



## ANÁLISE PATENTOMÉTRICA E DE COMPETITIVIDADE DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL A PARTIR DE ALGAS: ALTERNATIVA VISANDO A SEGURANÇA ENERGÉTICA

Sérgio Saraiva Nazareno Dos Anjos<sup>1</sup>  
Danusa Campos Teixeira Dos Santos<sup>2</sup>  
Thiago Henrique Martins Pereira<sup>3</sup>

### RESUMO

**Objetivo:** O objetivo principal do artigo é diagnosticar o estado da arte tecnológica de produção de hidrogênio (H<sub>2</sub>) a partir de algas para avaliação da competitividade no mercado de combustíveis renováveis.

**Referencial Teórico:** Ações de descarbonização da matriz energética compõem o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris para controle das mudanças climáticas, sem impactar negativamente na segurança energética. O H<sub>2</sub> se tornou uma das fontes de energia competitiva para ações de descarbonização e um dos caminhos para controle do aumento da temperatura global. Algas são potenciais fontes renováveis de H<sub>2</sub>, competitivas pelo crescimento rápido, pela versatilidade metabólica e pela biomassa livre de enxofre.

**Método:** Executou-se um estudo patentométrico a partir de documentos de patente publicados entre 2013 e 2023, minerados no software VantagePoint para cálculo do *Emergency Score (EScore)*.

**Resultados e Discussão:** Os documentos de patente recuperados destacaram processos de biorremediação em regime de biorrefinarias e processos químicos e físicos para separar H<sub>2</sub> de outros elementos como rotas tecnológicas emergentes. Investimentos nessas rotas associadas à engenharia genética das algas e ao melhor design de biorreatores são possíveis combinações que gerarão vantagem competitiva.

**Implicações da Pesquisa:** Mesmo que as algas ainda não sejam viáveis no momento presente, a diversificação de fontes estimula a execução de novos projetos para avaliar biomassas e desenvolver processos industriais. As questões apontadas são ações que potencialmente fortalecerão iniciativas de responsabilidade socioambiental, associadas ao conceito de economia circular.

**Originalidade/Valor:** Este estudo contribui para a literatura ao indicar caminhos para o desenvolvimento de soluções tecnológicas de produção de hidrogênio a partir de biomassa de algas, tornando-se mais uma alternativa visando a segurança energética.

**Palavras-chave:** Segurança Energética, Algas, Descarbonização.

### PATENTOMETRIC AND COMPETITIVENESS ANALYSIS OF RENEWABLE HYDROGEN FROM ALGAE: ALTERNATIVE AIMED AT ENERGY SECURITY

### ABSTRACT

**Objective:** The main objective of this article is to diagnose the state-of-the-art technology for hydrogen (H<sub>2</sub>) production from algae to assess competitiveness in the renewable fuels market.

**Theoretical Framework:** Actions to decarbonize the energy matrix are part of the Kyoto Protocol and the Paris Agreement to control climate change, without negatively impacting energy security. H<sub>2</sub> has become one of the competitive energy sources for decarbonization actions and one of the ways to control the increase in global

<sup>1</sup> EMBRAPA Agroenergia, Brasília, Distrito Federal, Brasil. E-mail: [sergio.sarai@embrapa.br](mailto:sergio.sarai@embrapa.br)

<sup>2</sup> Centro Universitário Estácio De Belo Horizonte, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

E-mail: [danusa.santos@estacio.br](mailto:danusa.santos@estacio.br)

<sup>3</sup> UNIVERSIDADE FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [thiago.pereira@fumec.br](mailto:thiago.pereira@fumec.br)



temperature. Algae are potential renewable sources of competitive H<sub>2</sub> due to their rapid growth, metabolic versatility and sulfur-free biomass.

**Method:** A patentometric study was carried out based on patent documents published between 2013 and 2023, mined in the software VantagePoint to calculate the Emergency Score.

**Results and Discussion:** The retrieved patent documents highlighted bioremediation processes in biorefineries and chemical and physical processes to separate H<sub>2</sub> from other elements as emerging technological routes. Investments in these routes associated with genetic engineering of algae and better bioreactor design are possible combinations that will generate competitive advantage.

**Research Implications:** Even if algae are not yet viable at the present time, the diversification of sources encourages the execution of new projects to evaluate biomass and develop industrial processes. The issues highlighted are actions that will potentially strengthen socio-environmental responsibility initiatives, associated with the concept of circular economy.

**Originality/Value:** This study contributes to the literature by indicating paths for the development of technological solutions for hydrogen production from algae biomass, becoming another alternative aimed at energy security.

**Keywords:** Energy Security, Algae, Decarbonization.

## ANÁLISIS PATENTOMÉTRICO Y DE COMPETITIVIDAD DEL HIDRÓGENO RENOVABLE A PARTIR DE ALGAS: ALTERNATIVA ORIENTADA A LA SEGURIDAD ENERGÉTICA

### RESUMEN

**Objetivo:** El objetivo principal de este artículo es diagnosticar el estado del arte de la tecnología de producción de hidrógeno (H<sub>2</sub>) a partir de algas para evaluar la competitividad en el mercado de combustibles renovables.

**Marco Teórico:** Las acciones para descarbonizar la matriz energética son parte del Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París para controlar el cambio climático, sin impactar negativamente en la seguridad energética. El H<sub>2</sub> se ha convertido en una de las fuentes energéticas competitivas para las acciones de descarbonización y una de las formas de controlar el aumento de la temperatura global. Las algas son potenciales fuentes renovables de H<sub>2</sub> competitivo debido a su rápido crecimiento, versatilidad metabólica y biomasa libre de azufre.

**Método:** Se realizó un estudio patentométrico con base en documentos de patentes publicados entre 2013 y 2023, extraídos en el software VantagePoint para calcular el *Emergency Score*.

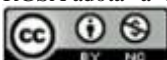
**Resultados y Discusión:** Los documentos de patente recuperados destacaron los procesos de biorremediación en biorrefinerías y los procesos químicos y físicos para separar el H<sub>2</sub> de otros elementos como rutas tecnológicas emergentes. Las inversiones en estas rutas asociadas a la ingeniería genética de algas y un mejor diseño de biorreactores son combinaciones posibles que generarán ventaja competitiva.

