

Uma revisão sobre avaliação do ciclo de vida de sistemas voltados à produção de biogás a partir do uso de algas: desafios e perspectivas à sustentabilidade



A review on life cycle assessment of systems focused on biogas production from the use of algae: challenges and perspectives to sustainability



- **Data de entrada:**
25/03/2022
- **Data de aprovação:**
21/03/2023

Renata Estevam^{1*} | Ricardo Franci Gonçalves¹ | João Luiz Calmon¹ | Janaína Simões Lima¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.014>

ORCID ID

Estevam R  <https://orcid.org/0000-0003-1562-5962>
Gonçalves RF  <https://orcid.org/0000-0002-2048-9451>

Calmon JL  <https://orcid.org/0000-0002-3054-4784>
Lima JS  <https://orcid.org/0000-0002-5386-4115>

Resumo

As algas são reconhecidas como uma fonte potencial para produção de biocombustíveis, em especial o biogás. No entanto, os processos para sua conversão ainda deixam a desejar do ponto de vista ambiental, e dessa forma existem limitações para sua aplicação em larga escala. Desta forma, este artigo teve como objetivo central mapear trabalhos dentre 2016 a 2020 por meio da ferramenta *bibliometrix* do software RStudio[®]. Foram mapeados artigos que se utilizaram da avaliação do ciclo de vida, a fim de avaliar a sustentabilidade de sistemas que se utilizam de algas como matéria-prima à produção de biogás em escala conceitual e real. Foi verificado que embora o biogás tenha sido apresentado como uma ótima alternativa para geração de energia e nutrientes ao cultivo das algas, para que o seu uso seja maximizado dentre ademais fins ainda são necessários maiores avanços em microbiologia, química e engenharia a fim de viabilizar técnica e economicamente a comercialização do biogás em larga escala.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Algas. Biogás. Digestão Anaeróbia.

Abstract

Algae are recognized as a potential source for biofuel production, especially biogas. However, the processes for its conversion still leave something to be desired from an environmental point of view, and in this way, there are limitations to its large-scale application. Thus, this article aimed to map works between 2016 and 2022 through the bibliometrix tool of the RStudio[®] software. Articles were mapped that used the life cycle assessment to evaluate the sustainability of systems that use algae as raw material for biogas production on a conceptual and real scale. It was verified that although biogas has been presented as a great alternative for the generation of energy and nutrients from the cultivation of algae so that its use is maximized among other purposes, further advances in microbiology, chemistry, and engineering are still needed to enable technically and economically the commercialization of biogas on a large scale.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Algae. Biogas. Anaerobic digestion.

¹ Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) - Vitória - Espírito Santo - Brasil.

* **Autora correspondente:** renata.engenhariacm@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade, ciência e tecnologia resultou em uma maior demanda por energia (MARTÍN JUÁREZ et al., 2018). A produção de bioenergia, como o bioetanol, o biodiesel e o biogás a partir de algas, é considerada uma alternativa sustentável e promissora. Os biocombustíveis podem ser produzidos por meio de diferentes processos, como transesterificação, fermentação, gaseificação, dentre outros (CHIA et al., 2018; GANESH SARATALE et al., 2018). Dentre os biocombustíveis, o biogás se encontra em uma posição de destaque por ser uma tecnologia ambientalmente amigável (YAN; ZHENG, 2013) e por seu elevado potencial para aliviar a dependência do mundo com os combustíveis fósseis pela produção do biometano (BAHR et al., 2014). Países de clima quente, como o Brasil, possuem um grande potencial para a produção de biogás devido à variedade de biomassa vegetal produzida, além de possuir diversas fontes de águas residuárias como doméstica, industrial e agroindustrial (KLEIN et al., 2019).

O biogás produzido à base de algas é considerado uma tecnologia de terceira geração. Tal atribuição deve-se a sua significância em atender demandas de energia primária usando terras não cultiváveis (HWANG et al., 2016; JANKOWSKA; SAHU; OLESKOWICZ-POPIEL, 2017). Chia et al. (2018) destacam que as algas, ao contrário das plantas fotossintéticas terrestres, são um recurso favorável quando se prevê a produção de biogás devido à alta disponibilidade de biomassa, rápida taxa de crescimento e capacidade de sobreviver em condições adversas. A produção de biogás a partir de algas por biodegradação anaeróbia é a tecnologia mais ecologicamente correta, vantajosa e mais simples porque o processo usa todas as biomoléculas das algas para produção de biogás. Além disso, as algas apresentam vantagens em relação a outros tipos de matérias-primas, como ausência de lignina em

sua estrutura, rapidez de fixação de CO₂ e custos menores de cultivo (KAVITHA et al., 2019).

Conforme Hwang et al. (2016), as vantagens econômicas e ambientais associadas ao cultivo de algas em águas residuárias constituem uma força motriz para promover sua utilização como matéria-prima para produção de bioenergia por meio do biogás. Contudo, ainda existem muitos desafios a serem superados em relação à sustentabilidade do sistema que têm impedido o desenvolvimento da tecnologia de biocombustíveis de algas em escala comercial. Conforme Tasca et al. (2019), as tecnologias para produção de algas são caras em termos de construção e operação, exigindo grande quantidade de eletricidade, CO₂ ao metabolismo e nutrientes (nitrogênio e fósforo). Mesmo, que as algas sejam consideradas uma biomassa de rápido crescimento e estudadas como uma ótima fonte potencial para produção de biocombustíveis para o futuro, o desempenho ambiental dos sistemas de conversão ainda aponta entraves a serem resolvidos (REBELLO et al., 2020).

Como modo de avaliar melhor os impactos ambientais, custos e benefícios da comercialização de biocombustíveis de algas, como o biogás, é necessário avaliar o seu ciclo de vida. Entretanto, existe uma grande dificuldade em avaliar a sustentabilidade do sistema usando métricas independentes. Tais motivos levaram diversos autores, tais como Manninen et al. (2016); Ertem; Neubauer; Junne (2017); Ferreira et al. (2019) e Mediboyina et al. (2020), dentre outros, a utilizar o método de avaliação do ciclo de vida (ACV). A ACV vem sendo citada dentre diversos trabalhos como um método favorável para integrar sistemicamente essas métricas. De forma que é altamente eficaz em determinar os impactos ambientais, econômicos e sociais ocasionados pelo funcionamento dos sistemas (CHIA et al., 2018; REBELLO et al., 2020; TIAN et al., 2019).

Portanto, este artigo teve como objetivo mapear trabalhos nas principais Bases de Dados Eletrônicos (BDEs) que visaram produzir o biogás a partir da utilização da biomassa algácea e avaliaram a sustentabilidade do sistema pelo método de ACV, de forma a apontar categorias de impactos ambientais, fluxos de energia, matérias-primas utilizadas e emissões liberadas para o meio ambiente. Foi utilizado um método de revisão sistemática da literatura, com a implementação da adaptação do instrumento de intervenção Processo de Desenvolvimento do Conhecimento - construtivista (*ProKnow-C*). Isto posto, foram delineados os seguintes objetivos específicos: (i) selecionar um Portfólio Bibliográfico que esteja alinhado com a percepção do pesquisador sobre o tema, sob a ótica de pesquisas com a finalidade de produção de biogás de forma sustentável; (ii) realizar uma análise bibliométrica do Portfólio Bibliográfico selecionado; (iii) realizar uma síntese temática; e (iv) encontrar caminhos e lacunas para pesquisas futuras. Além disso, esta pesquisa pretende contribuir para a comunidade científica sobre o tema estudado, uma vez que apresenta uma seleção representativa de pesquisas internacionais em uma área interdisciplinar. As novas contribuições do presente artigo são: expandir a revisão da literatura; destacar, comparar e analisar sistemas sustentáveis que se utilizam de biomassa algácea para produção de biogás.

2 MÉTODOS

2.1 Ferramenta *Bibliometrix* e filtragem de conteúdo a partir do *Proknow-C*

Para o mapeamento científico foram realizadas leituras específicas em artigos de revisão publicados pelos seguintes autores Hwang et al. (2016), Aziz; Hanafiah; Gheewala (2019), Ubando et al. (2019), Choudhary et al. (2020) e Rebello et al. (2020) a fim de fundamentar as etapas primordiais à consolidação da revisão sistemática. A partir disso, foi observado que os pesquisadores em

geral usam diferentes abordagens quali-quantitativas para entender e organizar as descobertas anteriores. Dentre essas, é citado principalmente a bibliometria devido ao seu potencial de introduzir um processo de revisão sistemática transparente e reproduzível, sendo este com base na medição estatística da ciência, dos cientistas ou da atividade científica (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Guler et al. (2016) citam que o uso da bibliometria abrange todas as áreas do conhecimento, sendo aprimorada constantemente durante os anos, por meio de softwares de programação que possibilitam cada vez mais o tratamento automatizado de dados bibliométricos.

Aria e Cuccurullo (2017), pensando em pesquisadores e profissionais que não possuem habilidades gerais de programação, desenvolveram um fluxo de trabalho bibliométrico lógico e o denominaram como *bibliometrix*. Os autores reconstruíram um código aberto no *software RStudio*® e tiveram como objetivos fornecer aos usuários uma ampla variedade de técnicas estatísticas e gráficas. No *RStudio*® foi priorizada a programação devido a sua significância, visto que é bem suportado pela comunidade acadêmica. Além disso, novas funções são contribuídas regularmente pelos usuários em geral. Os autores também ressaltam que a ferramenta é flexível e pode ser rapidamente atualizada e integrada a outros pacotes disponíveis pelo *software RStudio*®. Dessa forma, o *RStudio*® é considerado um software altamente útil ao campo acadêmico, visto que a bibliometria é uma ciência mutável. Diante da viabilidade demonstrada, o *bibliometrix* foi adotado como ferramenta primordial ao desenvolvimento da metodologia do *Proknow-C*.

2.1.1 Seleção do portfólio bibliográfico

O primeiro passo após a delimitação do tema e a escolha da ferramenta científica foi a escolha das palavras-chave. Adiante, as palavras-chave

foram retiradas a partir da leitura de cinco artigos que atenderam totalmente aos objetivos pré-estabelecidos da pesquisa. Em conformidade com Ferenhof et al. (2014) e Aria; Cuccurullo (2017) foram selecionadas duas bases científicas para pesquisa dos artigos: *Web Of Science* e *Scopus*. Para uma maior precisão dos resultados foram utilizados os operadores booleanos (AND e OR), a fim de realizar combinações coerentes entre as palavras-chave. As seqüências de combinações foram respectivas a junções de sinônimos e termos relevantes, da seguinte forma: ("life cycle assessment" OR "life-cycle assessment" OR "life cycle analys*" OR "LCA" OR "life cycle*") AND ("microalgae" OR "algae" OR "micro-algae") AND ("anaerobic digestion" OR "biodegradation") AND ("methane" OR "biogas" OR "bioenergy" OR "biofuel" OR "bioenergy algal" OR "microalgae bioenergy").

Os resultados encontrados foram exportados para o formato *BibTex* com a finalidade posterior de programação em *RStudio* conforme metodologia do *biblometrix*. A seguir, os códigos citados em Aria; Cuccurullo (2017) foram adicionados ao *RStudio* com algumas adaptações. Adiante,

os resultados da bibliometria foram exportados para o *software Excel*.

