



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO
- BRASILEIRA**

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

PEDRO TAVARES BORGES

**HIDROGÊNIO VERDE FOTOSSINTÉTICO, AVANÇOS E DESAFIOS: UMA
ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA.**

REDENÇÃO - CE

2023

PEDRO TAVARES BORGES

**HIDROGÊNIO VERDE FOTOSSINTÉTICO, AVANÇOS E DESAFIOS: UMA
ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA.**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos.

REDENÇÃO - CE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catálogo de Publicação na Fonte.

Borges, Pedro Tavares.

B732h

Hidrogênio verde fotossintético, avanços e desafios: uma análise bibliométrica avançada / Pedro Tavares Borges. - Redenção, 2023. 62fl: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos.

1. Hidrogênio verde. 2. Produção fotossintética. 3. Análise bibliométrica. 4. Tendências. I. Santos, Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos. II. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 621.042

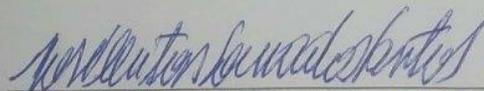
PEDRO TAVARES BORGES

**HIDROGÊNIO VERDE FOTOSINTÉTICO, AVANÇOS E DESAFIOS: UMA
ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA AVANÇADA.**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

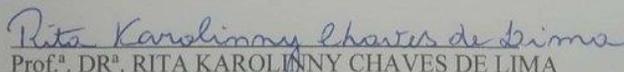
Aprovada em: 01/02/2023.

BANCA EXAMINADORA



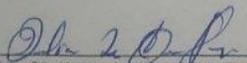
Prof. DR. JOSÉ CLEITON SOUSA DOS SANTOS

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof.ª. DR.ª. RITA KAROLINNY CHAVES DE LIMA

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof.ª. DR.ª. JULIANA FRANÇA SERPA

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

AGRADECIMENTOS

Em meus agradecimentos não poderia deixar de agradecer em primeiríssimo lugar a Deus, por ter me proporcionado Saúde, discernimento, paz e muita força de vontade nesses meus longos anos em um país que cheguei logo após completar meus 18 anos.

Aos meus pais que me deram a educação e orientação necessária para chegar aonde cheguei.

As duas pessoas mais importantes na minha vida, minha mãe Alice em primeiro lugar, por ser a mulher forte que é e sempre colocar o meu bem estar acima do dela, me ajudando com conversas em momentos difíceis cuja ela nem tinha noção, me mostrando o quanto o amor dela por mim é grandioso.

Em seguida agradeço meu irmão gêmeo Paulo Borges, pelas conversas francas do tipo de pessoa que me conhece melhor do que eu mesmo, dos papos sobre os nossos planos futuros, sempre acompanhados de “é isso” e “vais conseguir Peter”, como carinhosamente sou chamado.

Aos meus amigos e companheiros de luta na universidade a Claudia, Claudino, Lana Helton, Stênio, Ivanildo, Nontchenatch, Virginia, João, Amélia, e a toda a comunidade Africana na Unilab em especial a comunidade Cabo verdiana a qual faço parte.

Ao Brasil e a Universidade da integração internacional da lusofonia afro-brasileira (UNILAB), pela oportunidade e ensinamentos. Um agradecimento especial ao Instituto de engenharias e desenvolvimento sustentável (IEDS), no qual faço parte enquanto estudante do curso de engenharia de energias.

Aos professores e educadores do curso de engenharia de energias, em que com cada um aprendi algo importante que levo e levarei para sempre comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos, pela disponibilidade e paciência, tanto em disciplinas ministradas pelo mesmo como em minha orientação do trabalho de conclusão do curso.

A minha namorada Kátia que dividiu bons e maus momentos junto comigo, sempre me dando o apoio que precisava.

Aos outros que por um lapso ou falta de espaço não pude me endereçar diretamente a eles o meu muito obrigado.