**Implicaciones de la investigación:** Si bien las algas aún no son viables en el momento actual, la diversificación de fuentes incentiva la ejecución de nuevos proyectos para evaluar la biomasa y desarrollar procesos industriales. Los temas destacados son acciones que potencialmente fortalecerán las iniciativas de responsabilidad socioambiental, asociadas al concepto de economía circular.

**Originalidad/Valor:** Este estudio contribuye a la literatura al indicar caminos para el desarrollo de soluciones tecnológicas para la producción de hidrógeno a partir de biomasa de algas, convirtiéndose en una alternativa más orientada a la seguridad energética.

**Palabras clave:** Seguridad energética, Biocombustibles, Algas, Descarbonización.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).





## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, intensificadas pelo aumento da temperatura atmosférica desde a Revolução Industrial, representam um desafio global com impactos diretos na produção agrícola e na segurança energética. A produção de alimentos e energia para a população mundial, que deverá atingir 9 bilhões de pessoas em 2050, será diretamente afetada por este cenário (Ehrlich & Harte, 2015; Scovazzi & Lima, 2021).

A segurança energética é um ponto de grande preocupação, especialmente devido ao possível esgotamento de fontes fósseis e ao aumento populacional previsto para as próximas décadas (Rumin, Nicolau, Oliveira Junior, Fuentes-Grünewald, Picot, 2020). A necessidade de encontrar alternativas energéticas sustentáveis e eficientes se torna cada vez mais urgente para garantir o bem-estar da população e o desenvolvimento global.

A segurança energética representa a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço acessível e que atenda às demandas sociais e econômicas de uma região ou um país, incluindo a diversificação da matriz energética (Nunes, 2023) e o apoio às ações de mitigação das mudanças climáticas descritas em documentos como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris. O hidrogênio ( $H_2$ ) é um dos elementos mais abundantes na atmosfera, geralmente combinado com outros elementos químicos e com alto potencial de combustão e uso como fonte de energia, com a vantagem de não emitir dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na sua produção, a depender do método de obtenção, tornando-se uma alternativa energética limpa (Viana et al., 2023; Jiao et al., 2024).

As algas compõem um grupo de seres vivos do reino Plantae que podem ser microscópicas (microalgas) ou macroscópicas (macroalgas). Santana (2020) assinala que as cianobactérias, microrganismos do reino Bacteria que também são fotossintetizantes, são incluídas no grupo de microalgas pela literatura. As algas agem como agentes mitigadores de  $CO_2$  da atmosfera e que posteriormente é convertido em biomassa pelo processo de fotossíntese (Rumin et al., 2020; Nageshwari, Pathy, Pugazhendhi, Balasubramanian, 2023). Isso torna as algas fontes potenciais de biocombustíveis pela alta composição energética (Li, Zhang, Liu, 2015; Nageshwari et al., 2023; Pena, 2023).

O objetivo principal deste artigo é diagnosticar o estado da arte tecnológica de produção de  $H_2$  a partir de algas para avaliação da competitividade de  $H_2$  a partir de biomassa algal no mercado de combustíveis renováveis. Para cumprir o objetivo principal, os objetivos secundários são: apresentar a distribuição geográfica de patentes que abordam a produção de  $H_2$  a partir de biomassa algal; apresentar os gêneros de algas descritas nos documentos de



patente; diagnosticar as rotas tecnológicas emergentes entre 2013 e 2023; e apresentar cenário atual do mercado e rotas tecnológicas que favorecerão a expansão do mercado de H<sub>2</sub> obtido de biomassa algal.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 BIOCOMBUSTÍVEIS: CONCEITO E CARACTERIZAÇÃO DO MERCADO

Ações internacionais já foram executadas na tentativa de controlar a emissão de gases de efeito estufa e frear as mudanças climáticas. Em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro, foi criado o tratado multilateral “Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima”. Em 1997, foi assinado o Protocolo de Kyoto, que estipulou uma redução de 5,2% entre 2008 e 2012 e abaixo do nível medido em 1990 (Scovazzi & Lima, 2021; Goldemberg, 2023). Em 2015, foi assinado o Acordo de Paris, que estabeleceu a meta de manter a temperatura média global abaixo de 2 °C, comparada à temperatura anterior à Primeira Revolução Industrial e promover vínculos entre questões ambientais e econômicas, com foco em políticas industriais e de produção de energia limpa e fortalecer ações mundiais para controle das mudanças climáticas (Brasil, 2017; Scovazzi & Lima, 2021).

Os biocombustíveis são aqueles obtidos de biomassa animal ou vegetal, sendo fontes renováveis e não fósseis (Banerjee et al., 2019), uma alternativa estratégica e social para diversificar as fontes de energia aliados à promoção da sustentabilidade e sem competir com a produção de alimentos, gerando vantagem competitiva em longo prazo para garantia da segurança energética frente aos combustíveis fósseis (Anjos & Nascimento Neto, 2021; Ruiz, Silveira, Magalhães, 2023; Dos Anjos & De Almeida, 2024).

A transição energética global para energia renovável cresceu 40% nos últimos vinte anos, mesmo que represente apenas 8,8% da matriz energética mundial (Zheng et al., 2023), o que reforça a vantagem competitiva dos biocombustíveis. Os biocombustíveis são divididos em quatro categorias (Jiménez-Llanos, Ramírez-Carmona, Rendón-Castrillón, Ocampo-López, 2020; Nageshwari et al., 2023; Rial, 2024), a seguir:

- Primeira geração, obtidos diretamente de fontes alimentícias como soja, milho, canola, cana-de-açúcar e beterraba açucareira, sem competição com a segurança alimentar, por processos químicos, biológicos e mecânicos.