A partir deste passo, foi necessária a utilização de técnicas ligadas à filtragem de conteúdo em conformidade com o estabelecido pela metodologia do *Proknow-C*. Essa planilha resultou no total de 1144 artigos, demonstrando como principais informações: resumo, tipo de documento, título, periódico, autores, ano de publicação, quantidade de citações, fator de impacto, idioma de publicação e Qualis/Capes. Os filtros selecionados para filtragem de conteúdo foram: apenas artigos em inglês, fator de impacto maior que um, citados pelo menos uma vez e artigos publicados entre 2016-2020. Como resultado foi obtido como Portfólio Bibliográfico (PB) inicial o total de 307 artigos. Posteriormente, os 307 artigos tiveram os títulos e os resumos integralmente lidos. Por fim, como resultado da leitura dos títulos e resumos o PB selecionado foi composto por 20 artigos, sendo estes integralmente lidos, tornando-se o objeto de integral discussão deste artigo de revisão. O fluxo esquemático sobre a definição do PB selecionado encontra-se na Fig. 1.

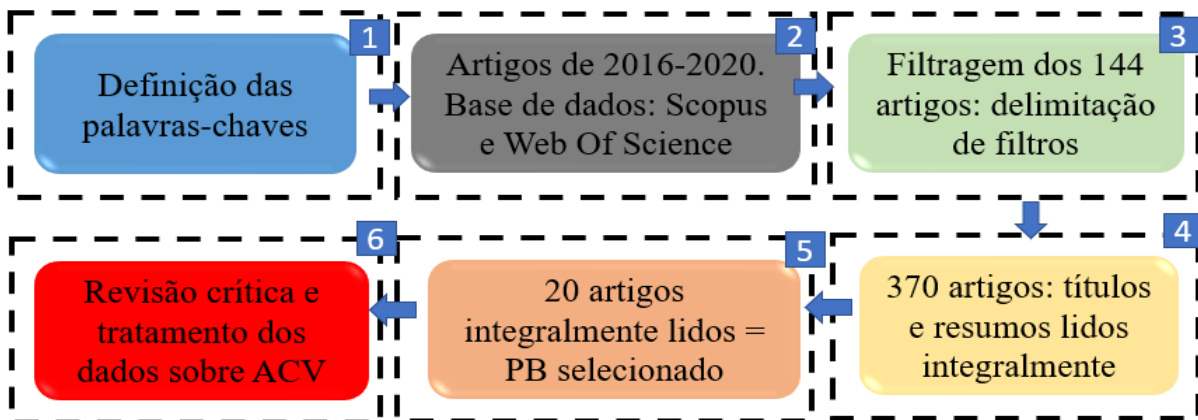


Figura 1 - Fluxo esquemático para definição do Portfólio Bibliográfico selecionado

2.1.2 Análise Bibliométrica

Para a análise bibliométrica e descritiva do PB selecionado foram utilizados o *biblioshiny* e o *software Excel*[®]. O *biblioshiny* refere-se a uma etapa adjacente a programação no RStudio, sendo disponível ao usuário por meio de um código de IP (protocolo de internet). Por meio deste código podem ser consultadas diversas informações científicas relevantes ao tema (ARIA; CURRUCULO, 2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise bibliométrica e descritiva do portfólio bibliométrico (PB) selecionado

A seguir, encontram-se os resultados da análise sistemática dos 20 artigos selecionados. No Apêndice A, onde consta a Tabela 1, foram elencadas diversas informações fundamentais a esta revisão crítica. Esses resultados foram respectivos ao mapeamento científico das informações mais relevantes ligadas ao tema, ou seja, pesqui-

sas científicas que de fato retrataram a avaliação do ciclo de vida como forma de avaliar a sustentabilidade de sistemas de tratamento de águas residuárias que se utilizam da biomassa algácea para produção de biogás.

3.1.1 Fontes mais citadas em escala mundial

Na Fig. 2, referente aos 20 artigos selecionados, encontram-se as seis fontes de maior relevância científica dentre o PB selecionado, e suas 56 ocorrências acumuladas durante os anos de 2016-2020. Os anos de 2019 e 2020 foram os de maiores ocorrências acumuladas, totalizando 33 ocorrências. Dentre o principal ranking de importância mundial destacaram-se as seguintes fontes: *Journal Of Cleaner Production* com 22 ocorrências acumuladas mundialmente, sendo seguida respectivamente por *Bioresource Technology* (9), *Energy* (9), *Algal Research* (7), *Science Of The Total Environment* (5) e *Renewable Energy* (4) no período de 2016 a 2020.

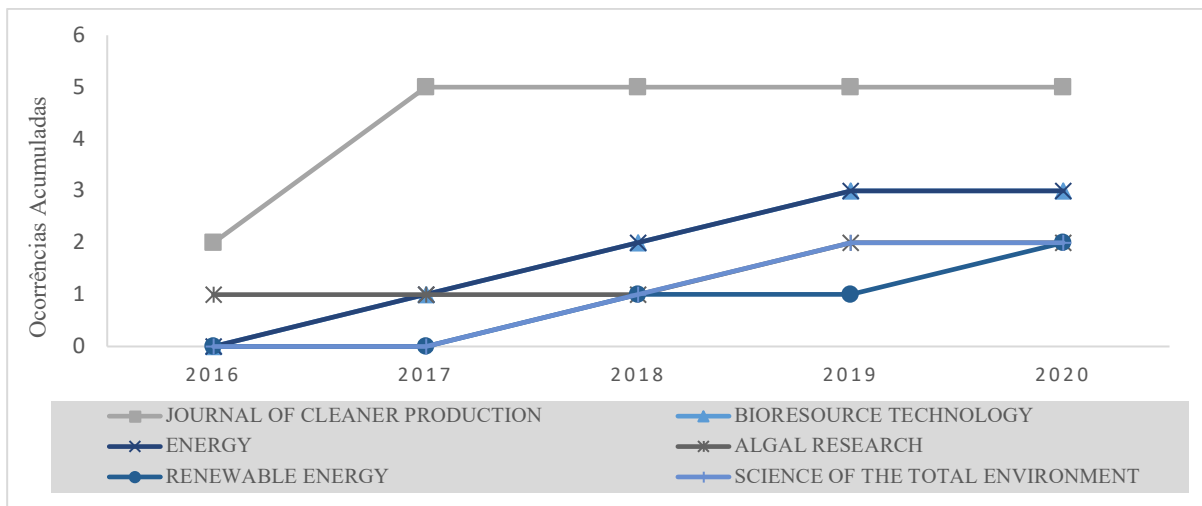


Figura 2 - Crescimento dinâmico das fontes mais relevantes

3.1.2 Fontes mais relevantes do PB selecionado

A partir da revisão sistemática foi observado que as fontes mais relevantes respectivas ao PB se-

lecionado foram: *Renewable & Sustainable Energy Reviews* com um fator de impacto (FI) de (16,799), sendo seguida respectivamente por *Bioresource*

Technology (11,889) e *Applied Energy* (11,446). As demais fontes selecionadas, *Journal of Cleaner Production*, *Science of The Total Environment*, *Energy*, *Renewable Energy*, *Algal Research* e *Bioprocess*

And *Biosystems Engineering* também foram consideradas altamente relevantes, haja visto que, mais de 70% possuíam FI > 8.000 e o restante (15%) FI >3.000 conforme Fig. 3.

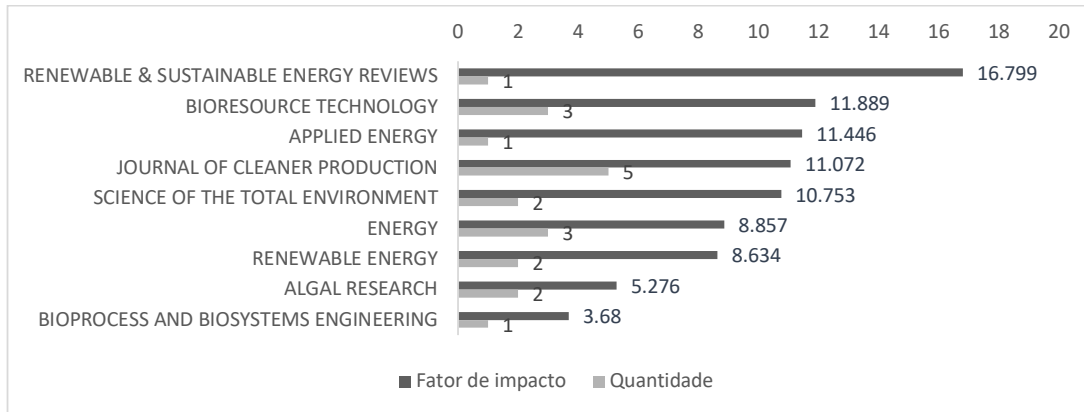


Figura 3 - Fontes mais relevantes do PB selecionado entre 2016-2022.

3.1.3 Países mais relevantes segundo as publicações sobre ACV

Os 20 artigos selecionados sobre a avaliação do ciclo de vida foram publicados com a seguinte

frequência na Espanha (8), Itália (4), Alemanha (2), China (2), Dinamarca (1), Finlândia (1), França (1) e Índia (1). Na Fig. 4 pode ser visualizada a distribuição geográfica mundial dos mesmos.

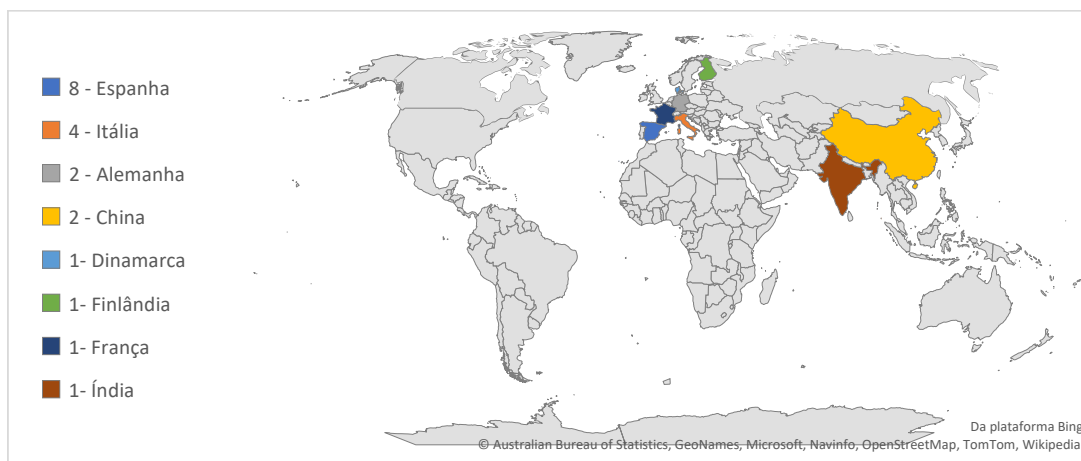


Figura 4 - Distribuição geográfica dos países que integraram o PB selecionado

3.1.4 Palavras-chave mais relevantes

Com base nos 20 artigos selecionados encontram-se na Fig. 5 as palavras-chave mais relevantes ao tema da avaliação do ciclo de vida em siste-

mas que utilizam algas para produção de biogás. Dessa forma foi evidenciado que as palavras-chave mais citadas dentre os 20 artigos foram respectivas ao idioma inglês, conforme segue-se: *biogas*

(22), *anaerobic digestion* (18), *algae* (14), *life cycle* (14), *environmental impact* (12), *life cycle assessment* (LCA) (12), *biomass* (10), *carbon dioxide* (10) e

life cycle analysis (10). De modo que, ao utilizá-las nas bases de dados de busca, a precisão para com os resultados pode ser aprimorada.

