas nas medições de dados, já que, como mencionado por Carneiro (2017), há uma falta de maturidade nas tecnologias para a produção de biodiesel de microalgas, gerando variações nos resultados obtidos por testes experimentais e dados teóricos.

5.2.3 Razão Energética

Como o denominador do cálculo do EROI é menor, é natural esperar valores maiores de EROI do que de NER para um mesmo estudo de caso. Apesar disso, a coleta de dados e os indicadores traçados mostram que essa expectativa não se confirmou em todos os casos. Para essa análise de impacto, os dados foram compilados em gráficos distintos para NER e EROI. A variabilidade dos resultados se deve por conta dos caminhos seguidos em cada artigo. Existem diferentes possibilidades para as produções de óleo e biomassa, além das variações no cultivo das microalgas e das tecnologias que são utilizadas para diferentes estudos.

5.2.3.1 Óleo e Biomassa

As Figuras 29 e 30 mostram os gráficos de NER em função dos anos para os casos revisados.

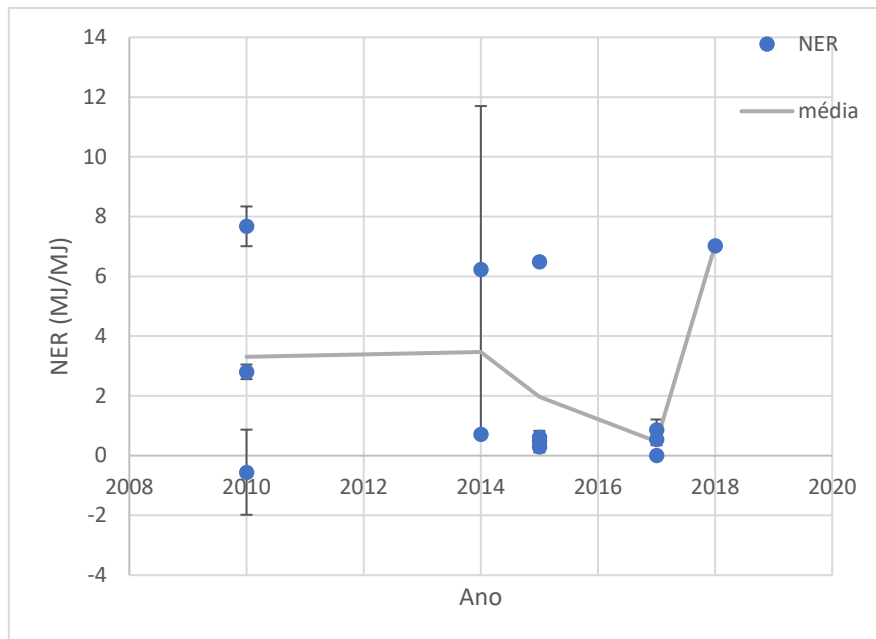


Figura 29 - (a) Óleo e Biomassa- ORP - Energy

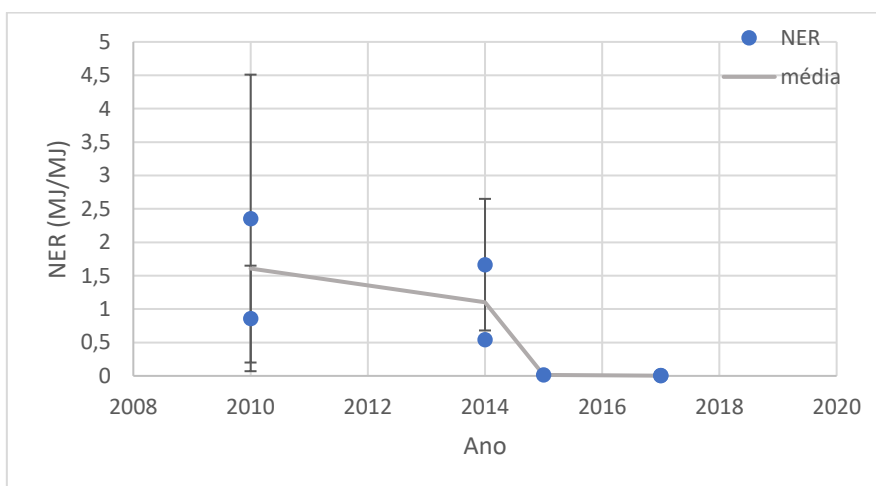


Figura 30 - (b) Óleo e Biomassa- PBR - Energy

Os dados apresentados acima mostram um NER médio para todos os dados coletados de 1,93 MJ/MJ. Apesar de existir uma variabilidade dos resultados obtidos, com os valores fluando entre 0 e mais do que 7 MJ/MJ de razão energética, é possível olhar com bons olhos para a produção de óleo e biomassa de microalgas já que a média é maior do que o mínimo previsto para ser sustentável.

Neste caso não foram traçados gráficos para o EROI já que para o óleo, foi encontrado apenas um resultado para cultivo híbrido de OPR e PBR no estudo de Beal (2015) com um EROI médio de 4,35 MJ/MJ, sendo este cenário favorável para a sua produção, já que o EROI supera o mínimo requerido para ser considerado sustentável. De maneira análoga, existiu apenas um cenário que considerava a produção de óleo por EROI em um sistema de cultivo OPR, em um estudo de Zaimes (2013). Este caso encontrou um retorno energético médio do investimento de 0,73 MJ/MJ, com o cenário mais otimista alcançando 1,08

MJ/MJ, não constatando a sustentabilidade da produção nas condições do estudo.