- Segunda geração, produzidos a partir de resíduos agroindustriais lignocelulósicos e que não usados para alimentação humana, que ainda dependem de desenvolvimento tecnológico para aumento do rendimento e escalonamento.
- Terceira geração, a partir de biomassa de algas (macroalgas, microalgas, cianobactérias).
- Quarta geração, obtida a partir de biomassa de materiais biológicos geneticamente modificados e com foco em maior eficiência energética e associado a redução de custos de cultivo, colheita e processamento.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO E USO DE H<sub>2</sub> COMO COMBUSTÍVEL

Hidrogênio é o elemento químico com menor número atômico na tabela periódica. Em seu estado natural, uma ligação covalente de dois átomos forma a molécula H<sub>2</sub>, que se encontra em estado gasoso em temperatura ambiente, inflamável e com grande capacidade de armazenar energia, o que confere a essa molécula propriedades competitivas como combustível renovável (Azevedo, [2024]). Sua participação atual na matriz energética mundial é insignificante, mas seu mercado está aquecido, com comércio global total em 2023 de US\$ 158,8 bilhões e expectativa de crescer 10,2% entre 2023 e 2028, chegando ao valor de US\$ 257,9 bilhões em 2028 (Maroušek, 2022; Markets And Markets, 2023).

H<sub>2</sub> se tornou uma fonte de energia competitiva para ações de descarbonização e um dos caminhos para controle do aumento da temperatura global. Compõe as 25 ações colaborativas dentro de cinco temas chaves estipuladas na 27<sup>a</sup> Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima – COP27 (tradução do termo em inglês United Nations Framework Convention on Climate Change), realizada em Sharm El-Sheikh (Egito) em 2022 (Fernandes, Azevedo, Ayello, Gonçalves, 2023).

## 2.3 ALGAS

Algas representam um grupo de plantas microscópicas (microalgas) ou macroscópicas (macroalgas) que vivem em ambientes aquáticos, são fotossintetizantes e produtoras de oxigênio (O<sub>2</sub>), liberados na atmosfera. Assim, têm grande importância ecológica. As cianobactérias pertencem ao reino Bacteria e têm ação fotossintetizantes e com importância ecológica (Graham, Graham, Wilcox, Cook, 2016).



As microalgas e cianobactérias apresentam uma vantagem importante na versatilidade metabólica que confere resistência a condições adversas, a exemplo de águas residuais como água com esgoto, vinhaça e manipueira, e em águas com alto teor de salinidade (biorremediação). Com isso, são passíveis de cultivo em regime de biorrefinarias, em terras impróprias para produção agropecuária, têm rápido crescimento e possibilidade de extração de produtos de alto valor agregado da biomassa, como ácidos poliinsaturados, vitaminas e pigmentos como  $\beta$ -caroteno (Li et al., 2015; Nageshwari et al., 2023; Pena, 2023; Ayub et al., 2024; Rial, 2024; Victor, Moutinho, Riatto, 2024).

Em contexto similar, as macroalgas são fontes de produtos de importância industrial como ágar e carragena (espessantes), manitol e sorbitol (edulcorantes) (Nageshwari et al., 2023). Sharmila et al. (2021) reforçam o potencial das macroalgas como fontes competitivas de biocombustível, já que também têm rápido crescimento (até 30 vezes mais rápido do que forrageiras) em água salgada e em condições adversas de temperatura. A biomassa de macroalgas é livre de enxofre e não tem lignina na parede celular, o que facilita o processo de conversão da biomassa em  $H_2$  por processos fermentativos (Sharmila et al., 2021; Nageshwari et al., 2023).

$H_2$  obtido de biomassa de algas por biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem captura e armazenamento de carbono, é chamado de hidrogênio verde-musgo (EPE, 2022). A produção de  $H_2$  por cianobactérias está associada à fixação de nitrogênio e de algas verdes (microalgas e macroalgas), por redução de elétrons  $H^+$  a partir da fotossíntese (Jiménez-Llanos et al., 2020).

### 3 METODOLOGIA

Executou-se um estudo exploratório e quantitativo com a aplicação do método patentométrico, um tipo de estudo métrico de informação para identificar, avaliar e quantificar informações extraídas de documentos patentários para detecção de tendências tecnológicas em determinado tema e/ou segmento de mercado (Silva & Dias, 2023). Os documentos de patente contêm informações científicas geradas em escala laboratorial e de caráter investigativo, que antecedem sua evolução na escala de maturidade tecnológica para ambientes piloto ou industriais, com foco na comercialização (Braga, 2022).

A busca pelos documentos de patente foi feita na base de dados *Derwent Innovation Index* (Clarivate Analytics), acessada via Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) em 2 de abril de 2024. Usou-se a





estratégia de busca “TS=((\*alga\* AND (\*h?drogen\* product\*)) OR "ALGAL H-2 PRODUCTION")” de documentos publicados entre 1º de janeiro de 2013 e 31 de dezembro de 2023.

O cálculo do *Emergency Score (EScore)* foi executado no software VantagePoint sobre os dados minerados. O *EScore* é gerado a partir de um algoritmo que calcula as pontuações de um indicador selecionado e seu surgimento no período determinado na pesquisa (2013 e 2023, no caso deste estudo). O resultado obtido é analisado sob quatro dimensões (novidade, crescimento, persistência e comunidade) e indica a tendência positiva de crescimento dos tópicos de pesquisa e mudanças disruptivas e radicais na informação. Com isso, é possível detectar antecipadamente novos avanços científicos e tecnológicos, não sendo necessariamente os dados com maior quantidade de documentos (Porter, Garner, Carley, Newman, 2019; Kwon, Liu, Porter, Youtie, 2019; Liang, Mao, Lu, Ba, Li, 2021)