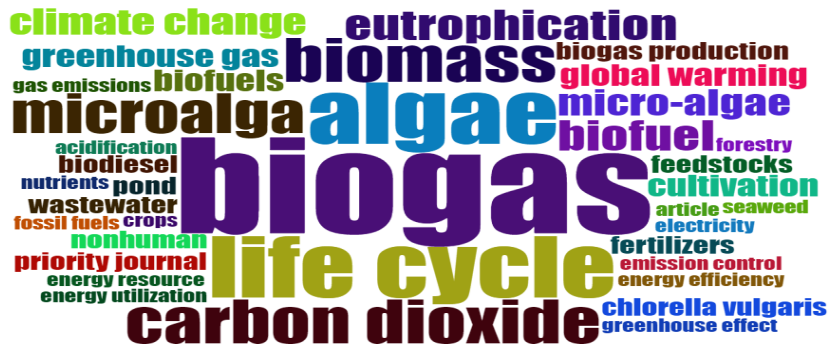


Figura 5 - Palavras-chave em inglês mais relevantes do PB selecionado.

3.1.5 Autores do portfólio bibliográfico selecionado e números de citações

Dos 20 artigos que integraram o PB selecionado, evidenciou-se que todos os autores foram citados pelo menos uma vez durante os anos de 2016 a 2020 (Fig. 6). Além disso, o número de citações foi expressivo, haja visto que 100% do PB foi citado mais de 10 vezes. Trabalhos como o

de Arashiro et al. (2018) demonstraram o maior número de citações (143), sendo seguido por Czyrnek-Delêtre et al. (2017) com 72, e Ertem; Neubauer; Junne (2017) com 71. Um aspecto interessante notado foi que não necessariamente os artigos mais antigos eram os mais citados; isso infere diretamente sobre sua relevância em termos do que está sendo mais pesquisado.

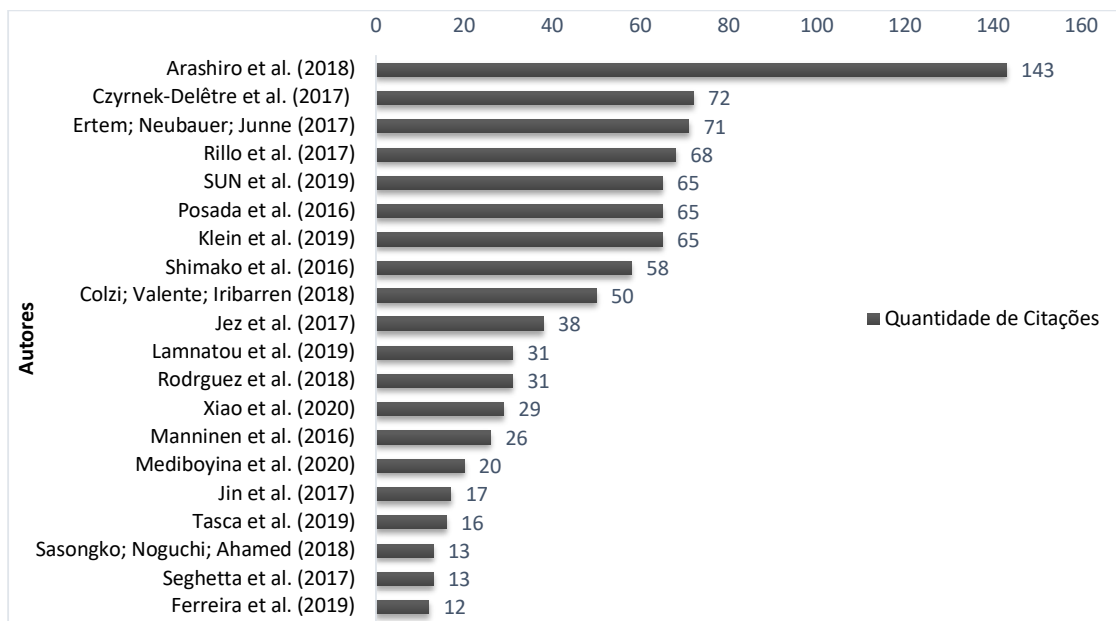


Figura 6 - Autores e quantidade de citações durante os anos de 2016 a 2020.

3.2 Revisão crítica sobre a avaliação do ciclo de vida (ACV) de sistemas voltados a produção de biogás a partir de algas

As discussões foram fundamentadas em função dos 20 artigos selecionados (Apêndice A - Tabela 1) que integraram o portfólio bibliográfico; estes foram integralmente lidos e tratados em relação à importância das suas informações dentre cada etapa de avaliação necessária à avaliação do ciclo de vida (ACV). Dentre os estudos fichados, foram evidenciados os que, além do biogás, também avaliaram a produção e os impactos do biodiesel. Nos estudos de Shimako et al. (2016), Sasongko; Noguchi; Ahamed (2018) e Sun et al. (2019) podem ser consultadas informações sobre a ACV da produção do biodiesel em escala real e conceitual. Outro ponto importante destacado foi que além da monodigestão das algas também houve estudos que realizaram a codigestão das biomassas. Os resultados encontrados foram mapeados, tratados graficamente e discutidos nesta seção, conforme os aspectos de localização geográfica, tipo de matéria-prima

utilizada, unidade funcional (UF) de referência, limite do sistema (do berço ao portão, do berço ao túmulo, e do berço ao berço), utilização do biogás, utilização do lodo digerido e a avaliação das categorias de impacto.

3.2.1 Local de aplicação e países

Foi dado um destaque para as localidades onde foram desenvolvidos os estudos da ACV, pois diversos autores confirmaram em seus estudos que de fato a distribuição geográfica influenciava tanto no quesito de sustentabilidade como na forma de cultivo das algas e produção de biogás. Conforme a Fig. 7, dentre o PB, a Espanha foi o país que mais desenvolveu trabalhos sobre a ACV, com 25% de representatividade, sendo este seguido pela China (15%), França (10%) e Itália (10%). Os demais países, como Alemanha, Dinamarca, Finlândia, Holanda, Índia, Indonésia, Irlanda, representaram 5% de representatividade, incluindo o Brasil.

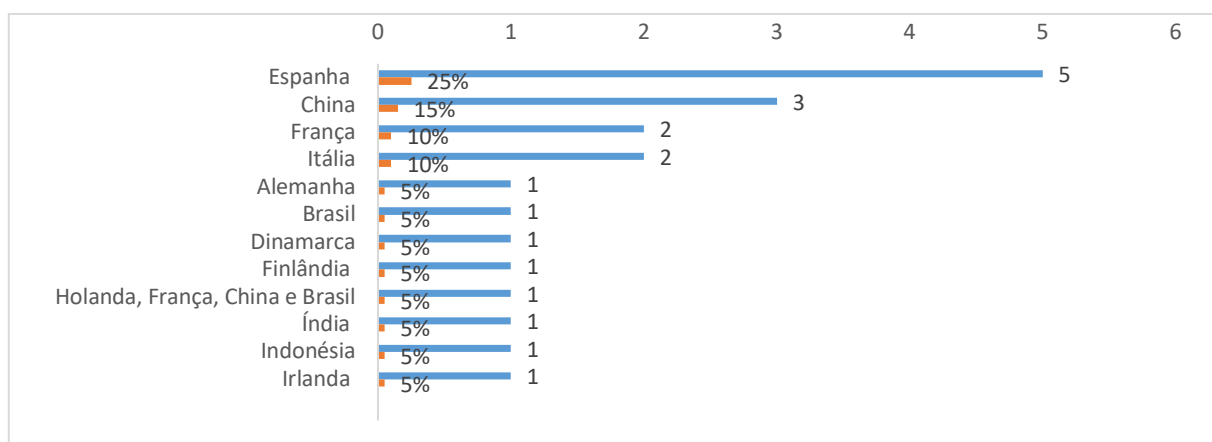


Figura 7 - Localização geográfica e frequência de publicações dos 20 artigos do PB.

Questões sobre a interferência da localidade geográfica podem ser melhor exemplificadas em alguns estudos. Manninen et al. (2016) tiveram como objetivo avaliar as potencialidades e os de-

safios de uma estação de tratamento de águas residuárias (ETAs) de pequena escala conceitual, sendo esta combinada com o conceito de lagoa de algas. Entretanto, esse estudo foi realizado na Fin-

lândia, uma área de baixas temperaturas e pouca irradiação solar. Desta forma, os autores colocaram que o maior entrave para sustentabilidade é respectivo ao fornecimento de condições ideais ao crescimento ótimo das microalgas, principalmente no período de inverno. Além disso, a ACV apontou que a energia produzida pelo biogás não seria capaz de cobrir os gastos de energia (calor + eletricidade) necessários ao cultivo das algas e ao processo de colheita. Neste modelo, os autores concluíram que esse dado sistema não apresentava viabilidade econômica e ambiental para ser implementado em escala real.

O que se contrapõe a Jez et al. (2017) foi que os autores viabilizaram a substituição da energia gerada pelo biogás pela instalação de sistemas fotovoltaicos, pois ambientalmente seria mais conveniente, uma vez que o biogás contribuía significativamente com a emissão de gases poluentes. No dado estudo, os sistemas fotovoltaicos foram estimados a partir de cenários e dados provenientes do software SimaPro 7.3.3 representando uma eficiência de conversão de 25%. Diferentemente das condições adversas evidenciadas na Finlândia, a localidade em questão possuía ótimos índices de luminosidade, referindo-se a uma região da Itália. Com a implementação do sistema fotovoltaico, os impactos do sistema seriam diminuídos em cerca de 68% das mudanças climáticas e 66% do esgotamento fóssil. Czyrnek-Delêtre et al. (2017) é outro exemplo positivo que dispôs sobre a influência da localidade na sustentabilidade do sistema. Os autores analisaram as características do local e as épocas sazonais a fim de verificar a influência desses na produção do biogás. De fato, conseguiram evidenciar que o biometano produzido no mês de agosto diminui em 22% os impactos ambientais na Irlanda. Também foi notado que a sustentabilidade do sistema aumentava em conformidade com o crescimento das algas por unidade de área, posto que as algas removiam resíduos ricos em nitrogênio e fósforo das águas

residuárias, e como consequência aumentavam o seu rendimento.

Já em Shimako et al. (2016), diferentemente dos demais autores, além do biogás, também avaliou a sustentabilidade do biodiesel. Um ponto interessante referente a esse estudo é o enfoque da localidade para o cultivo das microalgas. O local de cultivo foi o sul da França, à beira-mar, com grande quantidade de luz solar e próximo a uma usina termelétrica para fornecer quantidades ótimas de CO₂ para o cultivo das microalgas. Apesar das condições favoráveis, os autores evidenciaram que a combustão do biodiesel e do biogás se baseava no dióxido de carbono fóssil proveniente da usina termelétrica. Por tais motivos, apesar das ótimas condições ambientais, a ACV apontou que o sistema em questão não era sustentável, visto que o dióxido de carbono fóssil contribuía negativamente com as mudanças climáticas.