RESUMO

Dadas as constantes alterações climáticas resultantes de processos poluentes na produção de alimentos, água e outros utensílios, é cada vez mais necessário optar por fontes de produção de energia menos poluentes. O presente trabalho faz um levantamento bibliométrico avançado das técnicas e tópicos emergentes na produção do hidrogénio verde, com ênfase no fotossintético. Os dados foram obtidos através da lista de bases de dados da capes periódicos na Web of Science, na qual foi obtido um total de 1507 trabalhos, que tratam o tema produção de hidrogénio verde fotossintético. Incluindo artigos, artigos de revisão e capítulos de livros publicados entre janeiro de 2010 a setembro de 2022. A análise dos países mostra que o país com a maior quantidade de publicações é a China, com respectivamente 24,50% das publicações, seguido dos EUA e da Alemanha. A organização que possui maior cocitação é a Chinese academy Science que possui 60 trabalhos em coautoria, seguido da univ. Chinese acad. Sci e da Kyoto univ. Em termos das revistas a International journal of hydrogen energy, possui o maior número de publicações com respectivamente 19,49% das publicações. O trabalho de maior impacto, ou seja, o mais citado é “Uma visão comparativa dos processos de produção de hidrogênio”, com 919 citações. Em termos conclusivos as matérias primas apontadas como emergentes na produção de hidrogénio verde fotossintético são as cianobactérias e microalgas. Os trabalhos apontam também para o tendencia do uso de cianobactérias e microalgas para a produção de outros biocombustíveis (bioetanol, biobutanol e o biodiesel). A técnica de produção de hidrogénio verde de maior tendencia é a eletrolise da água, muito pela sua eficiência maior em relação aos outros métodos, como mostram as análises.

Palavras-chave: Hidrogénio verde. Produção fotossintética. Análise bibliométrica. Tendências.

Abstract

Given the constant climate changes resulting from polluting processes in the production of food, water and other utensils, it is increasingly necessary to opt for less polluting sources of energy production. The present work makes an advanced bibliometric survey of the techniques and emerging topics in the production of green hydrogen, with emphasis on photosynthetic. The data were obtained through the list of databases from capes journals on the Web of Science, in which a total of 1507 works were obtained, which deal with the production of photosynthetic green hydrogen. Including articles, review articles and book chapters published between January 2010 and September 2022. The country analysis shows that the country with the highest number of publications is China, with respectively 24.50% of publications, followed by the USA and from 24.50% of publications respectively, followed by the USA and Germany. The organization with the highest co-citation is the Chinese academy Science, which has 60 co-authored papers, followed by the univ. Chinese acad. Sci and Kyoto univ. In terms of journals, the International Journal of Hydrogen Energy has the largest number of publications with respectively 19.49% of publications. The work with the greatest impact, that is, the most cited, is “A comparative view of hydrogen production processes”, with 919 citations. In conclusive terms, the raw materials identified as emerging in the production of photosynthetic green hydrogen are cyanobacteria and microalgae. The works also point to the trend of using cyanobacteria and microalgae for the production of other biofuels (bioethanol, biobutanol, and biodiesel). The most popular green hydrogen production technique is water electrolysis, largely due to its greater efficiency compared to other methods, as shown by the analyses.

Keywords: Green hydrogen. Photosynthetic production. Bibliometric analysis. Tendencies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura que representa os critérios de pesquisa e análise.....	20
Figura 2 - Relação entre palavras-chave individualizadas e o número de publicações por ano.....	22
Figura 3 - Representação da publicação de trabalhos por país.....	26
Figura 4 - Mapa de visualização da rede referente à colaboração entre países com pelo menos 5 artigos publicados, a espessura das linhas que ligam dois países indica fortemente o acúmulo de coautorias e as cores divididas em clusters ilustram os grupos de países com alto nível de colaboração.....	27
Figura 5 - Coautoria entre organizações com pelo menos 170 citações 5 artigos publicados de janeiro de 2010 a setembro de 2022.....	28
Figura 6 - Mapa de georreferenciamento das publicações distribuídas por país.....	29
Figura 7 - Mapa de visualização de coautorias entre autores com pelo menos um trabalho publicado e 300 citações nesse trabalho.....	30
Figura 8 - Visualização da linha do tempo das palavras-chave dominantes nos documentos de produção fotossintética de hidrogênio verde entre 2019 e 2022.....	33
Figura 9 - Distribuição das áreas de pesquisa.....	35
Figura 10 - Matérias-primas para a produção de hidrogênio verde em função da técnica de produção.....	36
Figura 11 - Processo fotossintético de produção de H_2 : as estruturas verde, azul e roxa representam as moléculas captadoras de luz clorofila, ficobilina e bacterioclorofilas, respectivamente. Cyt-b6f = Citocromo, PC = Plastocianina, PQ = Plastoquinona.....	38
Figura 12 - Mapa de densidade de coocorrência de palavras-chave dos autores com um número mínimo de ocorrências de 10 palavras-chave, sendo selecionadas 44 palavras-chave.....	41