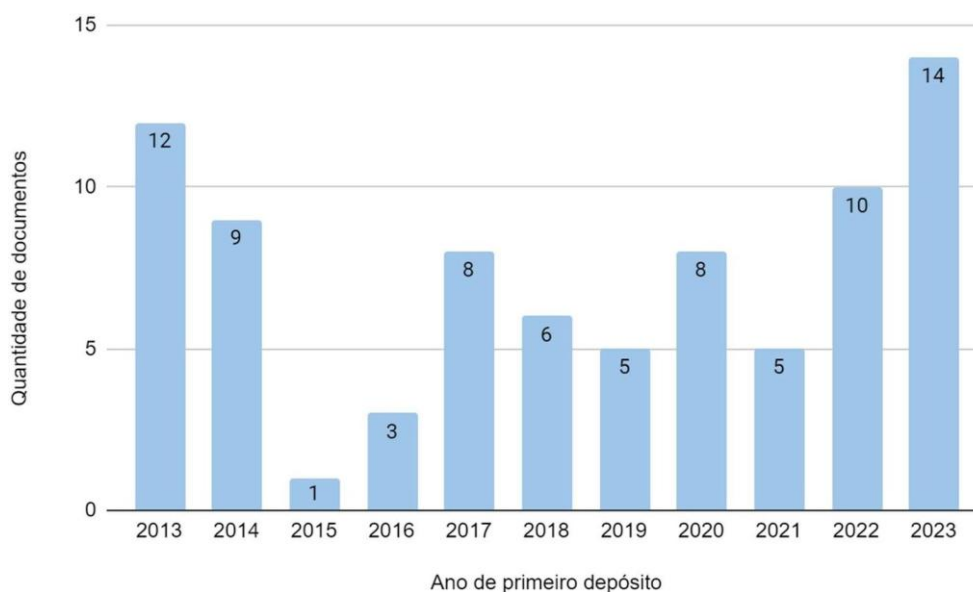
#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Foram recuperados 81 documentos, que passaram por processos de limpeza e mineração de dados pelo uso do software VantagePoint (Search Technology) (Miles, Saritas, Sokolov, 2016; Macías-Quiroga, Henao-Aguirre, Marín-Flórez, Arredondo-López, Sanabria-González, 2021), dentre alguns indicadores. O primeiro é o ano do primeiro depósito da patente, que inicia o processo de proteção intelectual e que pode ser expandido a mais de um país, formando a família de patentes. A Figura 1 apresenta os anos do primeiro depósito dos 81 documentos recuperados, que mostra uma queda significativa da quantidade de depósitos entre os anos de 2015 e 2021.



**Figura 1**

*Histograma com a quantidade de documentos de patente publicados por ano do primeiro depósito*



Fonte: Elaboração própria

Em seguida, foram recuperados os países onde foram feitos os primeiros depósitos das patentes, com larga predominância da China (Tabela 1 e Figura 2). China, Coreia do Sul, Japão, Indonésia e Filipinas dominam o mercado mundial de algas, com 59,1% do *market share* em 2021 e taxa de crescimento anual composto (CAGR) de 11,4% entre 2022 e 2031 (Sharmila et al., 2021; Transparency Market Research, 2022).

**Tabela 1**

*Quantidade de documentos por país de primeiro depósito dos documentos de patente*

Países	Quantidade de Documentos
China	50
Estados Unidos da América	7
Coreia do Sul	6
França	1
Índia	1
Rússia	1
Taiwan	1

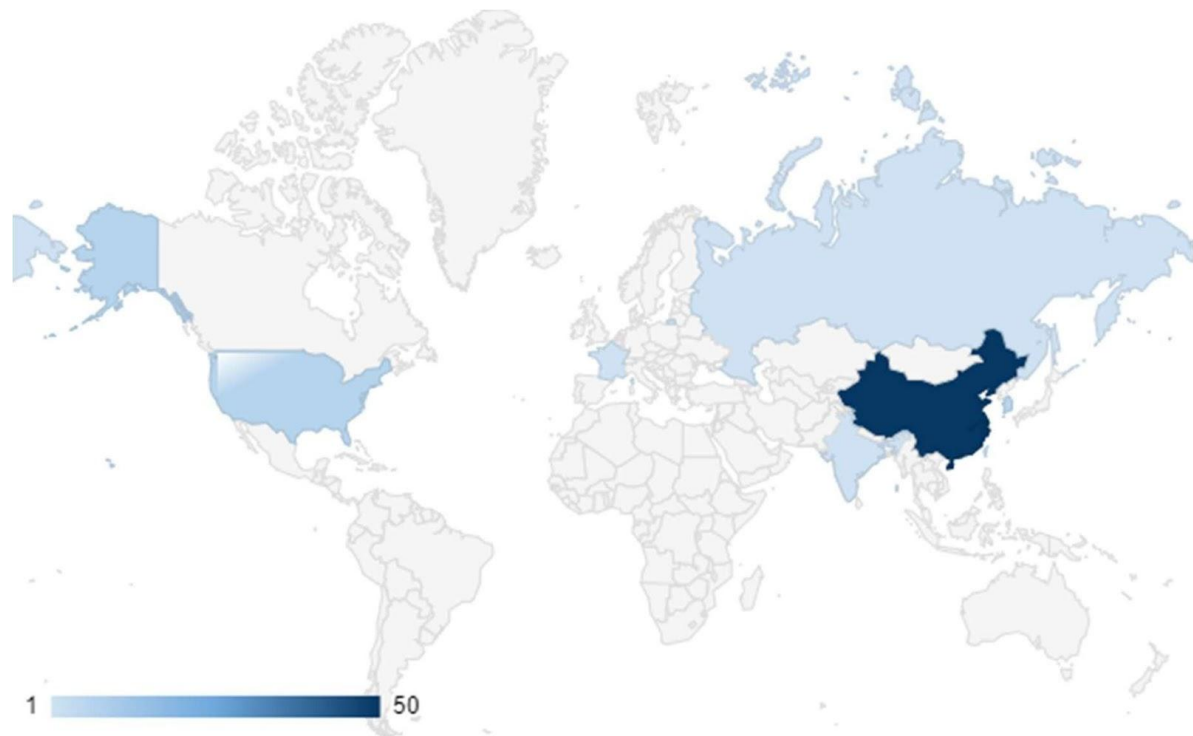
Fonte: Elaboração própria.





## Figura 2

Mapa de intensidade de documentos de patentes recuperados por país de depósito inicial, conforme Tabela 1



Fonte: Elaboração própria

Dentre os 81 documentos de patente recuperados, identificou-se os países onde houve o depósito além do país de depósito inicial, formando uma família de patentes (Tabela 2 e Figura 3). Famílias de patentes se referem a uma coleção de depósitos de um mesmo documento de patente em outros países visando expansão da exclusividade da exploração comercial além do país de depósito inicial. A estratégia de depósito em mais de um país representa uma estratégia de domínio de mercado (Lai, Bhatt, Kumar, Chen, Chang, Su, 2021). Com exceção do continente africano, supõe-se que a busca pela segurança energética também seja o que despertou a necessidade de depósitos em mais de um país.