Posada et al. (2016) realizaram uma comparação por meio de um projeto conceitual para avaliar o desempenho ambiental de biorrefinarias em localidades geográficas distintas, conforme segue-se, França, Holanda e China. Como já apontado pelos estudos discutidos até então, nesse estudo também foi comprovado que a localização geográfica influenciou na sustentabilidade dos sistemas. Essa influência referiu-se a um mix específico de eletricidade e ao seu preço relacionado. Um exemplo é que a França obteve a pior avaliação em relação aos impactos ambientais, pois o uso da energia elétrica baseava-se principalmente na produção de energia nuclear. Da mesma forma, a Holanda e a China não obtiveram uma boa avaliação, pois em ambos os países a mistura de eletricidade é composta principalmente por combustíveis fósseis em sua matriz energética.

3.2.2 Tipo de biomassa

Foi verificado que 100% dos estudos do PB se utilizaram de biomassa algacéa (microalgas e/

ou macroalgas) como uma das fontes de matéria-prima. É válido destacar que o termo algas foi adotado para os casos, onde não foram especificados o tipo de biomassa algácea utiliza-

da. Conforme a Fig. 8, 55% dos trabalhos utilizaram microalgas como biomassa necessária ao processo de biodigestão anaeróbia voltada à produção de biogás.

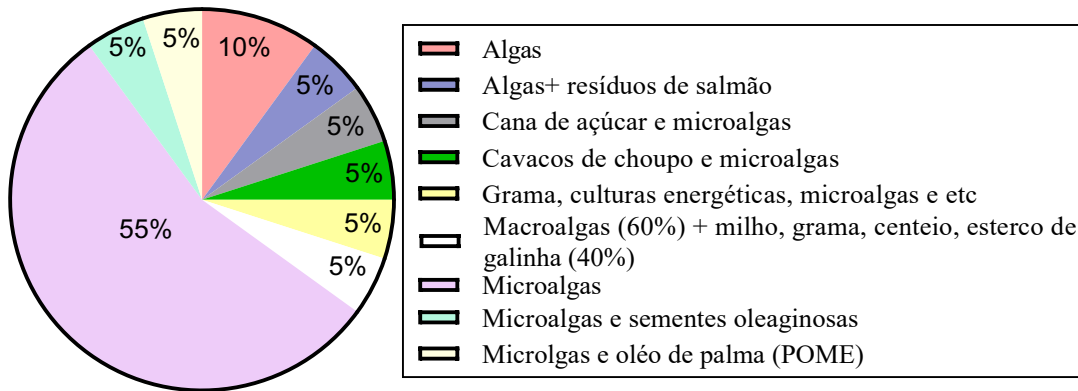


Figura 8 - Tipo de biomassa utilizada nos estudos de ACV.

Além disso, em 35% dos trabalhos foi verificada a realização do processo de codigestão (biomassa algácea + outras matérias-primas) (Fig. 8). A maioria desses estudos teve como finalidade aumentar os rendimentos de biogás, mas é válido destacar que em alguns trabalhos também foi identificada a produção de biodiesel. Um ótimo exemplo de codigestão pode ser verificado em Sasongko; Noguchi ; Ahamed (2018). Os autores tinham como principal objetivo a produção de biodiesel, utilizando-se de duas biomassas: óleo de palma e microalgas. Os autores apontaram em seus resultados que dependendo do tipo de biomassa, essa é capaz de corroborar a diminuição dos impactos ambientais. De fato, o dado estudado apresentou que o biodiesel contribuiu com a diminuição de 62,37gCO₂ eq/MJ de gases de efeito estufa, ou 25,57% a menos do que o diesel de referência (83,8gCO₂ eq/MJ), enquanto a produção combinada (microalgas + óleo de palma) contribuiu com 49,78 gCO₂ eq/MJ ou 40,59% menos do que o diesel de referência.

Ainda sobre a Fig. 8, vale destacar que foram evidenciados autores que inviabilizaram o uso

da biomassa algácea quando esta é produzida com a finalidade de produzir óleo de microalgas para fins energéticos. Jez et al. (2017) buscaram comparar o óleo de microalgas com o óleo de cultivos convencionais proveniente de sementes oleaginosas (girassol e colza). De fato, os autores conseguiram demonstrar maiores impactos ambientais em relação ao uso do óleo de microalgas como matéria-prima. Foi enfatizado que quaisquer que sejam as aplicações energéticas do óleo de microalgas, não são capazes ambientalmente de competir com o óleo fóssil e o óleo de colza. Os impactos gerados devem-se à grande demanda de energia (eletricidade + calor) necessários e ao consumo de materiais para a produção de biomassa algácea. Além disso, as emissões de CO₂ do óleo de microalgas são maiores do que o óleo combustível em duas ordens de magnitude, enquanto o óleo de colza poderia representar ao sistema uma redução de cerca de 36% das emissões de gases de efeito estufa. Como forma conclusiva, os resultados deste estudo demonstraram, de forma geral e independentemente da região global, que o óleo de microalgas está longe de ser aceitável para fins energéticos.

3.2.3 Unidade funcional (UF)

Conforme ISO 14040 (2006), a unidade funcional fornece uma base lógica para comparar o desempenho ambiental das alternativas possíveis ao aumento da sustentabilidade de um dado sistema de referência. A unidade funcional é usada como uma unidade de referência para quantificar o desempenho dos sistemas de produtos. Normalmente, quando se prevê a produção de biogás, a escolha

da unidade funcional em sistemas de bioenergia é baseada em energia, massa, distância, volume e hectare de terra agrícola (AZIZ; HANAFIAH; GHEEWALA, 2019). Conforme Fig. 9, os estudos de ACV demonstraram unidades funcionais distintas: t, kg, m³, MJ, kWh = Potência (KW) x h (horas) e ha. Contudo, houve predominância em 40% dos trabalhos da utilização do MJ como unidade funcional para produção de bioenergia.

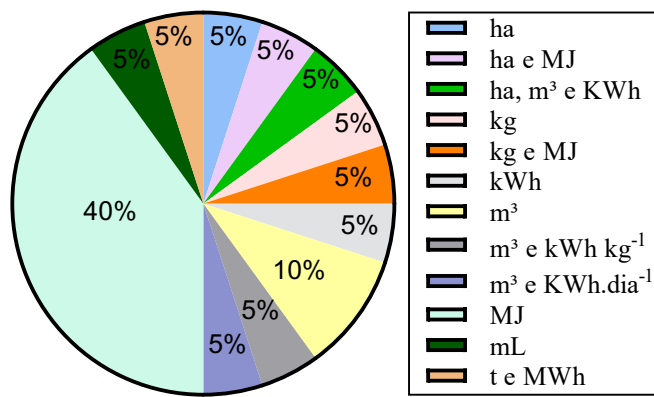


Figura 9 - Unidades funcionais adotadas dentre o PB.

No estudo de Ertem; Neubauer; Junne (2017) os resultados demonstraram que diferentes unidades funcionais conduzem a resultados diversos, o que sublinha a importância da consideração de uma UF relevante. Os autores compararam duas UF para produção de bioenergia, conforme segue-se: 1MJ de produção de energia a partir da digestão anaeróbia de macroalgas e 1kg de matéria-prima de culturas energéticas alimentada nos digestores. Foi demonstrado respectivamente por meio da avaliação das categorias de impacto, aquecimento global (AG), acidificação (A), eutrofização (E) e transformação de terra (TDT) que quando a UF era definida em 1 MJ, os impactos poderiam ser minimizados em 67%, 95%, 65% e respectivamente 73% por evitar o espalhamento do lodo digerido, uma vez que o sistema em questão analisado não

incluiu nenhuma atividade agrícola. Já quando a UF estabelecida era respectiva a 1 kg de matéria-prima, os impactos da E e AG seriam aumentados respectivamente em 22% e 15% em relação à UF anteriormente adotada. De modo geral, os autores concluíram que quando o objetivo é produzir mais energia, a substituição de culturas energéticas por biomassa de macroalgas é viável, pois ajuda a resolver o dilema entre bioenergia e produção de alimentos. No entanto, quanto à quantidade de matéria-prima a ser transportada e alimentada nos biodigestores, seria interessante analisar todo o sistema com base na UF de 1 kg de matéria-prima. Nesse caso específico, as culturas energéticas poderiam ser mais favoráveis para mitigar os efeitos ambientais negativos das usinas de biogás (ER-TEM; NEUBAUER; JUNNE, 2017).

3.2.4 Limite do sistema

Sobre a limitação dos perímetros do sistema, em 50% dos trabalhos a ACV foi utilizada para verificar os impactos dos bioprodutos do berço ao túmulo, ou seja, a ACV desenvolvida cobriu a fase de utilização do biogás. Vale destacar que 45% dos trabalhos desenvolveram a análise do berço ao portão; isso quer dizer que incluíram a suplementação da matéria-prima até a produção de biogás. Por fim, apenas 5% dos trabalhos possuíam o limite do sistema como do berço ao berço, ou seja, os recursos foram maximizados ao máximo dentro sua cadeia produtiva. Em relação à importância do limite do sistema para produção sustentável de biocombustíveis, destacaram-se alguns trabalhos do PB. Um exemplo foi em relação ao sistema do berço ao berço demonstrado no trabalho de Jin et al. (2017). Os autores demonstraram um sistema de micro-bio-loop para produção de biogás. O micro-bio-loop (sistema de reintegração de recursos) era integrado pela cultura de microalgas, de-oxigenação (remoção de oxigênio dissolvido, sendo este progressivamente esgotado pela respiração escura da microalga), digestão anaeróbia e decomposição anaeróbia. Foi apontado que o sistema produzia 0,1873 m³/dia de biogás; além disso, as taxas de reciclagem de N, P e K (nitrogênio, fósforo e potássio) no micro-bio-loop atingiam 99,8 ± 1,9%, 102,7 ± 1,1% e 104,2 ± 0,9% respectivamente. Tal sistema fornecia fertilizante às culturas de microalgas, livrando-se de fertilizantes químicos, ou seja, havia uma integração de bioprodutos novamente ao berço. Destacaram, ainda, que o sistema de micro-bio-loop possui alto potencial de mercado, sendo avaliado em cerca de US\$ 40 bilhões para estimular a produção de biogás. Segundo os autores, esse tipo de sistema é capaz de reduzir a emissão de CO₂ em pelo menos 210 milhões de toneladas nos próximos 5 anos (JIN et al., 2017).