Figura 13 - Mapa de visualização da rede de coocorrência de palavras-chave, em que o número mínimo de ocorrências de cada palavra-chave é 5. Foram apresentadas 3.481 palavras-chave, das quais 118 estão dentro do limite proposto.....44

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - As dez principais revistas científicas publicadas na produção fotossintética de hidrogênio verde.....23
- Tabela 2** - Os 10 principais países na publicação sobre produção fotossintética de hidrogênio verde.....25
- Tabela 3** - Os trabalhos mais citados sobre formas de produção de hidrogênio verde.....31
- Tabela 4** - As 24 principais palavras-chave e suas frequências nos trabalhos consultados sobre a produção de hidrogênio verde fotossintético42
- Tabela 5** - Os seis principais clusters de cocitação em matérias-primas para pesquisa de produção de hidrogênio verde com base na análise do Citespace.....46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

H_2	Hidrogênio Verde
EC	Economia Circular
P	País
FI	Factor de Impacto
NP	Número de Publicações
NC	Numero de Citações
AC	Citação Média (NC/NP)
P	Porcentagem
EM	Inglaterra
CH	Suíça
NL	Holanda
USA	Estados Unidos da América;
GER	Alemanha
NP	Número de publicações
NC	Numero de Citações
TLS	Força total do link
CO_2	Dióxido de carbono
Cyt-b6f	Citocromo
PC	Plastocianina
PQ	Plastoquinona
CH_4	Metano
H_2O	Água
CID	Identificação do Cluster

Ns Tamanho do nó

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4. METODOLOGIA	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
5.1 Análise bibliométrica.....	21
5.1.1 Resultados Gerais	21
5.1.2 Distribuição das revistas científicas	23
5.1.3 Distribuição por país e instituição	24
5.1.4 Análise quantitativa dos artigos.....	30
5.1.5 Áreas de pesquisa	34
5.2 Técnicas/Matérias-primas para a produção do hidrogénio verde.....	35
5.2.1 Produção fotossintética de hidrogênio verde.....	37
5.2.2 Matérias primas quentes: Cianobactéria e microalgas	39
5.3 Tópicos de pesquisas importantes	41
5.3.1 Análise quantitativa da frequência das palavras chaves	41
5.4 Análise das tendências.....	44
5.4.1 Campos de pesquisa.....	45
5.4.2 Tendências emergentes.....	47
6. CONCLUSÃO.....	50
7. REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

Espera-se que em 2050 haja um aumento na ordem dos 50% na demanda de energia, água e alimentos advinda do aumento populacional e do padrão de vida (SHIVA KUMAR; LIM, 2022). O nosso planeta vem dando sinais claros do desgaste proveniente da utilização de fontes energéticas não renováveis que agredem o meio ambiente, uma vez que cerca de 95% da energia mundial usada hoje provém de combustíveis fósseis, diminuindo assim a vida útil do nosso planeta bem como dificultando a sobrevivência dos seres vivos em nosso ecossistema. (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010; SHIVA KUMAR; LIM, 2022).

Dito isto, muitas organizações e países de propriedade intelectual e monetárias estabeleceram metas de substituir fontes poluentes de produção de energias por fontes renováveis e menos poluentes, a exemplo das que fizeram parte da COP 25 (Conferência das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas) realizada em Paris no ano de 2015 (OVERLAND et al., 2019), e que visou estabelecer alternativas sustentáveis para a frenagem dos efeitos da poluição do nosso ambiente, bem como limitar o aumento do aquecimento global entre 1,5 a 2 °C até o final do século (JACQUET; JAMIESON, 2016). Portanto uma das metas propostas é de que até 2050 possamos alcançar a neutralidade de carbono (IQBAL et al., 2021), ou seja, um estado em que as emissões líquidas de dióxido de carbono seja nula, adicionando mecanismos de remoção do carbono no ambiente, como por exemplo combater a deflorestação, incentivar a reflorestação e introduzir fontes sustentáveis de produção de energia (CAPURSO et al., 2022).