## Tabela 2

Quantidade de documentos por países de famílias de patentes

País	Quantidade de Documentos
China	56
Estados Unidos da América	18
Coreia do Sul	6
Canadá	4
Austrália	3
Brasil	3

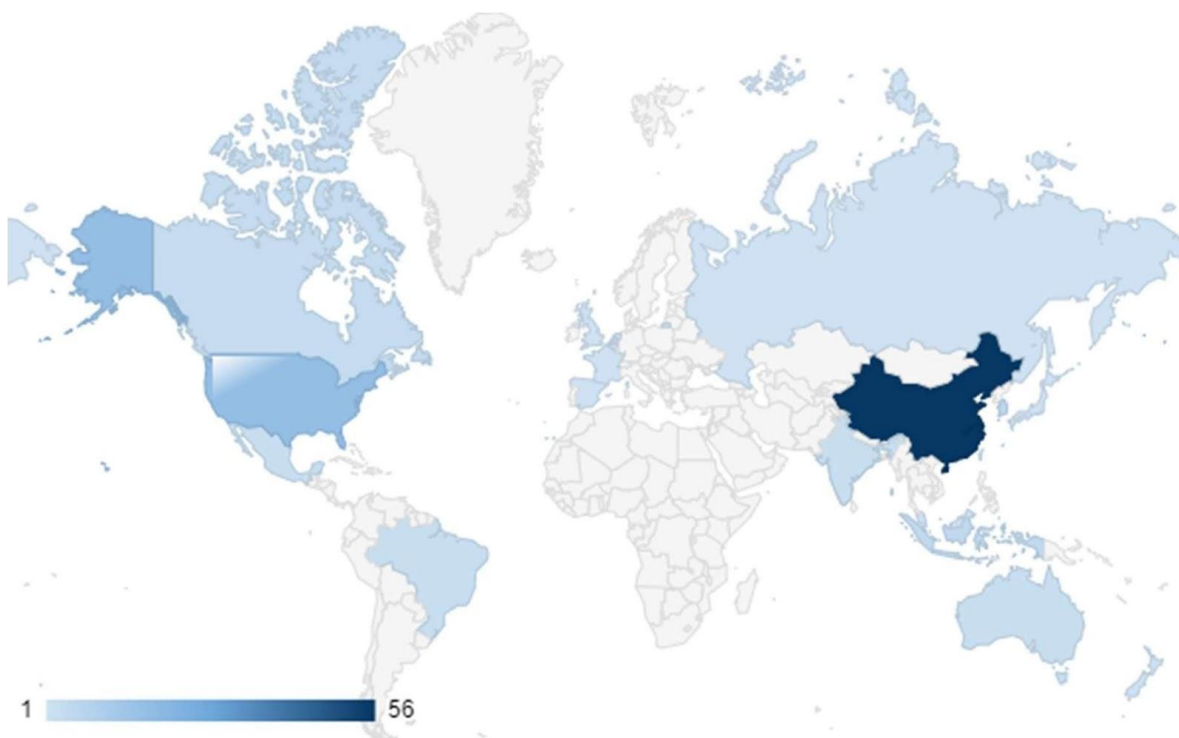


Índia	3
México	3
Malásia	2
Indonésia	2
Bélgica	1
França	1
Reino Unido	1
Japão	1
Países Baixos	1
Nova Zelândia	1
Rússia	1
Singapura	1
Taiwan	1

Fonte: Elaboração própria.

### Figura 3

Mapa de intensidade de documentos por países de famílias de patentes, conforme Tabela 2



Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, realizou-se, via software VantagePoint, a limpeza dos dados presentes no resumo e no texto completo das patentes para listar gêneros de algas descritos nos documentos de patente, apresentados no Tabela 3.

### Tabela 3

Quantidade de citações de algas nos documentos de patente recuperados

Gêneros	Tipo de alga	Quantidade de citações
---------	--------------	------------------------



<i>Chlorella</i> sp.	Microalga	5
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Microalga	3
<i>Anabaena</i> sp.	Cianobactéria	2
<i>Scenedesmus</i> sp.	Microalga	2
<i>Botryococcus</i> sp.	Microalga	1
<i>Dunaliella</i> sp.	Microalga	1
<i>Haematococcus</i> sp.	Microalga	1
<i>Nannochloropsis</i> sp.	Microalga	1

Fonte: Elaboração própria

Apesar das vantagens inerentes às macroalgas, similares às encontradas em microalgas e cianobactérias, conforme apontado por Sharmila et al. (2021), a produção de biocombustíveis a partir dessa biomassa ainda enfrenta desafios tecnológicos como o alto custo de produção, particularmente as etapas de cultivo e colheita. Adicionalmente, o aproveitamento industrial de maior valor agregado de macroalgas reside na extração de coloides (Sharmila et al., 2021; Silva, 2022).

Por fim, foram listados os Códigos Internacionais de Patentes (CIP), um código alfanumérico estabelecido pelo Acordo de Estrasburgo (1971) que tem o papel de indexar os documentos de patente dentre várias áreas tecnológicas (WIPO, [2024]). As CIPs de quatro dígitos, que foram avaliadas neste estudo, representam até a subclasse de categorização de um documento de patente (Tabela 4).

#### Tabela 4

*Quantidade de referências aos CIPs de quatro dígitos indexadores dos documentos de patente recuperados*

CIPs de 4 dígitos	Quantidade de referências
C12P	36
C12N	27
C12R	21
C12M	19
C01B	18
B01J	12
C02F	10
C10G	8
C25B	8
C07C	7
C10L	7
H01M	7
B01D	6
C11B	5
C07K	4
C10J	4
C11C	4
A01G	3



B82Y	2
C12Q	2
B01L	1
B09B	1
B23B	1
B63B	1
B63H	1
B63J	1
C01C	1
C05F	1
C07H	1
C08F	1
C09K	1
C10B	1
C10C	1
C10K	1
C13B	1
C13K	1
C21B	1
D01F	1
D21H	1
E21B	1
F02C	1

Fonte: Elaboração própria

Aplicou-se o cálculo do *EScore* aos indicadores avaliados e apenas as CIPs de quatro dígitos apresentaram dados considerados disruptivos pelo algoritmo aplicado pela ferramenta, gerando o Tabela 5.