5.2.3.2 Well to Gate (WtG)

Nas Figura 31 à 36 estão os dados de razão energética para o perímetro Well-to-Gate. Para este perímetro, não foi encontrado na literatura um valor de referência para o NER do diesel fóssil, impossibilitando a comparação diesel-biodiesel.

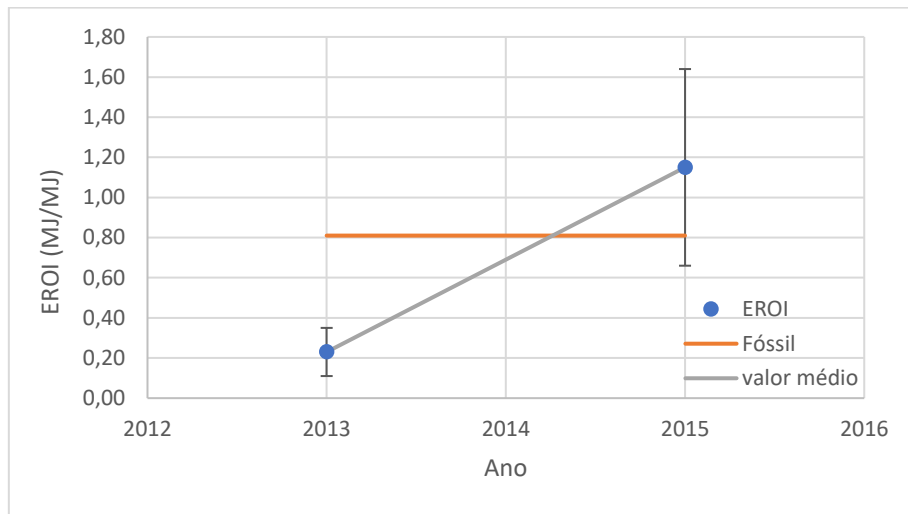


Figura 31 - (a) WtG - PBR & ORP - Energy Ratio

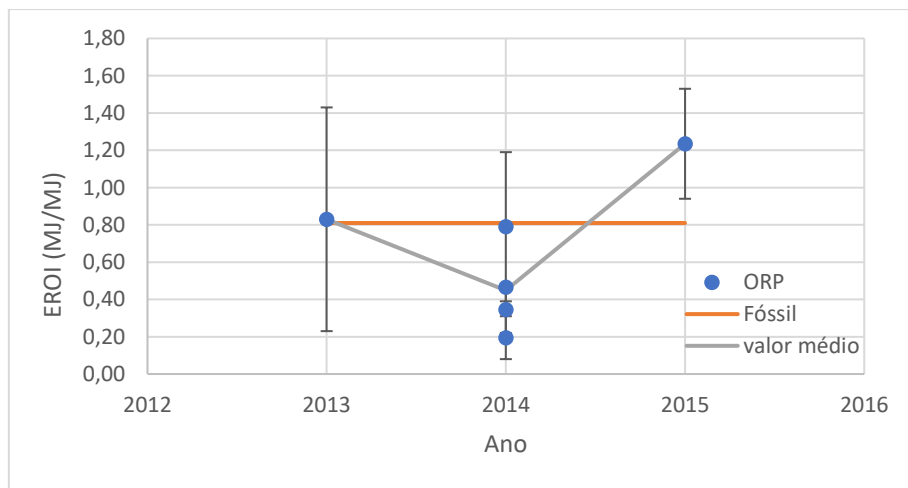


Figura 32 - (b) WtG - ORP - Energy Ratio

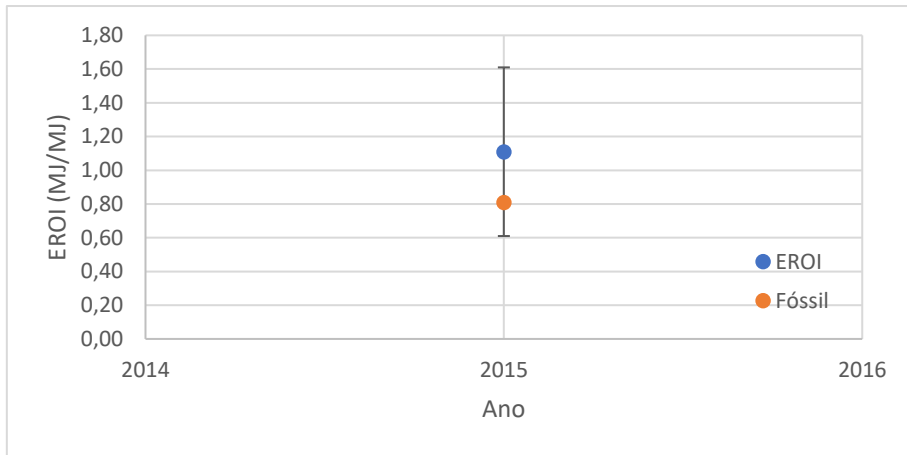


Figura 33 - (c) WtG - PBR - Energy

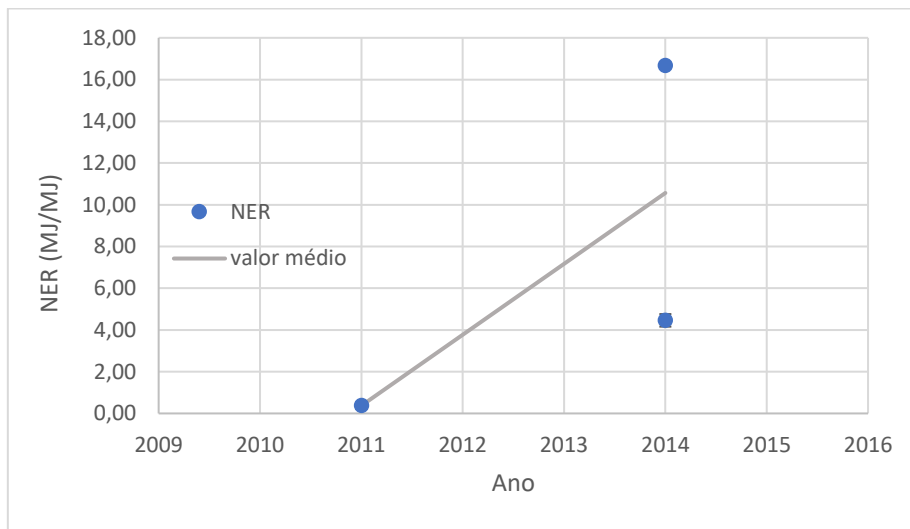


Figura 34 - (d) WtG - PBR & ORP - Energy Ratio

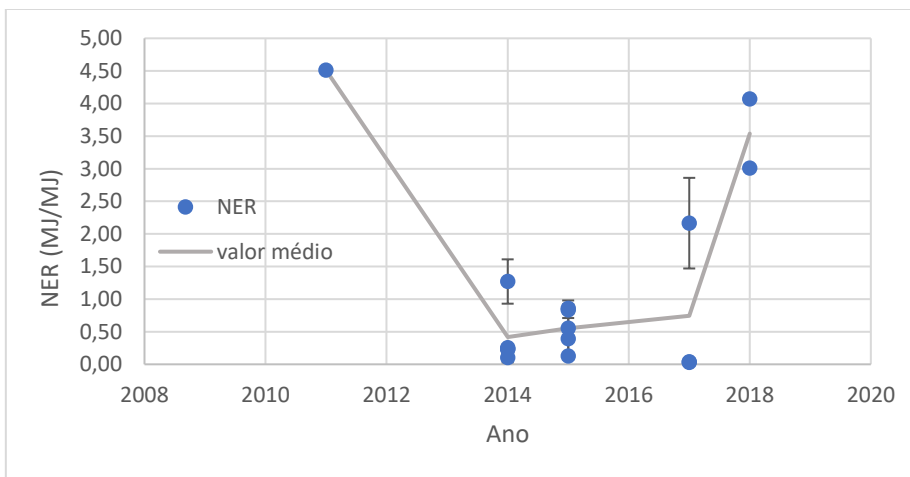


Figura 35 - (e) WtG - ORP - Energy Ratio

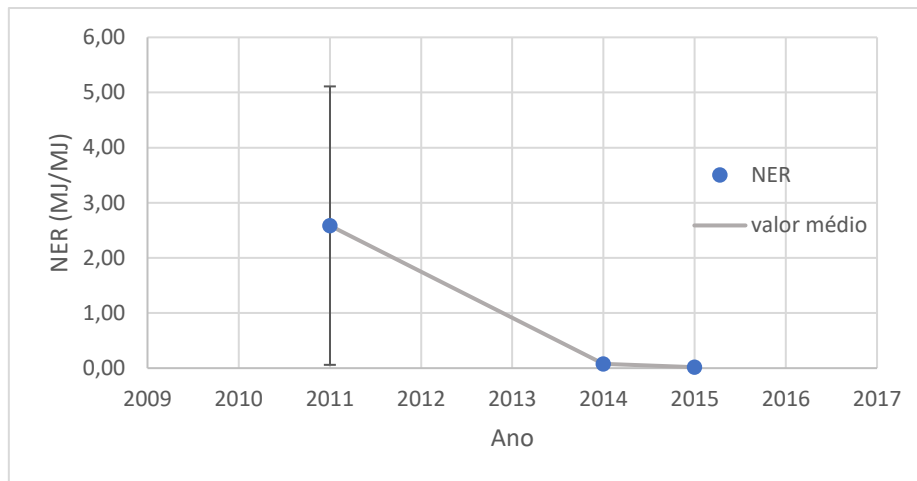


Figura 36 - (f) WtG - PBR - Energy Ratio

Para o WtG, apenas o cultivo em tanques abertos possui uma amostra de dados significativa tanto para o NER quanto para o EROI. O retorno energético do investimento para esse tipo de cultivo mostrado no gráfico (b) apresenta uma média de 0,64 MJ/MJ, sendo considerado não sustentável para esse universo de amostras. Além disso, quase todos os pontos do EROI para esse gráfico estão abaixo da linha de referência do EROI do diesel fóssil. A comparação biodiesel-diesel não pode ser feita para o caso NER, mostrado na figura (e), mas a média das amostras coletadas é de 1,17 MJ/MJ, ou seja, acima do valor considerado mínimo para uma produção viável energeticamente.

O restante dos gráficos contidos na figura X apresentam poucos resultados por gráfico e com uma grande variação de valores, inviabilizando uma análise mais aprofundada sobre cada um dos casos. A média de todos os valores obtidos por EROI, independentemente do tipo de cultivo utilizado, foi de 0,71 MJ/MJ, valor considerado insuficiente para a viabilização da produção. Já para o NER geral, esse valor foi de 1,95 MJ/MJ, mostrando uma viabilidade para a produção do biodiesel neste cenário.

5.2.3.3 Well to Tank (WtT)

Nas Figura 37 e 38 são mostrados os resultados para o WtT nos cultivos aberto e fechado.