Entre as mais variadas formas de produção de energia sustentável emergentes temos a produção do Hidrogênio Verde, ou seja, o gás combustível hidrogênio produzido de forma sustentável (VELAZQUEZ ABAD; DODDS, 2020). O hidrogênio é um dos elementos mais abundantes no nosso planeta, representado enquanto a molécula com menor número atômico, 1, e de baixa densidade o mesmo é geralmente encontrado na forma de um gás diatômico na forma “ H_2 ”, um gás inflamável, incolor, inodoro e insolúvel em água, esse sim representando um combustível emergente e de uso futuro muito promissor (CAPURSO et al., 2022; OLIVEIRA, 2015).

O hidrogênio verde já possui registros de sua produção em meados do Século XVIII, no entanto com os avanços tecnológicos atuais é que se vem desenvolvendo e concretizando a ideia de que o gás hidrogênio verde, deve ser visto como uma fonte alternativa (VIDAS; CASTRO, 2021). O hidrogênio como vector energético é muito difundido, no entanto, na sua forma de produção através da reforma a vapor do metano ou gaseificação, esses processos acarretam muita poluição visto que é liberado uma grande quantidade de dióxido de carbono na atmosfera (FONSECA et al., 2019). Ao longo desse trabalho será tratado com maior atenção a produção sustentável do mesmo como é o caso da produção de hidrogênio via biomassa (CAO et al., 2020). Limitações na questão da eficiência e no custo da produção do combustível sustentável, ou seja, a relação entre a energia necessária à produção versus a energia armazenada no combustível. O armazenamento, o transporte e o valor monetário necessário a construção do sistema de produção de hidrogênio verde, são esses os aspectos limitadores na concretização do hidrogênio verde (KAKOULAKI et al., 2021). Então trataremos através deste trabalho um estudo das técnicas de produção de hidrogênio verde, com ênfase no hidrogênio verde proveniente de meios fotossintéticos envolvendo biomassas, em que o presente trabalho visa realizar uma análise bibliométrica avançada da produção de hidrogênio verde fotossintético (AKROUM-AMROUCHE; AKROUM; LOUNICI, 2019).

Com o passar dos anos muito tem se preocupado e estudado formas para fechar os ciclos de vida das matérias primas o máximo possível, tendo em vista a diminuição da poluição advinda do descarte dos subprodutos de um dado processo e a diminuição da necessidade do uso de fontes poluentes. A esse processo ou fenômeno dá-se o nome de economia circular (EC), ou seja, processo que visa usar de forma eficiente um determinado método de produção de energia tirando o máximo poder energético possível da matéria prima e do processo (RANJBARI et al., 2021),(RANJBARI et al., 2022). Processos que imitam a natureza, são por si só Ciclos próximos a perfeitos. Como é o caso do hidrogênio verde fotossintético, que imita a fotossíntese. Nesse sentido uma análise bibliométrica avançada é realizada observando as palavras chaves, links de citação e redes de acoplamento bibliográfico com o intuito de sanar as seguintes questões:

Q1. Como tem se desenvolvido a produção científica na pesquisa de biomassa e resíduos orgânicos rumo a um EC?

Q2. Quais são os principais tópicos de pesquisas, ou seja, palavras chave dentro da biomassa e resíduos orgânicos na literatura de EC?

Q3. Quais são os primeiros agentes em pesquisas de biomassa e resíduos orgânicos na EC?

Q4. Quais são os principais subprodutos emergentes de biomassa e resíduos orgânicos?