### Tabela 5

*CIPs de quatro dígitos indexadores dos documentos de patente recuperados que foram priorizados pelo cálculo do EScore*

CIPs de 4 dígitos	Descrição da CIP	Quantidade de referências	EScore
C02F	Processos de tratamento de água, água residual ou esgoto	10	9,424
B01J	Processos químicos ou físicos, como catálise ou química de colóides, e seus aparatos	12	5,786
C25B	Processos eletrolíticos ou eletroforéticos para produção de compostos não metálicos, e seus aparatos	8	4,798

Fonte: Elaboração própria

Em comum, as três CIP presentes na Tabela 5 representam processos químicos, físicos ou físico-químicos envolvidos no cultivo e processamento da biomassa algal para obtenção de H<sub>2</sub>, em uma abordagem de biorrefinaria. Esse tipo de abordagem consiste em um pré-tratamento de coprodutos obtidos em etapas industriais antes de seguir para os próximos, com menor



geração de resíduos e com maior valor agregado aos produtos e coprodutos obtidos (Rumin et al., 2020; Lima, 2022; Pena, 2023).

A CIP de maior destaque é C02F, que é o indexador de processos de tratamento de água, água residual ou esgoto, nos quais as algas têm ação de biorremediação para crescimento e posterior colheita da biomassa para processamento e obtenção de H<sub>2</sub>, particularmente por processos anaeróbios de digestão da biomassa (CIP C02F-003/28), ou seja, na ausência de oxigênio (O<sub>2</sub>) no meio (Rumin et al., 2020).

A CIP B01J indexa processos químicos ou físicos, como catálise ou química de colóides, e seus aparatos, que se referem aos processos de conversão de biomassa algal em H<sub>2</sub>. A produção de H<sub>2</sub> a partir de biomassa algal se dá pela ação das hidrogenases, enzimas que contêm íons de ferro (Fe) e/ou níquel (Ni), com ou sem ligação a enxofre (S): [2Fe–2S], [3Fe–4S], [4Fe–4S], [Fe–Fe] e [Ni–Fe] (Li et al., 2022), que destrincha o indexador B01J-023/745, específico para processos com íons Fe<sup>2+</sup>.

Por fim, a CIP C25B é o indexador de processos eletrolíticos ou eletroforéticos para produção de compostos não metálicos, e seus aparatos. A eletrólise da água, ou seja, quebra da molécula da água com a separação de O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> usando energia elétrica, é o processo dominante no mercado, enquanto concomitantemente há ações científicas de desenvolvimento de processos a partir de biomassa para diversificação da matriz energética (Viana et al., 2022). Jiao et al. (2024) descrevem um processo que combina o mecanismo de eletrólise com sistemas biológicos híbridos, com a proposta de incorporar no mesmo processo águas residuais e algas em um processo de fermentação para aumento da eficiência da produção de H<sub>2</sub>, que ainda não foi escalonado para avaliação de viabilidade técnica e econômica.

Foi executada uma análise de co-ocorrência entre as algas listadas na Tabela 3, mesmo sem itens com *EScore*, e as CIPs de quatro dígitos que se destacaram no cálculo do *EScore* (Tabela 5). Só houve uma co-ocorrência, da CIP C02F com microalgas do gênero *Chlorella* sp.. Apesar das vantagens apresentadas, a produção de H<sub>2</sub> a partir de fontes renováveis ainda não é considerada competitiva. Se comparada com os custos de produção de H<sub>2</sub> a partir de fontes fósseis (não renováveis), o custo médio do H<sub>2</sub> obtido de biomassa é 176% mais caro (Viana et al., 2023). Há outros gargalos para a produção de H<sub>2</sub> a partir de biomassa algal em escala comercial, como:

- Ausência de dados de produção de H<sub>2</sub> em escala piloto e comercial, sem parâmetros definidos como configurações do reator, fatores como temperatura e pressão do meio de cultivo e estabilidade operacional em longo prazo visando produção máxima de H<sub>2</sub> e



associado ao controle das condições fisiológicas (Jiménez-Llanos et al., 2020; Nagarajan, Dong, Chen, Lee, Chang, 2020).

- Necessidade de validação dos parâmetros descritos em documentos de patente, geralmente obtidos em escala laboratorial e sem *scale up* (Rady, Ali, El-Skeekh, 2024).
- Mesmo que o custo de produção de H<sub>2</sub> a partir de biomassa algal esteja entre 1,38 US\$/kg e 2,13 US\$/kg, abaixo dos valores indicados por Viana et al. (2023) (1,34 US\$/kg e 4,7 US\$/kg), 55% do custo é representado pelo reator e suas funcionalidades (Jiménez-Llanos et al., 2020).
- Baixa eficiência de conversão de luz em H<sub>2</sub> no cultivo das algas, que hoje é de 3% e deveria estar na faixa de 5% a 10% (Nagarajan et al., 2020);
- Sensibilidade das enzimas hidrogenases ao O<sub>2</sub> (Nagarajan et al., 2020).
- Coexistência de condições anaeróbias durante o processo de fotossíntese (Nagarajan et al., 2020).

Em sentido contrário, já há soluções desenhadas para aumentar a viabilidade técnica de produção de H<sub>2</sub> a partir de biomassas de algas, que devem ser avaliadas em escala piloto e comercial:

- Cocultivo das microalgas com bactérias, que consumirão o O<sub>2</sub> do meio de cultivo, mantendo a funcionalidade das enzimas hidrogenases (Nagarajan et al., 2020).
- O cultivo em regime de biorrefinarias e na biorremediação de águas impróprias para consumo são pontos positivos que podem compensar os custos de produção de H<sub>2</sub>, além de fortalecer ações de responsabilidade socioambiental (Jiménez-Llanos et al., 2020; Nagarajan et al., 2020).