Somente um caso de EROI foi relatado, não sendo necessário traçar um gráfico para o caso. No estudo de Juneja (2017), o retorno energético do investimento foi de 4,4 MJ/MJ no cultivo em tanques abertos, superando os a marca de 3 MJ/MJ. Este valor também supera em muito a estimativa do EROI do diesel fóssil para esse perímetro, que é de 0,88 MJ/MJ de acordo com Malça (2011).

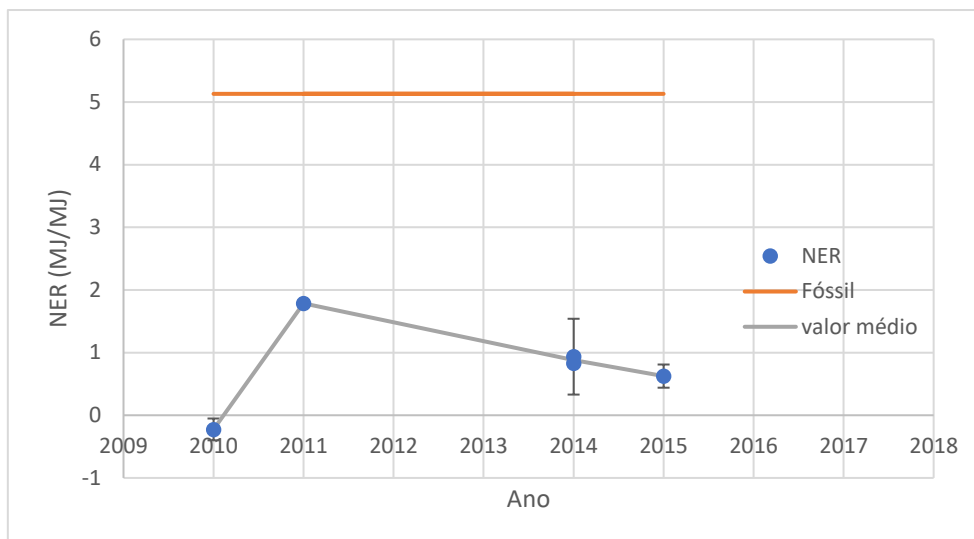


Figura 37 - (a) WtT - ORP - Energy

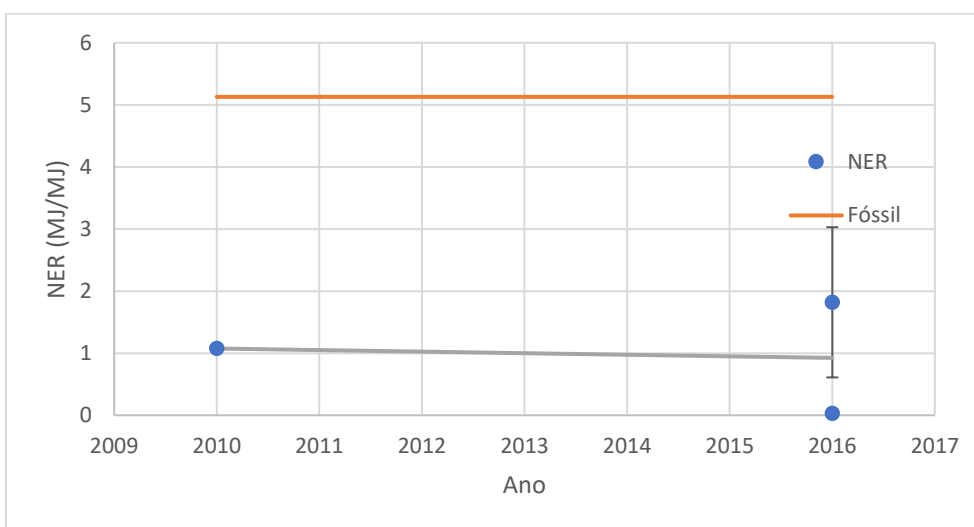


Figura 38 - (b) WtT - PBR - Energy

Para o NER, os dois cultivos apresentaram valores significativamente mais baixos de razão energética do que o diesel comum. Apesar de poucos estudos com cultivo em PBR terem sido relatados nos últimos anos, é possível dizer que o perímetro WtT traz uma perspectiva pessimista tomando como base de raciocínio a razão energética. Além disso, os valores médios relatados foram 0,78 MJ/MJ para o cultivo aberto e 0,97 MJ/MJ para o fechado, sendo os dois valores abaixo de 1 MJ/MJ.

5.2.3.4 Well to Whell (WtW)

Na Figura 39, 40 e 41 é possível observar os valores encontrados para o perímetro WtW.

Apesar de ter tido um número significativo de amostras, os dados encontrados foram em sua maioria para o cultivo aberto, seja para o NER ou EROI.

Stephenson (2010) relatou um EROI de 0,19 MJ/MJ, sendo este o único estudo desta categoria. Vasudevan (2012) apresentou um cenário de cultivo híbrido de OPR e PBR, com um NER médio de 1,1 MJ/MJ, sendo superior ao limite mínimo para viabilização energética, mas perdendo para o NER do diesel comum, que apresenta um valor de 5,5 MJ/MJ de acordo com Cavallet (2013).

Se desconsiderarmos os cenários de Stephenson (2010) e Juneja (2017), já que estes dois casos mostram valores muito discrepantes do restante da amostra de dados, o EROI médio para o cultivo aberto é em torno de 0,5 MJ/MJ, sendo considerado abaixo do valor viável de referência. Além disso, para esse caso, o EROI do diesel fóssil é de 0,84 MJ/MJ. Considerando os dois casos mencionados acima como parte da amostra, o EROI sobe para 1,03 MJ/MJ.