Através de uma análise na Base de dados obtidas da Web off Science (<https://www-webofscience.ez373.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/basic-search>) de 1507 documentos, os dados são tratados em softwares como o Vos viewer, Citespace, Excel e Arc. map. com vista a apresentar os mesmos de forma concisa e de fácil entendimento(FAYE; SZPUNAR; EDUOK, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- ✓ Realizar estudos através de uma análise bibliométrica dos trabalhos científicos que retratam a produção de hidrogênio verde fotossintético no período de janeiro de 2010 à setembro de 2022.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Visualizar as correlações de coautoria entre os Países, organizações e autores que tratam sobre a produção do hidrogênio verde fotossintético.
- ✓ Apresentar os agentes que estão mais inclinados a essa técnica, bem como realizar um comparativo entre essas técnicas.
- ✓ Buscar concluir em qual seria a técnica mais consolidada usada para a produção de hidrogênio verde atualmente e quais são as matérias primas emergentes para a produção do mesmo.
- ✓ Demonstrar os pontos emergentes a serem de estudados para uma melhor aplicabilidade do hidrogênio verde.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma análise bibliométrica, consiste em um método de análise estatística para avaliar resultados de pesquisas, importância e influência de autores, institutos, periódicos, entre outros, dentro de um determinado campo (GENG et al., 2017). Dois métodos bibliométricos de amplo uso são a análise de citações e a análise de conteúdo. A análise de citações implica uma relação entre citações e trabalhos citados em uma área de pesquisa específica e permite identificar literaturas centrais, periódicos, países, etc. Já a análise de conteúdo visa identificar pontos críticos atuais com base na frequência de palavras-chave do autor e outras distribuições. Em geral, a análise bibliométrica oferece uma ferramenta útil para passar do nível micro, dito cientistas/institutos para o nível macro nacional/global. Além disso, as tendências de pesquisa e questões populares nos campos de estudo podem ser identificadas pelo emprego de tal método (GAO et al., 2016). As análises de redes ajudam a tornar mais claro as relações entre diferentes itens por meio de uma rede de nós e links através dos quais as informações ou relações trafegam. A análise de rede é realizada para estabelecer uma rede com os nós que representam artigos de pesquisa, palavras-chave ou países. Essa rede pode ajudar a avaliar a importância e a influência de um nó medindo a centralidade dos nós, para a nossa análise bibliométrica usaremos o software citespace e o voswier para desempenharem o papel de mostrar essas correlações (MAO et al., 2015).

As análises propostas serão baseadas na produção do hidrogênio verde, com ênfase para o produzido foto sinteticamente. O hidrogênio é uma matéria-prima de extrema importância usada em indústrias como na síntese de amônia para fertilizantes, redução metalúrgica para refino de aço e no processamento de petróleo bruto. Hoje no mundo cerca de 70 mega toneladas de H_2 por ano são usados em forma pura, enquanto outros 45 mega toneladas de H_2 são usados na indústria sem purificação prévia de outros gases (MILLER et al., 2020). O hidrogênio configura como uma importante alternativa, ao aumento do aquecimento global, devido ao facto de ser um combustível que em sua queima libera praticamente zero dióxido de carbono. No entanto o seu processo de produção é que poderá ser um poluidor do ambiente. Projeta-se que o mercado global de hidrogênio cresça de 70 milhões de toneladas em 2019 para 120 milhões de toneladas em 2024 (ATILHAN et al., 2021).

O hidrogênio pode ser classificado em cinza, azul e verde. O Cinza refere-se ao hidrogênio produzido a partir da reforma de combustíveis fósseis. O azul refere-se a processos envolvendo combustíveis fósseis, porém, há também captura do dióxido de carbono liberado no processo. O verde é produzido por processos que são renováveis e que usam matéria prima renovável (ATILHAN et al., 2021).

O hidrogênio verde é produzido através de várias fontes de energias renováveis, tais como, eólica, solar, nuclear, hidrelétrica, geotérmica e biomassa. Em que na maioria desses processos há a separação da água (H_2O) para obtenção do H_2 verde (LI, 2017). Pelo facto da maioria dos processos acontecerem através da separação da H_2O , processos como eletrolise, termólise, separação fotocatalítica e separação termoquímica da água, são comumente usadas. Além de desidrogenação de moléculas portadoras de hidrogênio.