Já um exemplo em relação ao limite do sistema do berço ao túmulo referiu-se ao trabalho de Klein et al. (2019). Os autores apontaram que uma instalação integrada de microalgas a uma usina de cana-de-açúcar é capaz de diminuir os impactos ambientais envolvidos na produção de etanol de anidro. De fato, as emissões de gases de efeito estufa do berço ao túmulo flutuaram em torno de 18g CO₂ eq/MJ, com redução de 15% em relação ao etanol convencional de cana-de-açúcar. Além disso, segundo os mesmos autores, dependendo do cenário, uma biorrefinaria integrada que produz em torno de 347 milhões de litros de etanol anidro/ano seria capaz de mitigar cerca de 500 mil t CO₂ eq/ano ao substituir a gasolina pelo etanol de anidro. Tal exemplo citado, acentuou a importância da ramificação de sistemas, em vista das vantagens ambientais apontadas pela integração. O que se contrapõe com Sasongko; Noguchi; Ahamed (2018), visto que os autores se utilizaram de um limite do sistema como do berço ao portão, e destacaram na prática pontos que poderiam ser melhorados a partir da maximização do sistema de referência. Determinados autores tiveram como objetivo demonstrar que sistemas combinados por óleo de palma e microalgas são uma ótima alternativa quando se prevê o reaproveitamento do biogás. Nesse estudo, ao ser produzido o biodiesel, o fluxo de biogás saía do sistema e não o integrava novamente, de modo que não havia a produção de energia (calor + eletricidade) adicional, representando perdas consideráveis. Ainda segundo os autores, o calor e o CO₂ poderiam ser direcionados à produção de biomassa de microalgas, e se o biogás fosse reaproveitado, seriam gerados cerca de 45 GWh/ano de energia total. De fato, Posada et al. (2016) e Klein et al. (2019) corroboraram que determinado sistema perde fluxos expressivos de energia, que poderiam ser reintegrados novamente ao seu ciclo de produção.

3.2.5 Utilização do biogás

Foi evidenciado por meio da Fig. 10 que 35% dos trabalhos se utilizaram da energia adicional (energia elétrica + calor) produzida pelo biogás. Na maioria dos trabalhos, o calor gerado era utilizado para o aquecimento das lagoas das microalgas, a fim de manter uma temperatura ideal

ao seu cultivo. Esse aspecto foi observado em regiões geográficas mais frias, como na Finlândia. Para tanto, também foi verificado o uso do calor para manter uma temperatura adequada à fermentação, destacando-se um exemplo de sistemas integrados de produção de biodiesel e biogás. Notou-se que apenas 25% se utilizaram da energia elétrica como energia adicional.

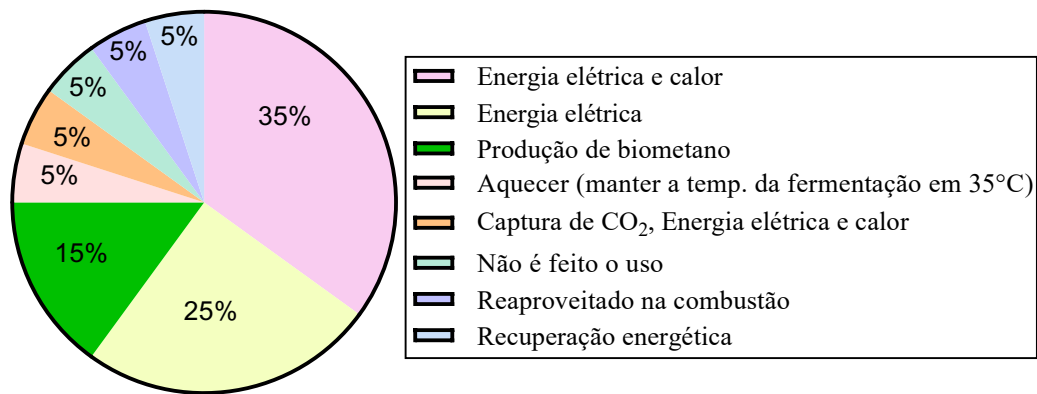


Figura 10 - Tipo de uso do biogás dentre o PB.

Além dos tipos de uso demonstrados na Fig. 10, conforme Ertem; Neubauer; Junne (2017), o biogás também poderia ser utilizado para produção de bio-hidrogênio. Os autores estudaram a questão de conceitos integrados em biorrefinarias e evidenciaram que certas algas possuem a capacidade de produzir outros tipos de biocombustíveis líquidos e gasosos como o bio-hidrogênio.

Já em Tasca et al. (2019) foi evidenciado outro exemplo de produção de biocombustível por meio do biogás, como o biometano. No estudo, foram analisadas duas cadeias produtivas para a produção de biometano: a gaseificação de cavacos de madeira de álamo e a biodigestão anaeróbia da microalga (*Chlorella vulgaris*). Os autores apontaram que o fornecimento de biometano poderia aumentar a recuperação de calor. Além disso, o CO₂ liberado pela produção de biogás poderia ser reciclado conforme evidenciado em

Rillo et al. (2017), ou seja, injetado nos processos ou instalações ligadas ao cultivo das microalgas. Outras alternativas viáveis foram respectivas à captura e armazenamento de carbono. O carbono capturado pode ser integrado em sistemas industriais que separam o dióxido de carbono do gás de combustão de combustíveis fósseis, e sequencialmente, o CO₂ da mesma forma, também pode ser direcionado ao cultivo das microalgas (ERTEM; NEUBAUER; JUNNE, 2017; TASCA et al., 2019). Além das sugestões exemplificadas por Tasca et al. (2019) em relação ao uso do biometano, Manninen et al. (2016) e Maga (2017) sugeriram o uso do biometano como biocombustível, como uma forma de substituir o gás natural veicular (GNV) e amenizar as emissões de combustíveis fósseis.

Já no estudo de Rodríguez et al. (2018), diferentemente dos estudos acima, o biogás não esta-

va sendo reaproveitado. Segundo estimativas demonstradas pela ACV, a planta em questão produzia cerca de 0,254 kg CH₄/kg pela digestão anaeróbia. Além disso, o sistema industrial em questão apresentava um poder calorífico de 42 MJ/kg de CH₄, e a energia produzida pelo processo estudado era de 10,67 MJ/g de biomassa seca. Tal estudo salientou grandes lacunas, visto que essa quantidade de energia poderia ser reintegrada a outros processos.

Além dos tipos de uso do biogás, Manninen et al. (2016) citaram que o excesso de calor, proveniente da unidade combinada de calor e energia (*Combined Heat and Power* - CHP) e produzido a partir da biomassa de microalgas, poderia ser utilizado para o aquecimento do tanque de algas no inverno, visto que a luminosidade em determinada época sazonal é baixa na Finlândia se comparada com demais estações anuais. Outra opção é o uso da energia produzida para outros fins que não sejam os processos internos, como,

por exemplo, o calor e a eletricidade produzidos podem ser vendidos como créditos de carbono (MANNINEN et al., 2016).

3.2.6 Utilização do lodo digerido

Conforme Fig. 11, 65% dos estudos fizeram o uso do lodo digerido para diversos fins. Vale destacar que todos os autores salientaram a importância do lodo digerido ser integrado aos fluxos do sistema, haja vista que muitos dos impactos devem-se ao uso de fertilizantes químicos voltados ao cultivo das microalgas ou pelo uso inadequado na agricultura sem o prévio tratamento. Além disso, nutrientes orgânicos podem ser reciclados e ofertados como forma suplementar às culturas de cultivo de microalgas. Também se destacou que em 35% dos estudos o lodo digerido não tinha outro uso a não ser a disposição final, isso infere consequentemente a existência de custos adicionais com o transporte.

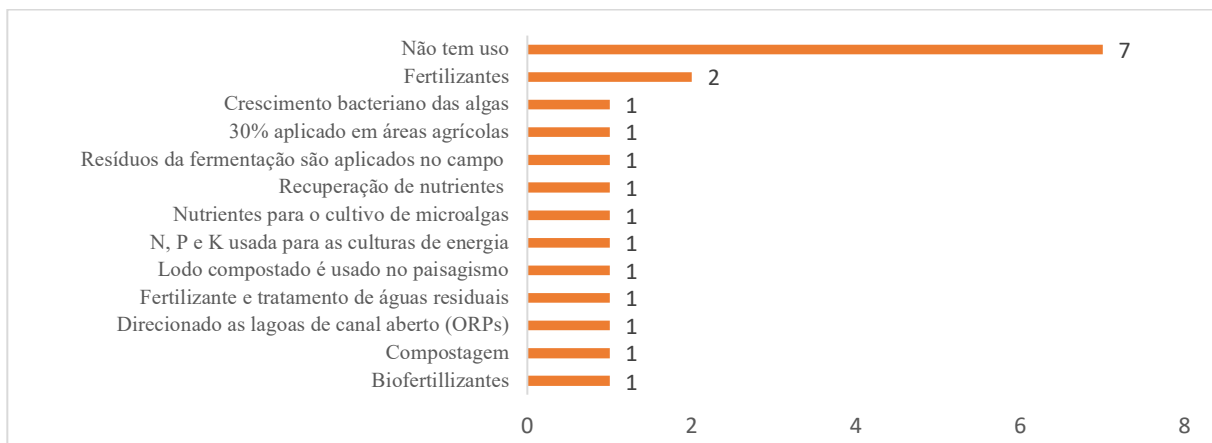


Figura 11 - Tipos de uso do lodo digerido dentre o PB.

Manninen et al. (2016) especificaram em seu estudo o potencial do lodo digerido. Os autores apontaram que cerca de 43%-66% do N e 30%-89% do P poderiam ser reciclados e utilizados como fertilizantes orgânicos na agricultura. En-

tretanto, determinado resíduo com tamanho potencial apenas era utilizado no paisagismo. Segundo Shimako et al. (2016), quando o sistema de produção de biogás é combinado com a valorização de resíduos de algas na agricultura,

o desempenho ambiental do sistema pode ser ainda mais maximizado. Porém, conforme Jin et al. (2017), existem certos entraves em relação a esse aproveitamento, que se explicam pelo fato de que o gerenciamento dos fertilizantes orgânicos é mais trabalhoso em comparação com os fertilizantes químicos, e por conta disso existe baixa aceitação dos agricultores.

Entretanto, em Maga (2017) foi apontada a necessidade do não uso do lodo digerido no solo, pois o lodo digerido em questão foi respectivo aos resíduos da fermentação após digestão anaeróbia, apresentando as seguintes emissões por dia de poluentes no ambiente: 1,68 kg CH₄, 21 kg NH₃, 5,4 kg N₂O, 0,3260 kg CO₂ (biótico) e 99 kg de carbono fixado no solo. Em particular, o autor destacou o óxido nitroso devido ao seu alto potencial poluidor e corroboração com as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, também se verificou a presença de metais pesados no lodo. Para tanto, os valores de quantificação não foram informados no determinado estudo, e desta forma negligenciados e conseqüentemente não quantificados pela ACV.

Além dos tipos de uso apontados até então, em Sun et al. (2019) é constatado um exemplo positivo em relação ao uso do lodo digerido. No determinado estudo, o lodo digerido estava sendo

utilizado como fonte de matéria orgânica nas lagoas de canal aberto localizadas em uma estação de tratamento de águas residuárias localizada no sudoeste da China. Dessa forma, ofereciam melhores condições ao crescimento microalgáceo, bem como foi viabilizada uma corroboração com a economia de custos totais. Tal cenário também foi evidenciado em demais estudos, como em Ertem; Neubauer; Junne (2017); Ferreira et al. (2019) e Xião et al. (2020). Ainda, Ferreira et al. (2019) relataram que ao remover os nutrientes do lodo digerido proveniente da digestão anaeróbia, o impacto da eutrofização das águas residuárias pode ser substancialmente minimizado a partir do seu prévio tratamento.