O cenário do NER para o cultivo aberto, representado pelo gráfico (c), também não é animador para o biodiesel de microalga. Os valores encontrados foram bastante consistentes dentro de um intervalo que variou de 0,4 até 1,3 MJ/MJ, mas estão bastante abaixo do NER do diesel fóssil, que é de 5,5 MJ/MJ de acordo com dados da literatura.

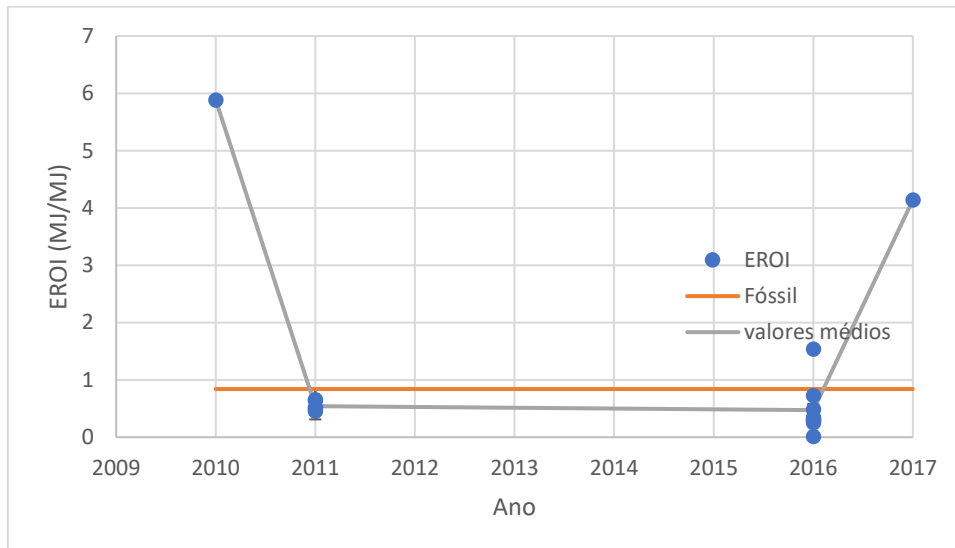


Figura 39 - (a) WtW - ORP - Energy

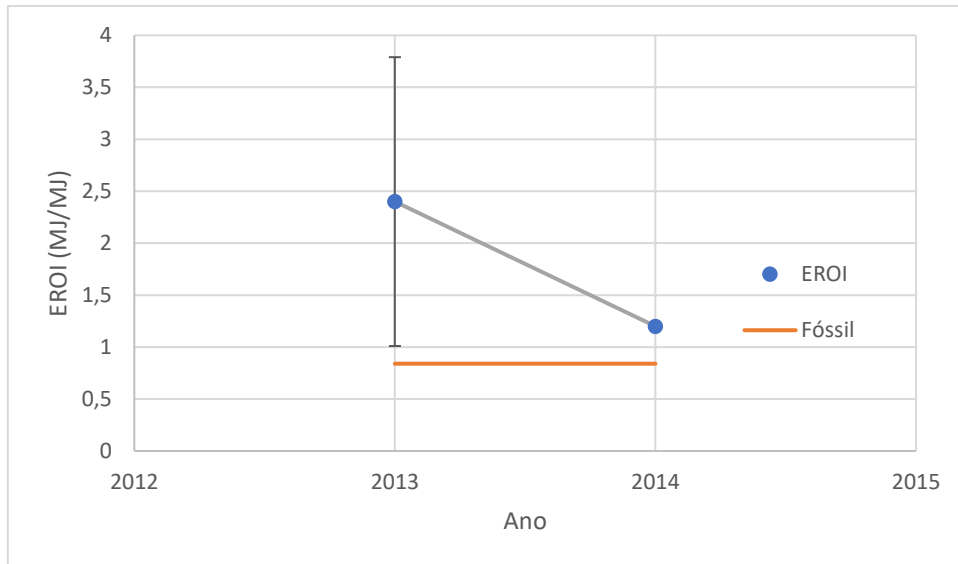


Figura 40 - (b) WtW - PBR & ORP - Energy

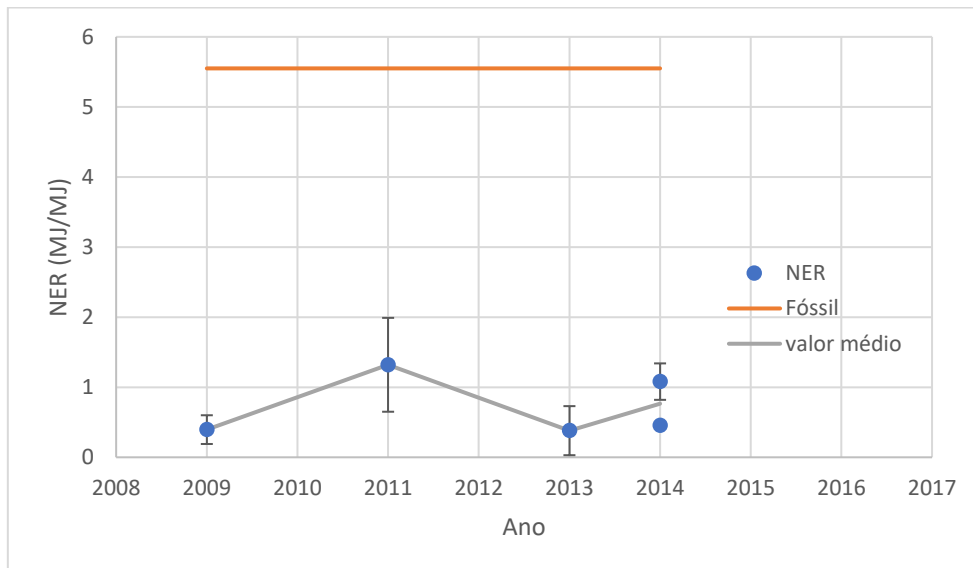


Figura 41 - (c) WtW - ORP - Energy

5.2.4 Uso de Água

Este trabalho também coletou dados do uso de água para a produção de biodiesel. É importante lembrar que muitos dos artigos que quantificaram o consumo deste recurso avaliaram a utilização da água rejeitada das cidades ou indústrias para a fase de cultivo, já que as microalgas conseguem se reproduzir nessas condições. As Figuras 42, 43 e 44 mostram as aparições desse indicador ao longo dos anos.