Os processos descritos acima possuem ainda um problema capital, no aspecto da eficiência do processo. Os processos necessitam de uma elevada quantidade de energia para produzir uma quantidade considerável de hidrogênio verde, ou seja, há que se pensar no barateamento do custo das matérias necessárias a esse processo. Assim sendo, muito se fala de processos biológicos de produção do hidrogênio verde. O H_2 verde produzido foto sinteticamente, em que usa a energia solar, mais uma matéria biológica, cianobactérias por exemplo e a água para a produção do hidrogênio (KHOJASTEH SALKUYEH; SAVILLE; MACLEAN, 2017). O H_2 verde e fotossintético, pode ser entendido como um processo semelhante a fotossíntese, por isso do nome fotossintético. Na fotossíntese, temos uma planta (maquina biológica) que recebe água, luz solar e dióxido de carbono e produz oxigênio para o ambiente e glicose para si. Assim como no processo fotossintético uma cianobactéria (maquina biológica), recebe água e energia solar e produz hidrogênio e oxigênio separados (KIM et al., 2019a).

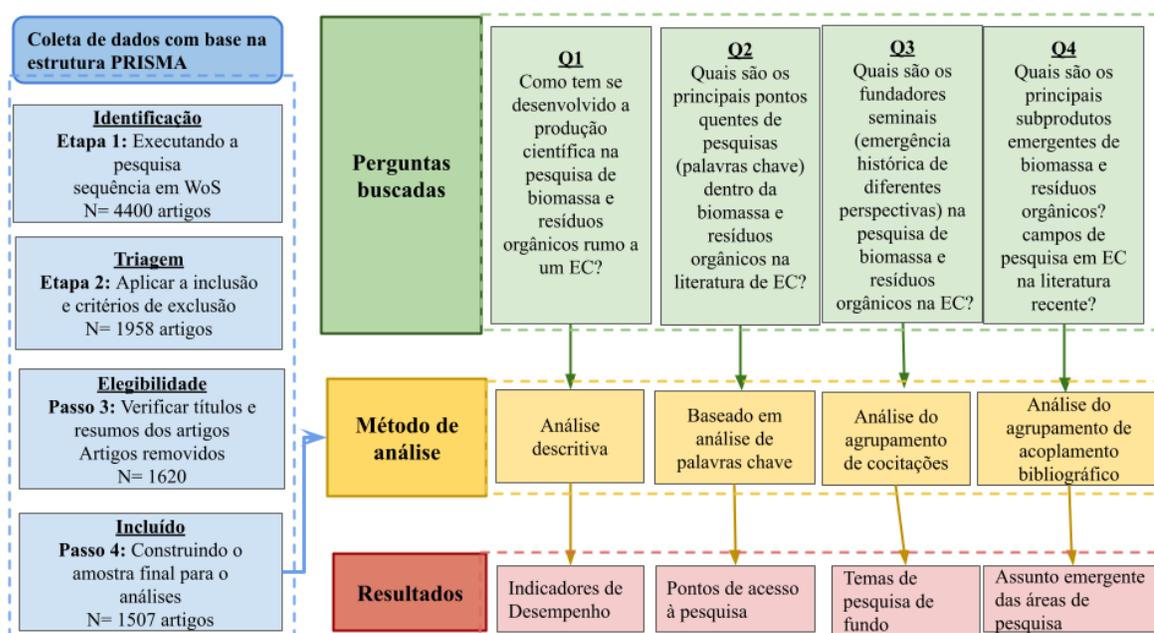
Tendo em vista os aspectos apresentados acima, o presente trabalho fará uma análise bibliométrica avançada da produção do hidrogênio verde fotossintético nas vertentes que se mostram no tópico dos objetivos geral e específicos.

4. METODOLOGIA

4.1. Fonte de dados

Os dados utilizados na análise bibliométrica avançada proposta foram recolhidos do sistema da capes periódicos através do link (<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez373.periodicos.capes.gov.br/index.php?>), mais concretamente da lista de bases Web of Science– Core Collection.