3.2.7 Categorias de impactos

A Fig. 12 demonstra quais foram os tipos de análise de impactos realizados dentre o PB. Notou-se que, na maioria dos trabalhos, parcela respectiva a 70% executou a análise de *Medpoint*. É válido salientar que em 30% foram aplicadas análises mais complexas, como *Endpoint*. Diversos autores do PB defendem a realização do *Endpoint* devido a sua complexidade e magnitude em relação ao mapeamento dos impactos, sendo esses, ambientais, econômicos, sociais, dentre outros.

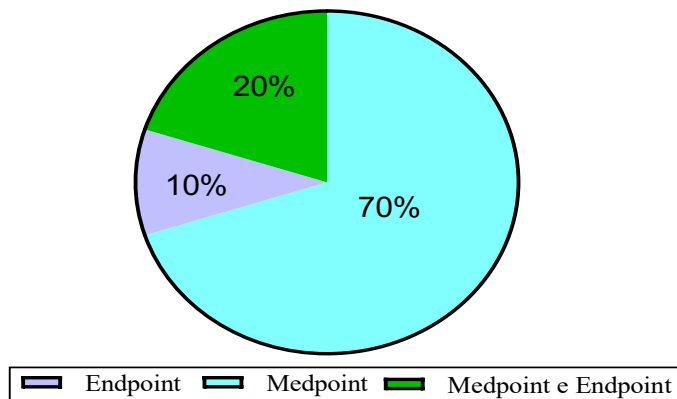


Figura 12 - Tipos de avaliações de impacto encontradas dentre o PB.

Em relação aos impactos ambientais mais preocupantes, diversos autores citaram as lagoas de cultivo de algas como uma das principais contribuintes com as categorias de impactos. Ferreira et al. (2019) apontaram como categorias de maior impacto ambiental em sistemas de lagoa de alta taxa (LAT) o esgotamento de fósseis (recursos), a toxicidade humana (saúde humana) e as mudanças climáticas (ecossistemas). Segundo os autores, tais impactos foram causados principalmente pela operacionalidade das lagoas de alta taxa, sendo de 30,8%. Mediboyina et al. (2020) corroborou a afirmativa. Os autores demonstraram que o sistema de cultivo é a principal etapa do processo de uso intensivo de energia, sendo em cerca de 89,4% a 97,2% do uso da demanda total de energia. O maior consumo de energia deve-se ao funcionamento das rodas das pás da lagoa do canal adutor (15 W m^{-3}). Entretanto, Ferreira et al. (2019), por meio da ACV, viabilizaram uma solução a partir de uma fonte potencial de energia adicional. No caso, foi sugerida a produção do biometano por meio do reaproveitamento do biogás, no qual este seria capaz de diminuir o consumo de energia para a ordem de $2 \times 10^{-1} \text{ MJ/Nm}^3$.

Um exemplo interessante de compensação ambiental foi notado no estudo de Sasongko, Noguchi; Ahamed (2018). Neste estudo também havia o cultivo de algas (microalgas); entretanto, o efluente de uma fábrica de óleo de palma era aproveitado. Tal efluente é classificado como uma categoria de águas de cinza. Para o dado estudo, o uso das águas de cinza contribuiu com a diminuição dos impactos evidenciados pela carga ambiental. Outro ponto importante foi em relação ao reaproveitamento do biogás. Os valores demonstraram uma contribuição em até 20.766 toneladas de $\text{CO}_2 \text{ eq.ano}^{-1}$ ou 60,73% a menos que o fator de emissão médio atual (SASONGKO; NOGUCHI; AHAMED, 2018).

Em relação às emissões de CO_2 , Mediboyina et al. (2020) destacaram que o biodiesel emite mais CO_2 para seu processo de conversão do que o biogás. Segundo os autores, os valores de CO_2 resultantes do processo de digestão anaeróbia para produção de biogás e secagem reação e purificação para produção de biodiesel eram direcionados à produção de biomassa de microalgas em uma lagoa adutora. A quantidade de CO_2 capturada durante a produção de biodiesel e biogás foi de 1,14 e 0,18 kg por MJ de biocombustível, respectivamente. O interessante foi que os dois cenários capturaram a mesma quantidade de CO_2 , pois a produção diária de biomassa foi a mesma ($391 \text{ kg.por.dia}^{-1}$). Os maiores consumos de energia também foram evidenciados em um mesmo processo referindo-se à rota do biodiesel, uma vez que envolvia processos como o cultivo de *S.dimorphus* em lagoa adutora, colheita por floculação, desidratação usando a opção de secagem mecânica, extração de lipídios, reação e purificação, o que corroborou o encontrado por Ferreira et al. (2019).

Em vista de tais aspectos, Maga (2017) apontou em seu estudo a importância de viabilizar fontes alternativas de reaproveitamento de energia. O autor, a partir do pré-tratamento anaeróbio, conseguiu viabilizar uma contribuição de 16% da demanda total de energia cumulativa. Sun et al. (2019) também demonstraram vantagens significativas da realização do pré-tratamento. O dado estudo utilizou o pré-tratamento hidrotérmico e, segundo a ACV, esse método foi mais viável industrialmente e ecologicamente correto em escala industrial devido à sua baixa razão de energia líquida.

Maga (2017) ainda relatou que as biorrefinarias a partir da biomassa algácea são capazes de gerar duas vezes mais energia do que consomem. Em seu estudo, as emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) por m^3 de águas residuais tratadas pela biorrefinaria foram de

0,28 kg CO₂ eq/MJ, e do tratamento convencional de 0,47 kg CO₂ eq/MJ. Conforme resultados encontrados, as biorrefinarias de algas permitem reduções de GEE em cerca de 40% a mais em comparação com o tratamento convencional de águas residuárias. Além disso, devido ao conceito integrado de biorrefinarias, o autor também indicou a utilização do biometano como biocombustível, haja visto que, segundo estimativas, 1 MJ de biometano usado em um motor de carro representa 0,02 kg CO₂ eq/MJ, enquanto a operação do carro com o GNV é substancialmente maior, apresentando 0,08 kg CO₂ eq/MJ.

Rillo et al. (2017) corroboraram Maga (2017) em relação à viabilidade do uso do biometano como biocombustível. Para tal, foi utilizado um sistema de célula de combustível de óxido sólido (CCOS) com a finalidade de produzir eletricidade e calor a partir do reaproveitamento do biogás. As categorias de impacto das mudanças climáticas e emissões de GEE apresentaram que o calor da CCOS é responsável por 9% das emissões globais de gases de efeito estufa, mesmo que cubram 33% da demanda total de calor do digestor. O calor do gás natural, ao contrário, é responsável por 67% das emissões de GEE e fornece 66% da demanda total de calor do digestor anaeróbico. Entretanto, apesar dos autores viabilizarem o uso do biogás, foram exemplificadas algumas ressalvas, e essas foram levantadas a partir da análise de três cenários distintos: o primeiro, utilizava do gás natural; o segundo, biogás sem espessamento do lodo, e o terceiro, também biogás, mas com o espessamento do lodo. Os resultados demonstraram para os dois primeiros cenários, respectivamente, alta contribuição com as categorias de impacto. O primeiro cenário demonstrou 79% de domínio da categoria de mudanças climáticas; além disso, o segundo cenário sem espessamento de lodo mostrou que, se comparado à cadeia de combustível do gás natural, o biogás produziu um impacto potencial 4,6 vezes maior. Por fim, o cenário três apontou que o uso

do biogás e a presença do espessamento do lodo diminuiriam pela metade o percentual de impacto da categoria de mudanças climáticas.

É válido destacar que muitos dos autores viabilizaram o uso do biogás, entretanto Jin et al. (2017) em seu estudo inviabilizam o uso do biogás proveniente de sistemas convencionais. Os autores demonstraram que determinado sistema é a pior opção em termos de potencial de aquecimento global, depleção abiótica, depleção da acidificação, eutrofização, radiações ionizantes, oxidação fotoquímica e depleção da camada de ozônio. A ACV representou que os impactos ambientais encontrados neste sistema são 188 vezes superiores aos sistemas integrados de micro-bio-loop. Inclusive, o custo operacional do sistema convencional representou 3 vezes o valor do sistema de micro-bio-loop, sendo respectivamente: US\$ 67,20/ano em comparação com o custo operacional geral de US\$ 0,0456/ano.

Também foi inviabilizada por alguns autores a codigestão dos resíduos com a biomassa algácea e a reciclagem de nutrientes. No estudo Ertem; Neubauer; Junne (2017) era realizada a codigestão das macroalgas com demais tipos de resíduos (milho, grama, centeio, esterco de galinha). A ACV apontou que os digestores anaeróbios eram os maiores contribuintes para as categorias de impacto, apresentando 44% - aquecimento global, 32% - acidificação e 40% - eutrofização devido às altas emissões de nitrato e fósforo. Tais valores foram justificados em função do uso do esterco de galinha e das altas emissões de nitrato e fósforo pela biodigestão do efluente. Já em relação à reciclagem dos nutrientes, o processo foi inviabilizado por Rodrigues et al. (2018), pois a reciclagem contribuiu significativamente com a depleção abiótica de recursos fósseis em 56%. Esse resultado negativo foi justificado pela quantidade de energia necessária para produção e redirecionamento de nutrientes aos demais fluxos do processo.

3.3 Lacunas encontradas relacionadas ao tema

Por mais que as algas sejam conhecidas como uma fonte potencial de biomassa para produção de energia renovável, seu uso ainda busca viabilidade econômica e sustentabilidade. Neste cenário, os estudos de avaliação do ciclo de vida são fundamentais à ampliação de qualquer tecnologia de processamento que promova a valorização da biomassa de algas. Foi possível concluir, por meio dos estudos de ACV do PB selecionado, que os resultados são principalmente extrapolações de estudos em escala laboratorial que não fornecem uma imagem mais abrangente sobre os problemas. Os principais problemas das análises realizadas foram a grande quantidade de incertezas e a falta de transparência dos dados utilizados para a análise, principalmente quando os dados eram provenientes de banco de dados que podem não representar bem a realidade local. Dessa forma, houve constatação de informações negligenciadas à avaliação, como, por exemplo, o lodo digerido contava com metais pesados em sua composição e os mesmos não eram quantificados. Também foi evidenciado que boa parte dos estudos ocultou a composição das algas, fator altamente importante à produção de biogás. Ainda, desafios referentes ao uso do lodo digerido podem ser citados: em muitos estudos o seu uso não foi informado, logo o seu reaproveitamento ou disposição final não foram considerados como elementos de avaliação, comprometendo a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados.

Embora a ACV use dados em escala piloto real, ainda permanece o desafio de adquirir dados de alta qualidade, em particular para o cultivo de algas. O cultivo requer uma aquisição de dados consistente ao longo de vários anos, pois diversos parâmetros podem interferir, como mudanças climáticas, mudança na composição das águas residuárias, e conseqüentemente refletir em diferentes espécies de algas e impactar positivamente ou não a produção de biogás. Por tais motivos, a ACV

deve ser um elemento de análise inicial ou suporte para aprimorar e otimizar sistemas já em funcionamento. Essa revisão demonstrou que ainda são necessários maiores avanços em microbiologia, química e engenharia ambiental, de modo a viabilizar técnica e economicamente a comercialização do biogás em larga escala.