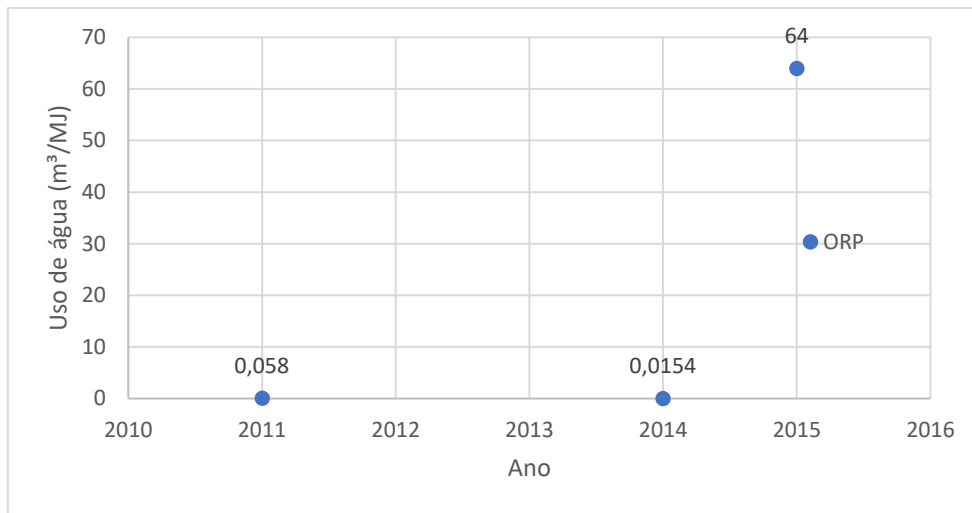


Figura 42 - (a) WtG - ORP - Uso de água

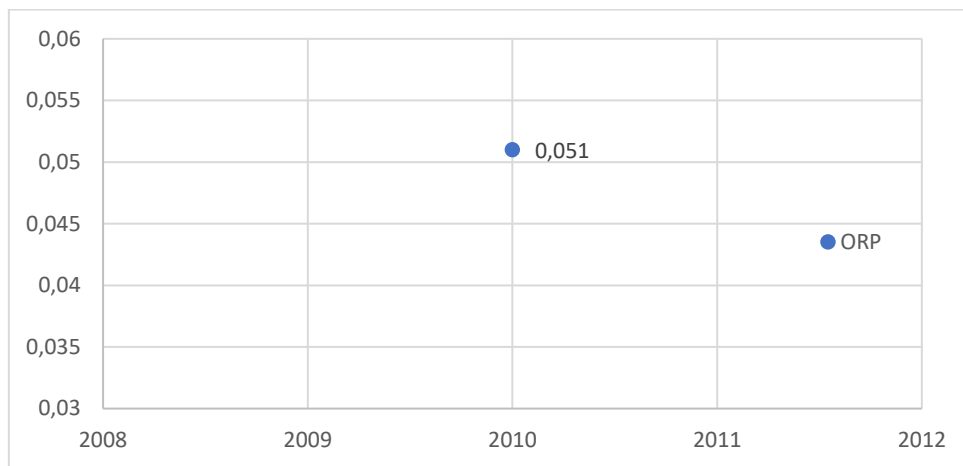


Figura 43 - (b) WtT - ORP - Uso de água

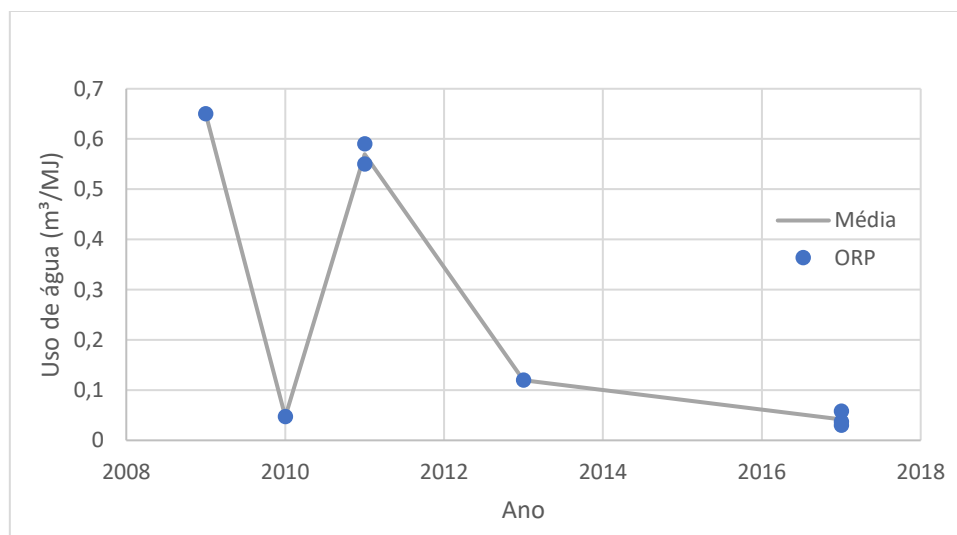


Figura 44 - (c) WtW - ORP - Uso de água

A medição do uso da água para o cultivo envolve grande complexidade, porque é necessário medir o *input* no sistema, além perda por evaporação (sendo esta última muito complexa de ser medida). Isto explica a pequena quantidade de aparições desse indicador nos artigos de avaliação do ciclo de vida de biodiesel de microalgas. O perímetro WtW foi o que constatou maior quantidade de dados apesar da grande variabilidade entre eles. Essa flutuação nos valores impossibilita um veredito final sobre o uso da água nas produções de biodiesel, já que, somado ao fato dos outros dois perímetros não apresentarem uma amostra suficientemente grande, uma comparação embasada em dados ficou impossibilitada.

6. Conclusão Final

Com a evolução tecnológica crescente do século 21 e a elevação substancial da população mundial, as demandas energéticas e alimentícias crescem também, e com isso aumenta também a emissão de gases de efeito estufa. Por isso, é essencial encontrar soluções que supram a demanda energética humana, minimizando a liberação desses gases nocivos e utilização de terras férteis. É com esse intuito que a busca por tecnologias mais eficientes e métodos de produção de biodiesel com menor gasto energético vem sendo cada vez abordados no mundo acadêmico.

Esse trabalho avaliou publicações sobre a produção de biodiesel de microalgas segundo a metodologia LCA. A falta de padronização nas metodologias aplicadas nos artigos foi minimizada por uma subdivisão dos dados em categorias, onde cada método de cultivo foi avaliado dentro pelo perímetro aplicado no artigo, conseguindo assim uma tratativa dos resultados em uma mesma base de referência.

O método de cultivo em tanques abertos se mostrou mais eficiente no uso de terra e no potencial de aquecimento global menor em comparação com o cultivo fechado. Para uma maior produtividade, é possível evoluir na escolha da espécie de alga que será utilizada no cultivo, já que a eficiência global do processo está muito ligada à reprodutibilidade e às características de cada espécie, como a quantidade de óleo gerada e a resistência das microalgas ao ambiente em que estão inseridas.