Apesar dos pontos levantados, a busca por fontes renováveis de energia com menor emissão de CO<sub>2</sub> é uma das prioridades mundiais para controle das mudanças climáticas sem impactar negativamente na segurança energética. Mesmo que as algas ainda não sejam viáveis tecnicamente e economicamente neste momento, a diversificação de fontes estimula a execução de novos projetos para avaliar biomassas e desenvolver processos industriais, a exemplo do estudo de Viana et al. (2023), e estimular a competitividade (Ribeiro & Braghini Júnior, 2023).

Jimenez-Llanos et al. (2020) assinalam que investimentos em engenharia genética (obtenção de linhagens de algas geneticamente modificadas com as características desejadas), maior detalhamento das condições de cultivo e investimentos no design de reatores para cultivo das algas são pontos-chaves para a viabilidade da produção de H<sub>2</sub> a partir de biomassa de algas.



## 5 CONCLUSÃO

Mesmo que macroalgas, microalgas e cianobactérias não sejam competitivas no mercado atual de H<sub>2</sub>, o investimento na diversificação de fontes gera competitividade e estímulo a ações de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação. Um dos destaques dos resultados aqui produzidos foi o apontamento do cultivo de algas em regime de biorrefinarias e na biorremediação de águas impróprias, além de processos químicos e físicos para separar H<sub>2</sub> de outros elementos.

As questões apontadas são ações que potencialmente fortalecerão iniciativas de responsabilidade socioambiental, para apontar caminhos tecnológicos para superar gargalos como o escalonamento do cultivo das algas. Assim, geram-se vantagens competitivas em longo prazo às instituições que desenvolverem e explorarem soluções tecnológicas viáveis e com menor custo de produção.

## REFERÊNCIAS

- Anjos, S. S. N., Nascimento Neto, J. O. (2021). Avaliação do impacto de política de subvenção econômica na cadeia produtiva de biodiesel de Babaçu. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 14(Supl.1), e8348. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.1.e8348>.
- Ayub, H. M. U., Nizami, M., Qyyum, M. A., Iqbal, N., Al-Muhtaseb, A. H., Hasan, M M. (2024). Sustainable hydrogen production via microalgae: Technological advancements, economic indicators, environmental aspects, challenges, and policy implications. *Environmental Research*, 244, e117815. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117815>.
- Azevedo, J. ([2024]). O que é hidrogênio e quais suas características? **E-Cycle**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio/>. Acesso em: 4 mai. 2024.
- Banerjee, S., Kaushik, S., Tomar, R. S. (2019). Global Scenario of Biofuel Production: Past, Present and Future. In: Rastegari, A. A., Yadav, A. N., Gupta, Arti (Eds.). *Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems. Biofuel and Biorefinery Technologies* (vol 10). Cham: Springer Nature Switzerland AG. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14463-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14463-0_18).
- Braga, M. (2022). *Análise de futuro dos ácidos carboxílicos de base biológica: uma abordagem semiquantitativa para o mapeamento tecnológico*. (Tese de Doutorado). Universidade de Brasília.
- Brasil. *Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017*. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015, e firmado em Nova Iorque, em 22 de abril de 2016. Brasília: Imprensa Nacional, [2017]. Recuperado de <http://www.planalto.gov.br/ccivil/03/ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm>. Acesso em: 25 abr. 2024.





- Dos Anjos, S. S. N., De Almeida, A. N. (2024). Food security and its connection with environmental economics and accounting: a bibliometric analysis. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(3), e04190. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-010>.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2022). *Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS*. NOTA TÉCNICA EPE/DPG/SPG/02/2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf?trk=public\\_post\\_comment-text](https://www.epe.gov.br/sites-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf?trk=public_post_comment-text). Acesso em: 4 mai. 2024.
- Ehrlich, P. R., Harte, J. (2015). Food security requires a new revolution. *International Journal of Environmental Studies*, 72, 908-920. <https://doi.org/10.1080/00207233.2015.1067468>.
- Fernandes, G., Azevedo, J. H. de, Ayello, M., Gonçalves, F. (2023). Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. *FGV Energia*, São Paulo. [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opinioao\\_artigo\\_hidrogenio\\_verde\\_matriz.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opinioao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf).
- Goldemberg, J. (2023). Trinta anos da Convenção do Clima. *Estudos Avançados*, 37(107), 277-287. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2023.37107.016>.
- Graham, L. E.; Graham, J. M.; Wilcox, L. W.; Cook, M. E. (2016). *Algae*. LJLM Press.
- Jiao, H., Tsigkou, K., Elsamahy, T., Pispas, K., Sun, J., Manthos, G., Schagerl, M., Sventzouri, E., Al-Tohamy, R., Kornaros, M., Ali, S. S. (2024). Recent advances in sustainable hydrogen production from microalgae: Mechanisms, challenges, and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270, e115908. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115908>.
- Jiménez-Llanos, J., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L., Ocampo-López, C. (2020). Sustainable biohydrogen production by *Chlorella* sp. microalgae: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8310-8328. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.059>.
- Kwon, S., Liu, X., Porter, A. L., Youtie, J. (2019). Research addressing emerging technological ideas has greater scientific impact. *Research Policy*, 49(9), e103834. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.103834>.
- Lai, K-K., Bhatt, P. C., Kumar, V., Chen, H-C., Chang, Y-H., Su, F-P. (2021). Identifying the impact of patent family on the patent trajectory: A case of thin film solar cells technological trajectories. *Journal of Informetrics*, 15, e101143. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2021.101143>.
- Li, L., Zhang, L., Liu, J. (2015). The enhancement of hydrogen photoproduction in marine *Chlorella pyrenoidosa* under nitrogen deprivation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(43), 14784-14789. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.022>.
- Li, S., Li, F., Zhu, X., Liao, Q., Chang, J-S., Ho, S-H. (2022). Biohydrogen production from microalgae for environmental sustainability. *Chemosphere*, 291(1), e132717. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132717>.