Figura 1 - Estrutura que representa os critérios de pesquisa e análise.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 1 apresenta a metodologia utilizada para a análise bibliométrica avançada. Em que primeiramente foi realizado a identificação dos dados no site da web of Science core collection adicionando no filtro de título as palavras chave e os seguintes operadores lógicos, “Green Hydrogen”, Or “photosynthetic” And “production”. Em seguida para realizar uma triagem adicionamos o filtro de anos de publicação nomeadamente de “2010-2022”, filtramos também os tipos de documentos a serem considerados sendo eles: “Articles, Review Articles And book chapters”. Foi adicionado ainda o filtro de língua, em que foi escolhida como sendo exclusivamente trabalhos redigidos em inglês. Por último fizemos uma leitura básica dos títulos e palavras chaves dos trabalhos para obter

enfim trabalhos dentro do nosso tema base. Assim sendo obtivemos um total de 4400 na identificação, ao realizarmos a triagem obtivemos 1958 trabalhos, já incluindo a elegibilidade e incluindo os dados finais culminamos por ficar com 1507 artigos. Após a base de dados estar delimitada, utilizou-se dos softwares descritos no tópico a seguir para avaliar as coautorias, as palavras chave do tema e os tópicos emergentes, tendo em vista a responder os questionamentos apresentados na figura 1 como sendo essenciais a essa análise.

4.2. Análise de dados

Para a análise bibliométrica proposta foram utilizados CiteSpace (versão 5.8.R3), VOSviewer (versão 1.6.17) e ArcGIS (versão 10.5). O ArcGIS 10.5 foi usado para analisar o georreferenciamento das publicações, ou seja, a, relação dos países que mais publicaram e a quantidade de publicações, enquanto o VOSviewer foi usado para visualização de dados sendo elas correlacionadas por coautoria, cocitações, entre outros. O CiteSpace observará e preverá as futuras áreas de pesquisa possíveis por meio de palavras-chave e clusters (SALES et al., 2022).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise bibliométrica