Os dados mostraram vantagens e desvantagens da produção de biodiesel de terceira geração. O biocombustível apresentou resultados interessantes no que se refere ao uso de terra, já que a produção de microalgas demanda menos terras do que outros biocombustíveis provenientes de plantações. Outro fator que reforça esse ponto é o fato das microalgas não necessitarem terras férteis para o seu crescimento, evitando uma disputa com produções alimentícias, que poderiam acarretar uma rejeição social do biodiesel de terceira geração.

Energeticamente, os resultados foram menos favoráveis ao biocombustível, já que os valores de referência de ER do diesel fóssil superam com facilidade os valores mostrados neste trabalho. Em muitos casos, a energia gerada pelo biodiesel não supera nem mesmo a demanda energética para sua produção, gastando mais do que provê.

O potencial de aquecimento global e o uso de água não se mostraram conclusivos neste trabalho por motivos distintos. No caso do GWP, apesar de existirem muitos artigos que incluem esse fator de impacto ambiental, os dados são muito variáveis. É difícil chegar à uma conclusão precisa olhando para os dados apontados de forma geral, sendo necessário avaliar caso a caso a caso já que algumas produções tiveram um GWP menor que o diesel fóssil, mas outras superaram os valores de referência obtidos na Tabela 2. Para o caso do uso da água, por ser um indicador de difícil medição, poucos artigos quantificam os gastos desse recurso. Um fator positivo das microalgas é a possibilidade de reaproveitamento das águas rejeitadas por cidades e indústrias, já que as

microalgas conseguem se reproduzir nesses ambientes. Apesar disso, não foi possível comparar a utilização de água com outros tipos de combustíveis.

Assim como no trabalho de Carneiro (2017), este trabalho reforça a ideia de que existem maneiras de aumentar o rendimento energético e diminuir os impactos ambientais como: selecionar espécies de microalgas resilientes, otimizar os métodos de cultivo, adotar processos de produção mais energeticamente eficientes para a produção do biodiesel e a utilização de biorrefinarias.