Outra lacuna preponderante referiu-se ao limite dos sistemas, pois foi constatado na maioria dos trabalhos que apenas o biogás era produzido. Isso quer dizer que outros bioprodutos de alto valor agregado poderiam ser produzidos a partir dessa biomassa algácea residual. Dessa forma, o estudo atual demonstrou que estratégias devem ser implementadas como forma de retratar um cenário mais viável e realista em larga escala. Estratégias promissoras que podem ser descritas nesta revisão trataram do uso de águas residuárias como meio de cultivo das algas e a exploração de sistemas integrados como as biorrefinarias de algas. A recirculação de nutrientes do próprio processo e a utilização de fertilizantes agrícolas, para o cultivo algáceo, também foram muito analisadas. Ainda, desafios do cultivo de microalgas podem ser citados, como a alta requisição energética das pás de recirculação para sistemas de cultivo abertos e a grande necessidade de área.

Por fim, os resultados também mostraram a necessidade da criação de um protocolo específico para ACV de sistemas de águas residuárias que integram algas como etapa de pós-tratamento. Foi evidenciado que não existe uma padronização em relação aos parâmetros necessários às avaliações, principalmente quando se trata da avaliação de impactos, de modo que as categorias de impacto são nomeadas de diversas formas, o que dificulta muito a reprodutibilidade dos resultados em estudos posteriores e a atualização dos bancos de dados. Espera-se que essa alternativa possa garantir a comparabilidade entre os estudos e aumentar a transparência dos resultados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após revisão crítica dos 20 artigos que constituíram o portfólio bibliográfico, as considerações finais foram:

- Os resultados mais importantes sobre a ACV demonstraram que a produção de biogás é uma das melhores soluções alternativas para o gerenciamento e gestão inteligente dos recursos provenientes do tratamento das águas residuárias, principalmente quando o limite do sistema é maximizado, ou seja, quando o biogás produzido é reintegrado ao ciclo de referência como fonte de energia adicional.
- Também foi apontado que a localidade geográfica pode ser um influenciador positivo ou não, e por tais motivos é enfatizada a importância do planejamento prévio de um projeto de instalação de cultivo e processamento de algas.
- Foi demonstrado que as microalgas são um excelente recurso à produção de biogás, em razão da sua alta produtividade e do impacto ambiental reduzido, se comparadas com outras matérias-primas. Além disso, foi concluído que o CO₂ produzido no processo de conversão do biogás pode ser utilizado para suprir a demanda carbonácea do cultivo algáceo, aumentando a sua produtividade e, por consequência, produzindo mais biogás.
- Além dessas conclusões, foram encontrados estudos altamente promissores em escala real, com destaque para os sistemas de biorrefinarias. Nesta revisão, os sistemas integrados, como as biorrefinarias, demonstraram grande viabilidade tecno-econômica, visto que produziram duas vezes mais energia do que consomem. Além de terem corroborado a minimização dos impactos ambientais, demonstraram potencial de mercado para estimular a produção de bioenergia e a substituição dos combustíveis fósseis pelo uso do biometano. As biorrefinarias reduziram em até 40% as emissões

de gases de efeito estufa se comparadas a sistemas convencionais de tratamento de águas residuárias.

- Da mesma forma, o lodo digerido também demonstrou aspectos positivos, por meio do seu uso na agricultura. Contudo, foi demonstrado que é extremamente necessária a sua prévia caracterização e higienização. Com a higienização do lodo digerido, gastos com a disposição final podem ser evitados, bem como com o uso de fertilizantes químicos, uma vez que o lodo digerido é rico em nutrientes, assim compactuando com a substituição dos fertilizantes químicos e com a minimização da emissão de gases de efeito estufa e com eutrofização de corpos d'água.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o fomento da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES). Também agradecemos ao CNPq pela bolsa de doutorado disponibilizada à doutoranda Renata Estevam, e as instalações do parque ETE-Araçás situada dentro do perímetro da CESAN Vila Velha Espírito Santo.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Estevam R; **Metodologia:** Estevam R; **Investigação:** Estevam R, Calmon JL e Lima JS; **Redação – Primeira versão:** Estevam R; **Redação – Revisão & Edição:** Estevam R, Gonçalves RF, Calmon JL e Lima JS; **Aquisição de Financiamento:** Estevam R e Gonçalves RF; **Supervisão:** Estevam R, Gonçalves RF e Calmon JL.

7 REFERÊNCIAS

ARASHIRO, L. T. et al. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Science of the Total Environment*, [s. l.], v. 622–623, p. 1118–1130, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.051>

- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- AZIZ, N. I. HAMNA A.; HANAFIAH, M. M.; GHEEWALA, SHABBIR H. A review on life cycle assessment of biogas production: Challenges and future perspectives in Malaysia. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 122, n. January, p. 361–374, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.047>
- BAHR, M. et al. Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 573–581, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es403596m>
- CHIA, S. R. et al. Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 129, p. 838–852, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.001>
- CHOUDHARY, P. et al. A review of biochemical and thermochemical energy conversion routes of wastewater grown algal biomass. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 726, n. 271, p. 137961, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137961>
- CZYRNEK-DELÉTRE, M. M. et al. Life cycle assessment of seaweed biomethane, generated from seaweed sourced from integrated multi-trophic aquaculture in temperate oceanic climates. **Applied Energy**, [s. l.], v. 196, p. 34–50, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.129>
- ERTEM, F. C.; NEUBAUER, P.; JUNNE, S. Environmental life cycle assessment of biogas production from marine macroalgal feedstock for the substitution of energy crops. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 140, p. 977–985, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.041>
- FERENHOF, H. A. et al. Environmental management systems in small and medium-sized enterprises: An analysis and systematic review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 74, p. 44–53, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.027>
- FERREIRA, A. F. et al. Life cycle assessment of pilot and real scale photosynthetic biogas upgrading units. **Algal Research**, [s. l.], v. 44, n. March, p. 101668, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101668>
- GANESH SARATALE, R. et al. A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 262, n. March, p. 319–332, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.030>
- GULER, A. T. et al. Automating bibliometric analyses using Taverna scientific workflows: A tutorial on integrating Web Services. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 830–841, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.05.002>
- HWANG, J. H. et al. Use of Microalgae for Advanced Wastewater Treatment and Sustainable Bioenergy Generation. **Environmental Engineering Science**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 882–897, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ees.2016.0132>
- JANKOWSKA, E.; SAHU, A. K.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 75, n. September 2017, p. 692–709, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.045>
- JEZ, S. et al. Comparative life cycle assessment study on environmental impact of oil production from micro-algae and terrestrial oilseed crops. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 239, p. 266–275, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.027>
- KAVITHA, S. et al. Nanoparticle induced biological disintegration: A new phase separated pretreatment strategy on microalgal biomass for profitable biomethane recovery. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 289, n. May, p. 121624, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121624>
- KLEIN, B. C. et al. Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 115, n. February, p. 109365, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109365>
- MAGA, D. Life cycle assessment of biomethane produced from microalgae grown in municipal waste water. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-016-0208-8>
- MANNINEN, K. et al. Resource recycling with algal cultivation: environmental and social perspectives. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 134, n. Part B, p. 495–505, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.097>
- MARTÍN JUÁREZ, J. et al. Effect of pretreatments on biogas production from microalgae biomass grown in pig manure treatment plants. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 257, n. February, p. 30–38, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.063>
- MEDIBOYINA, M. K. et al. Comparative life cycle assessment of autotrophic cultivation of *Scenedesmus dimorphus* in raceway pond coupled to biodiesel and biogas production. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 233–247, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02220-8>
- POSADA, J. A. et al. Conceptual design of sustainable integrated microalgae biorefineries: Parametric analysis of energy use, greenhouse gas emissions and techno-economics. **Algal Research**, [s. l.], v. 17, p. 113–131, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.022>
- REBELLO, S. et al. Sustainability and life cycle assessments of lignocellulosic and algal pretreatments. **Bioresource Technology**,

[s. l.], v. 301, n. December 2019, p. 122678, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122678>

RILLO, E. et al. Life Cycle Assessment (LCA) of biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) plant. **Energy**, [s. l.], v. 126, n. 2017, p. 585–602, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.041>

RODRÍGUEZ, R. et al. Environmental analysis of Spirulina cultivation and biogas production using experimental and simulation approach. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 129, p. 724–732, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.076>

SASONGKO, N. A.; NOGUCHI, R.; AHAMED, T. Environmental load assessment for an integrated design of microalgae system of palm oil mill in Indonesia. **Energy**, [s. l.], v. 159, p. 1148–1160, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.144>

SHIMAKO, A. H. et al. Environmental assessment of bioenergy production from microalgae based systems. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 139, n. 2016, p. 51–60, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.003>

SUN, C. H. et al. c. **Energy**, [s. l.], v. 171, p. 1033–1045, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.074>

TASCA, A. L. et al. Biomethane from Short Rotation Forestry and Microalgal Open Ponds: System Modeling and Life Cycle

Assessment. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 273, n. August 2018, p. 468–477, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.038>

TIAN, H. et al. Organic waste to biohydrogen: A critical review from technological development and environmental impact analysis perspective. **Applied Energy**, [s. l.], v. 256, n. August, p. 113961, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113961>

UBANDO, A. T. et al. A comprehensive review of life cycle assessment (LCA) of microalgal and lignocellulosic bioenergy products from thermochemical processes. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 291, n. July, p. 121837, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121837>

XIAO, C. et al. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 151, p. 70–78, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.145>

YAN, C.; ZHENG, Z. Performance of photoperiod and light intensity on biogas upgrade and biogas effluent nutrient reduction by the microalgae *Chlorella* sp. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 139, p. 292–299, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.054>

APÊNDICE A - PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO SELECIONADO

Tabela 1 - Informações necessárias à discussão da ACV de sistemas de tratamento de águas residuárias que se utilizam de biomassa de microalgas para a produção de biogás

Autor	Objetivo	Localização	Matéria-prima	Pré-tratamento	Unidade funcional	Limite do sistema	Categoria de impacto	Utilização do biogás	Utilização do digestado	Fonte de dados
Xiao et al. (2020)	Realizar avaliações do ciclo de vida e econômicas da produção de biogás a partir de biomassa de microalgas em LATs	China	Microalgas	Hidrotérmico	1 ha, 1 m ³ de microalgas, 1 kWh de energia produzida	Berço ao túmulo	NER, GEE, VLP, LCOE, NPV	Reaproveitado na combustão	Nutrientes para o cultivo de microalgas	Literatura
Mediboyina et al. (2020)	Comparar o potencial líquido de absorção de CO ₂ , a demanda geral de energia primária e os impactos ambientais de rotas alternativas de biodiesel e cenários de produção de biogás da <i>S. dimorphus</i>	Índia	Microalgas	Térmico	1 MJ de do biocombustível	Berço ao portão	PAG, PA, PE e PEAAD	Energia elétrica	Não tem uso	Dados da literatura e experimentais

Continua...

Tabela 1 - Continuação...