- Liang, Z., Mao, J., Lu, K., Ba, Z., Li, G. (2021). Combining deep neural network and bibliometric indicator for emerging research topic prediction. *Information Processing & Management*, 58(5), e102611. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102611>.
- Lima, F. E. de S. (2022). *Biorrefinaria da macroalga marinha Solieria filiformis (Gigartinales, Rhodophyta) para extração de R-ficoeritrina, iota-carragenana e valorização dos resíduos sólidos*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Ceará.
- Macías-Quiroga, I. F., Henao-Aguirre, P. A., Marín-Flórez, A., Arredondo-López, S. M., Sanabria-González, N. R. (2021). Bibliometric analysis of advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: global and Ibero-American research trends. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 23791–23811. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11333-7>.
- Markets and Markets. (2023). *Hydrogen Generation Market by Technology (SMR, ATR, POX, Coal Gasification), Application (Refinery, Ammonia, Methanol, Transportation, Power Generation), Source (Blue, Green, Gray), Generation Mode Region - Global Forecast to 2028*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrogen-generation-market-494.html>.
- Maroušek, J. (2022). Review: Nanoparticles can change (bio)hydrogen competitiveness. *Fuel*, 328, e125318. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125318>.
- Miles, I., Saritas, O., Sokolov, A. (2016). *Foresight for Science, Technology and Innovation*. Springer International Publishing.
- Nagarajan, D., Dong, C., Chen, C., Lee, D., Chang, J. (2020). Biohydrogen production from microalgae – major bottlenecks and future research perspectives. *Biotechnology Journal*, 16(5), e2000124. <https://doi.org/10.1002/biot.202000124>.
- Nageshwari, K., Pathy, A., Pugazhendhi, A., Balasubramanian, P. (2023). Bioprocess strategies to augment biohydrogen production from algae. *Fuel*, 351, e128922. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128922>.
- Nunes, A. F. (2023). Energia nuclear nos Emirados Árabes Unidos: segurança energética por meio de um programa nuclear pacífico? *Revista Tempo do Mundo*, 32, 261-294. <https://doi.org/10.38116/rm32art8>.
- Pena, A. de C. C. (2023). *Biorrefinaria de microalgas para produção de biocombustíveis e pontos de carbono*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Porter, A. L., Garner, J., Carley, S. F., Newman, N. C. (2019). Emergence scoring to identify frontier R&D topics and key players. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 628-643. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.016>.
- Rady, H. A., Ali, S. S., El-Skeekh, M. M. (2024). Strategies to enhance biohydrogen production from microalgae: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 356, e120611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120611>.
- Rial, R. C. (2024). Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196, e114369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114369>.



- Ribeiro, G. F., Braghini Júnior, A. (2023). The global energy matrix and use of agricultural residues for bioenergy production: A review with inspiring insights that aim to contribute to deliver solutions for society and industrial sectors through suggestions for future research. *Waste Management & Research*, 41(8), 1281-1389. <https://doi.org/10.1177/0734242X231154149>.
- Ruiz, S. C. M., Silveira, J. M. F. J. da., Magalhães, M. M. de. (2023) Produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas e florestais: panorama global e a potencialidade do complexo sucroenergético brasileiro. In: Piracicaba, SP. *Anais do 60º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, Piracicaba, SP. [www.even3.com.br/Anais/sober2023/626094-PRODUCAO-DE-BIOCOMBUSTIVEIS-A-PARTIR-DE-RESIDUOS-AGRICOLAS-E-FLORESTAIS--PANORAMA-GLOBAL-E-A-POTENCIALIDADE-DO-CO](http://www.even3.com.br/Anais/sober2023/626094-PRODUCAO-DE-BIOCOMBUSTIVEIS-A-PARTIR-DE-RESIDUOS-AGRICOLAS-E-FLORESTAIS--PANORAMA-GLOBAL-E-A-POTENCIALIDADE-DO-CO).
- Rumin, J., Nicolau, E., Oliveira Junior, R. G., Fuentes-Grünwald, C, Picot, L. (2020). Analysis of Scientific Research Driving Microalgae Market Opportunities in Europe. *Marine Drugs*, 18(5), e264. <https://doi.org/10.3390/md18050264>.
- Sampaio, A. M. P. de M. (2022). *A Política Nacional de Biocombustíveis e as metas brasileiras no Acordo de Paris: uma proposta de avaliação a partir da legislação*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Sharmila, V. G., Kumar, M. D., Pugazhendi, A., Bajhaiya, A .K., Gugulothu, P., Banu, J. R. (2021). Biofuel production from Macroalgae: present scenario and future scope. *Bioengineered*, 12(2), 9216–9238. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1996019>.
- Silva, M. S. B. da. (2022). *Projeção do impacto das futuras mudanças climáticas sobre o cultivo da macroalga *Gracilaria birdiae* na costa do Brasil*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Silva, R. R. da, Dias, T. M. R. (2023). Analisando a produção técnica brasileira: uma abordagem considerando registros de patentes. *Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação*, 16(1), p. 245–262. <https://doi.org/10.26512/rici.v16.n1.2023.47597>.
- Scovazzi, T., Lima, L. C. (2021). Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris. *Revista da Faculdade de Direito da UFMG*, 78, 469-476. <https://doi.org/10.12818/P.0304-2340.2021v78p469>.
- Transparency Market Research. *Algae Market*. Jun/2022. <https://www.transparencymarketresearch.com/algae-market.html#:~:text=Based%20on%20type%2C%20the%20global,10.3%25%20during%20the%20forecast%20period>.
- Viana, N. M., Araújo, A. R. de, Schultz, E. L., Santos, A. C. dos, Gambetta, R., Anjos, S. S. N. dos. (2023). Biomassas e biocombustíveis competitivos para estruturação do mercado brasileiro de hidrogênio carbono neutro ou negativo. In: *Anais do 7º Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia*, Brasília, DF. [...]. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1158347/1/Biomassa-e-biocombustiveis.pdf>.



Victor, M. M., Moutinho, F. L. B., Riatto, V. B. (2024). Microalgas: uma estratégia sustentável na transformação e obtenção de compostos orgânicos. *Química Nova*, 47(2), e-20230107. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20230107>.

World Intellectual Property Organization (WIPO). ([2024]). *International Patent Classification (IPC)*. Disponível em: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/>. Acesso em: 11 mai. 2024.

Zheng, Z., Zhou, X., Tan, Z., Liu, C., Hu, H., Yuan, M. H., Peng, S., Cai, X. (2023). Assessment of the global energy transition: Based on trade embodied energy analysis. *Energy*, 273, e127274. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127274>.