7. Referências

1. Batan, L., Quinn, J., Willson, B., & Bradley, T. (2010). **Net energy and greenhouse gas emission evaluation of biodiesel derived from microalgae.** *Environmental science & technology*, 44(20), 7975-7980.
2. Beal, C. M., Gerber, L. N., Sills, D. L., Huntley, M. E., Machesky, S. C., Walsh, M. J., ... & Greene, C. H. (2015). **Algal biofuel production for fuels and feed in a 100-ha facility: A comprehensive techno-economic analysis and life cycle assessment.** *Algal Research*, 10, 266-279.
3. Carneiro, M. L. N., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S. P., Martins, A. R. F., Turkovics, F., & Pradelle, R. N. (2017). **Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA).** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 632-653.
4. Chen, J., Li, J., Dong, W., Zhang, X., Tyagi, R. D., Drogui, P., & Surampalli, R. Y. (2018). **The potential of microalgae in biodiesel production.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 336-346.
5. Chisti, Y. (2007). **Biodiesel from microalgae.** *Biotechnology advances*, 25(3), 294-306.
6. Clarens, A. F., Resurreccion, E. P., White, M. A., & Colosi, L. M. (2010). **Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks.** *Environmental science & technology*, 44(5), 1813-1819.
7. Collet, P., Lardon, L., Hélias, A., Bricout, S., Lombaert-Valot, I., Perrier, B., ... & Bernard, O. (2014). **Biodiesel from microalgae—Life cycle assessment and recommendations for potential improvements.** *Renewable Energy*, 71, 525-533.
8. Derner, R. B., Ohse, S., Villela, M., Carvalho, S. M. D., & Fett, R. (2006). **Microalgae, products and applications.** *Ciência Rural*, 36(6), 1959-1967.
9. Demirbas, A. (2008). *Biodiesel* (pp. 111-119). Springer London.
10. Fortier, M. O. P., Roberts, G. W., Stagg-Williams, S. M., & Sturm, B. S. (2017). **Determination of the life cycle climate change impacts of land use and albedo change in algal biofuel production.** *Algal research*, 28, 270-281.
11. Fortier, M. O. P., Roberts, G. W., Stagg-Williams, S. M., & Sturm, B. S. (2014). **Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae.** *Applied Energy*, 122, 73-82.
12. Franco, A. L. C., Lôbo, I. P., Cruz, R. S. D., Teixeira, C. M. L. L., Almeida Neto, J. A. D., & Menezes, R. S. (2013). **Biodiesel from microalgae: progress and challenges.** *Química Nova*, 36(3), 437-448.
13. Grima, E. M., Belarbi, E. H., Fernández, F. A., Medina, A. R., & Chisti, Y. (2003). **Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics.** *Biotechnology advances*, 20(7-8), 491-515.
14. Jez, S., Spinelli, D., Fierro, A., Dibenedetto, A., Aresta, M., Busi, E., & Basosi, R. (2017). **Comparative life cycle assessment study on environmental impact of oil production from micro-algae and terrestrial oilseed crops.** *Bioresource technology*, 239, 266-275.

15. Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embirucu, M., & Ghirardi, M. L. (2010). **Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors.** *Bioresource technology*, 101(4), 1406-1413.
16. Juneja, A., & Murthy, G. S. (2017). **Evaluating the potential of renewable diesel production from algae cultured on wastewater: techno-economic analysis and life cycle assessment.** *AIMS Energy*, 5(2), 239-257.
17. Junior, E. N., Kumar, M., Pankratz, S., Oyedun, A. O., & Kumar, A. (2018). **Development of life cycle water footprints for the production of fuels and chemicals from algae biomass.** *Water research*, 140, 311-322.
18. Khoo, H. H., Sharratt, P. N., Das, P., Balasubramanian, R. K., Narahariseti, P. K., & Shaik, S. (2011). **Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: preliminary results and comparisons.** *Bioresource technology*, 102(10), 5800-5807.
19. Koutinas, A. A., Vlysidis, A., Pleissner, D., Kopsahelis, N., Garcia, I. L., Kookos, I. K., ... & Lin, C. S. K. (2014). **Valorization of industrial waste and by-product streams via fermentation for the production of chemicals and biopolymers.** *Chemical Society Reviews*, 43(8), 2587-2627.
20. Lardon, L., Helias, A., Sialve, B., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2009). **Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae.**
21. Mata, T. M., Cameira, M., Marques, F., Santos, E., Badenes, S., Costa, L., ... & Martins, A. A. (2018). **Carbon footprint of microalgae production in photobioreactor.** *Energy Procedia*, 153, 432-437.
22. Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). **Microalgae for biodiesel production and other applications: a review.** *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 217-232.
23. Monari, C., Righi, S., & Olsen, S. I. (2016). **Greenhouse gas emissions and energy balance of biodiesel production from microalgae cultivated in photobioreactors in Denmark: a life-cycle modeling.** *Journal of cleaner production*, 112, 4084-4092.
24. Mu, D., Ruan, R., Addy, M., Mack, S., Chen, P., & Zhou, Y. (2017). **Life cycle assessment and nutrient analysis of various processing pathways in algal biofuel production.** *Bioresource technology*, 230, 33-42.
25. Ohse, S., Derner, R. B., Ozório, R. Á., Cunha, P. C. R., Lamarca, C. P., dos Santos, M. E., & Mendes, L. B. B. (2007). **Revisão: Seqüestro de carbono realizado por microalgas e florestas e a capacidade de produção de lipídios pelas microalgas.** *INSULA Revista de Botânica*, 36, 39.
26. Pérez, A. T. E., Camargo, M., Rincón, P. C. N., & Marchant, M. A. (2017). **Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: a bibliographic analysis.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 350-359.

27. PESSÔA M. M. S. **Avaliação do potencial do biodiesel de algas usando o conceito de avaliação de ciclo de vida (ACV)**. 2017. 49p. Projeto de graduação (Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro - RJ.
28. Raghuvanshi, S., Bhakar, V., Chava, R., & Sangwan, K. S. (2018). **Comparative Study Using Life Cycle Approach for the Biodiesel Production from Microalgae Grown in Wastewater and Fresh Water**. *Procedia CIRP*, 69(1), 568-572.
29. Roostaei, J., & Zhang, Y. (2017). **Spatially explicit life cycle assessment: opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States**. *Algal Research*, 24, 395-402.
30. Togarcheti, S. C., kumar Mediboyina, M., Chauhan, V. S., Mukherji, S., Ravi, S., & Mudliar, S. N. (2017). **Life cycle assessment of microalgae-based biodiesel production to evaluate the impact of biomass productivity and energy source**. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 286-294.
31. Zaines, G. G., & Khanna, V. (2013). **Microalgal biomass production pathways: evaluation of life cycle environmental impacts**. *Biotechnology for biofuels*, 6(1), 88.