Autor	Objetivo	Localização	Matéria-prima	Pré-tratamento	Unidade funcional	Limite do sistema	Categoria de impacto	Utilização do biogás	Utilização do digestado	Fonte de dados
Lamnatou et al. (2019)	Avaliar o perfil ambiental de uma planta de digestão anaeróbia em escala real	França	Grama, culturas energéticas, microalgas e etc	Não Realizou	1 t de matéria-prima; 1 t de digerido; 1 MWh de eletricidade produzida	Berço ao túmulo	MC, CRENRR, ISH, ER, CIHE	Energia elétrica e calor	Compostagem	Banco de dados Ecoinvent 3
Sun et al. (2019)	Obter um sistema industrial baseado em microalgas ideal por meio da ACV e unificar as incertezas causadas pelas discrepâncias de cada processo	China	Microalgas	Hidrotérmico	1 MJ de biocombustível (biogás e biodiesel)	Berço ao túmulo	NERs e GEE	Aquecer (manter a temperatura da fermentação em 35°C)	Direcionado as lagoas de canal aberto (ORPs)	
Ferreira et al. (2019)	Avaliar o consumo de energia, emissões e impactos ambientais de unidades em escala piloto interna e externa	Espanha	Algas	Não Realizou	1 ha de terra, 1MJ CH4 produzido	Berço ao portão	Saúde humana, Impactos de Ecossistemas e Recursos	Produção de biometano	Crescimento bacteriano das algas	Escala real e piloto
Klein et al. (2019)	Avaliar as perspectivas de biorrefinarias integradas de cana-de-açúcar + microalgas em grande escala	Brasil	Cana de açúcar e microalgas	Não Realizou	1mL CH4 g -1 SV produzido pelo biogás	Berço ao túmulo	Taxa Interna de Retorno, Valor Presente Líquido sobre o índice de investimento, payback descontado	Produção de biometano	Não tem uso	Simulações agrícola e industriais
Tasca et al. (2019)	Analisar duas cadeias produtivas para a produção de biometano: a gaseificação de cavacos de madeira de álamo e a digestão anaeróbia de <i>Chlorella vulgaris</i>	Território Europeu	Cavacos de choupo e microalgas	Termoquímico	1 MJ de energia produzida	Berço ao túmulo	MC, DO, AT, EAD, EAM, TH, FTO, MP, ET, ADM, RI, OTUA, TNT, ERH, MF	Energia elétrica	Fertilizante e tratamento de águas residuais	Escala real
Arashiro et al. (2018)	Avaliar os impactos ambientais potenciais associados a sistemas de LATs para o tratamento de águas residuais	Espanha	Microalgas	Térmico (75°C, 10h) (co-digerida com lodo primário)	1 m³ de água tratada	Berço ao túmulo	MC, DO, AT, EAD, EM, FOF, FP, DM, DF, THET	Recuperação energética	Biofertilizantes	Projetos de engenharia
Colzi; Valente; Iribarren (2018)	Avaliar o desempenho técnico-ambiental de um sistema de tratamento de águas residuais de média escala usando LATs	Espanha	Microalgas	Térmico	1 m³ de águas residuais brutas, 1 KWh. dia-1 produzido pelo biogás	Berço ao portão	EACF, AG, DCO, FOF, A, E	Energia elétrica e calor	Não tem uso	Literatura

Continua...

Tabela 1 - Continuação...

Autor	Objetivo	Localização	Matéria-prima	Pré-tratamento	Unidade funcional	Limite do sistema	Categoria de impacto	Utilização do biogás	Utilização do digestado	Fonte de dados
Rodrigues et al. (2018)	Avaliar o desempenho ambiental da produção de biogás através da ACV	Espanha	Microalgas	Não Realizou	1 kg de biomassa seca	Berço ao portão	DARF, PAG, PEAAD, PTH e DEC	Não é feito o uso	Não tem uso	Resultados experimentais e de simulação
Sasongko, Noguchi; Ahamed (2018)	Avaliar um sistema de produção de microalgas e óleo de palma através da ACV	Indonésia	Microalgas e óleo de palma (POME)	Não Realizou	1 ha de terra para produção de microalgas	Berço ao portão	Materiais energéticos (ME), GEE, Necessidade de Nutrientes, Escassez de Água	Energia elétrica e calor	Fertilizantes	Dados de campo
Ertem; Neubauer; Junne (2017)	Avaliar a produção de biogás pela substituição de culturas energéticas por macroalgas marinhas	Alemanha	Macroalgas (60%) + milho, grama, centeio, esterco de galinha (40%)	Mecânico (moagem e trituração)	1 kg de mistura de MP e 1 MJ de geração de energia	Berço ao túmulo	AG, Acidificação, eutroficação e potencial de transformação da terra	Energia elétrica e calor	N, P e K usada para as culturas de energia	Literatura e Ecoinvent 2.2
Jin et al. (2017)	Comparar a produção de biogás de AMBL com CBPS ao longo de seu ciclo de vida holístico	China	Microalgas	Não Realizou	1 MJ produzido pela combustão de CH ₄	Berço ao berço e berço ao túmulo	PAG, DA, PA, PE, RI, OF, DCO, VPL, TIR, PR	Energia elétrica	Recuperação de nutrientes	Dados derivados de recursos acadêmicos, produtores industriais e Ecoinvent
Jez et al. (2017)	Realizar a ACV a fim de comparar culturas de óleo de microalgas e sementes oleaginosas terrestres	Itália	Microalgas e sementes oleaginosas	Não Realizou	1MJ de energia incorporada em 1kg de óleo produzido	Berço ao portão	ET, EAD, EA, DO, FFO, MP, RI, OSU, OSN, DM, GEE	Energia elétrica	Não tem uso	Dados da literatura
Rillo et al. (2017)	Acoplar a análise ambiental da DA com um sistema CEC de alta eficiência utilizando CCOS para produzir eletricidade e calor	Dinamarca	Algas	Térmico	1 kWh de eletricidade produzido pelo sistema CCOS	Berço ao portão	MC, EF, AT, OF, FMP e GEE	Captura de CO ₂ , Energia elétrica e calor	Não tem uso	Banco de dados Ecoinvent 3, dados reais disponíveis (CCOS)
Maga (2017)	Demonstrar a viabilidade da produção sustentável de biometano com base em culturas de microalgas de baixo custo cultivadas em águas residuais municipais	Espanha	Microalgas	Biológico	1m ³ de água residual tratada e 1MJ em um motor a gás	Berço ao túmulo	SH, EENR, DMNM, EA, PA, IBE, EAA, PC, CA	Energia elétrica e calor	Resíduos da fermentação são aplicados no campo	Dados reais da escala piloto
Czyrnek-delètre et al. (2017)	Avaliar os potenciais impactos ambientais e benefícios da cultura integrada de algas e resíduos de salmão para a produção de biometano	Irlanda	Algas+ resíduos de salmão	Não Realizou	1 MJ de biometano	Berço ao portão	MC, A, ET, EM e EAD, PAG	Produção de biometano	30% aplicado em áreas agrícolas	Dados da literatura, primários e especialistas

Continua...

Tabela 1 - Continuação...

Autor	Objetivo	Localização	Matéria-prima	Pré-tratamento	Unidade funcional	Limite do sistema	Categoria de impacto	Utilização do biogás	Utilização do digestado	Fonte de dados
Manninen et al. (2016)	Avaliar as potencialidades e desafios de uma ETAR de pequena escala conceitual combinada com o conceito de lagoa de algas	Finlândia	Microalgas	Floculação química ou flotação	1 m ³ .d ⁻¹ de águas residuais e 1 kWh kg ⁻¹ de consumo de energia	Berço ao túmulo	Razão de energia líquida (NER), Demanda Cumulativa de Energia (DCE)	Energia elétrica e calor	Lodo compostado é usado no paisagismo	Entrevista com especialistas e literatura específica
Shimako et al. (2016)	Avaliar a eficiência ambiental de dois sistemas de obtenção de bioenergia a partir de microalgas	França	Microalgas	Não Realizou	1 MJ de energia produzida	Berço ao túmulo	PA, RN, SH e QE	Energia elétrica e calor	Fertilizantes	Dados da literatura e Base de dados Ecoinvent v2.2
Posada et al. (2016)	Selecionar e identificar potenciais vias de processamento e tecnologias relevantes para a valorização de microalgas em escala industrial	Holanda, França, China e Brasil	Microalgas	Ultrassom, ácido e básico	1 MJ do produto (energia) principal	Berço ao portão	ENR, PAG (GEE), REL, RLGE e CTP, COT, CF, CD, CDC e CCI	Energia elétrica	Não tem uso	Dados da literatura e Base de dados Ecoinvent v2.2

Siglas: Acidificação Terrestre (AT), Aquecimento Global (AG), Capital Depreciável (CD), Caracterização de Recursos Energéticos Não Renováveis e Renováveis (CRENRR), Caracterização dos Impactos Humanos e Ecotoxicológicos (CIHE), Contaminação da água (CA), Custos de Capital Indiretos (CCI), Custos Diretos de Capital (CDC), Custos Totais de Produção (CTP), Danos à Saúde Humana (DSH), Danos ao Ecossistema (E), Demanda Cumulativa de Energia (DCE), Demanda Energética Cumulativa (DEC), Depleção Abiótica (DA), Depleção Abiótica de Recursos Fósseis (ADFR), Depleção de Fósseis (DF), Depleção de Metal (DM), Depleção de Minerais Nutrientes e Metais (DMNM), Destruição da Camada de Ozônio (DCO), Destruição de Ozônio (DO), Esgotamento Abiótico de Combustíveis Fósseis (EACF), Destruição da Camada de Ozônio (DCO), Economia de energia não renovável (EENR), Ecossistemas e Recursos (ER), Ecotoxicidade de Água Doce (EAD), Ecotoxicidade Marinha (EM), Ecotoxicidade Terrestre (ET), Eficiência de Área (EA), Emissão de Radiações Ionizantes (RAD), Emissões Adicionais no Ar (EAA), Escassez de Recursos (ER), Esgotamento de Água (EA), Esgotamento de Fósseis (EF), Esgotamento de Metais (EM), Esgotamento de Recursos Hídricos (ERH), Eutrofização de Água Doce (EAD), Eutrofização Marinha (EM), Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidante Fotoquímico (FOF), Gases de Efeito Estufa (GEE), Impacto na Biodiversidade e Nos Ecossistemas (IBE), Impactos de Ecossistemas e Recursos (IER), LCOE, NPV, Materiais Energéticos (ME), Minerais e Fósseis (MF), Mudanças Climáticas (MC), Necessidade de Nutrientes (NN), Ocupação de Solo Natural (OSN), Ocupação de Solo Urbano (OSU), Ocupação de Terras Agrícolas (OTA), Ocupação de Terras Urbanas (OTU), Ocupação de Terras Urbanas e Agrícolas (OTUA), Oxidação Fotoquímica (OF), Payback Descontado (PD), Período de Retorno (PR), Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Ecotoxicidade Aquática de Água Doce (PEAAD), Potencial de Ecotoxicidade Aquática de Água Doce (PEAAD), Potencial de Eutrofização (PE), Potencial de Toxicidade Humana (PTH), Potencial de Transformação da Terra (PTT), Privação de água (PA), Proteção Climática (PC), Radiação Ionizante (RI), Recursos Naturais (RN), Soma do Custo Operacional (SCO), Taxa de energia líquida (TEL), Razão de energia líquida (NERs), Taxa Interna de Retorno (TIR), Toxicidade Humana (TH), Transformação Natural da Terra (TNT), Uso de Energia Não Renovável (UENR), Valor Presente Líquido (VLP), NI (Não Informado), Sistema convencional de produção de biogás (CBPS), Micro-Bio-Loop Avançado (AMBL), Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) e Sistema de Célula de Combustível de Óxido Sólido (CCOS).