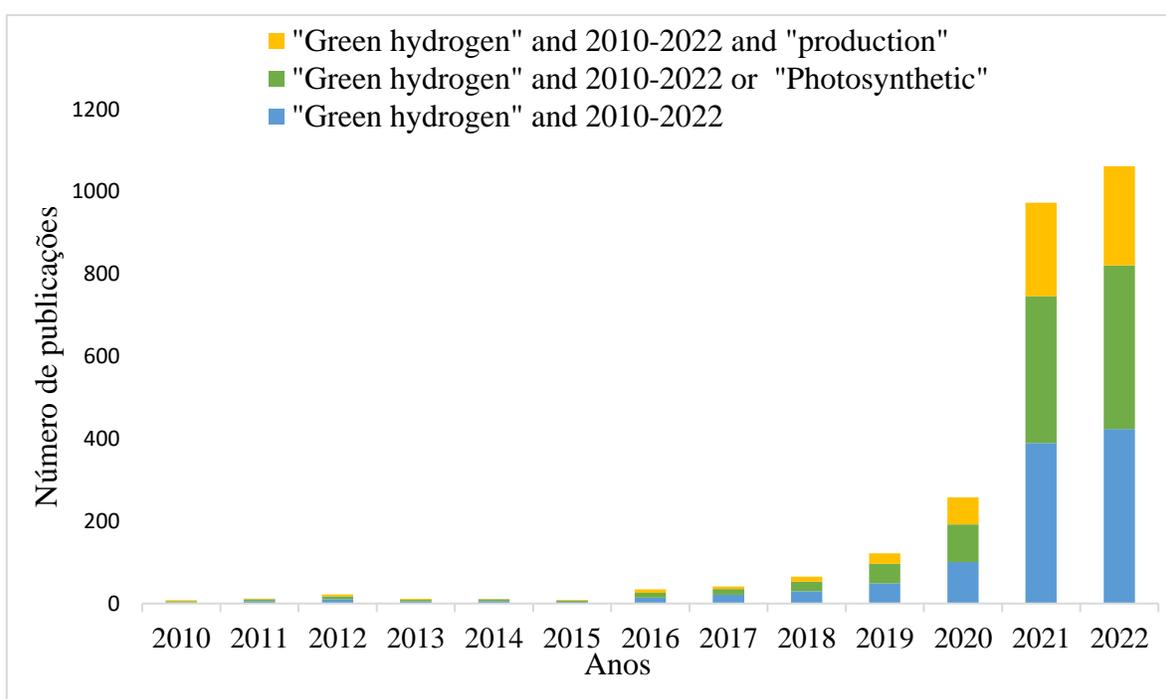
5.1.1 Resultados Gerais

Em termos gerais foi analisado a base de dados obtida da Web of Science de 1507 trabalhos, em que o trabalho apontado como mais relevante, por ter a maior quantidade de citações de entre todos os trabalhos da base de dados, é o “A comparative overview of hydrogen production processes”, publicado no ano de 2017, aonde os autores trazem um comparativo entre as principais técnicas de produção de hidrogénio apresentando os principais pontos que tornam cada um dos processos menos ou mais atraentes, tanto economicamente quanto em questões de eficiências de conversão (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017). Em outros trabalhos são apresentados também algumas bactérias fotossintéticas necessárias a produção do hidrogénio (cianobactérias), bem como um comparativo do método de produção do hidrogénio verde fotossintético com o proveniente de eletrolise, na questão econômica de eficiência e da sustentabilidade. Em que o via

eletrolise mostra-se mais concretizada na questão custo benefício, mas, o fotossintético também se apresenta como promissor se usadas cianobactérias ou microalgas em sua produção.

Os trabalhos mostram de igual modo um interesse por parte de outras biocombustíveis como o bioetanol, biobutanol e o biodiesel no uso de técnicas que emitem processos naturais de suas produções, como é o caso da produção fotossintética através Cianobactérias e micro algas. Além de se mostrar interesses no uso de hidrogénio verde para a produção de mobilidade, fertilizantes e de polímeros. Por fim além dos tópicos citados as análises mostram um interesse de aliar a transição energética, descarbonização, mudanças climáticas e fontes renováveis com a produção do hidrogénio verde.

Figura 2- Relação entre as palavras chaves individualizadas e o número de publicações por ano.



Fonte: Autor (2022).

Como mostrado na **Figura 2**, há um total de 1063 documentos mostrados de 2010 a 2022 que tem como título hidrogénio verde, já no mesmo período temos 965 documentos que possuem como título base o termo hidrogênio verde fotossintético e 600 trabalhos com o título base o termo hidrogênio verde e produção. Quando enfim ajustamos a nossa pesquisa para os títulos bases hidrogénio verde produzido foto sinteticamente encontramos um total

de 1507 trabalhos. Em que há um aumento nas pesquisas e publicações de trabalhos significativa em meados do ano de 2016/2017 que representam um aumento de 19,5% em relação ao ano de 2010, anos seguintes a COP 25, para alcançar cerca de 564 trabalhos no ano de 2022.

4.1.2 Distribuição das revistas científicas

Para a análise das revistas elaborada através do vos viewer observamos que as 49 revistas mais citadas possuem um total de 744 publicações e ao todo somam cerca de 11941 citações. Como observados na Tabela 1 em que são apresentadas as dez revistas ranqueadas em ordem decrescente, ou seja, da que possui maior número de citações para a que possui menor número de citações. Respectivamente a revista “International journal of hydrogen energy “que possui 19,19 % das publicações 145 publicações também possui o maior número de citações, assim como a revista que ocupa a décima posição “advanced functional materials” e possui o menor número de publicações das revistas apresentadas cerca de 1,08 % do total das publicações. No entanto a quantidade de publicações não representa uma condição da quantidade de citações, pois a exemplo da revista “metabolic engineering “, que possui 1,61 % das publicações enquanto que a revista “Applied Energy” possui 3,23 % das publicações, no entanto elas possuem respectivamente 867 e 327 citações, ou seja, uma revista com um maior número de publicações não possui necessariamente uma maior quantidade de citações. Isso deve-se muito a questão do grau de especialidade que determinada revista tem acerca do tema produção de hidrogênio verde fotossintético, bem como a coligação acadêmica que se dá para o tema, ou seja, o tema está mais correlacionado com engenharia metabólica do que com energia aplicada, para o caso descrito anteriormente. Então há uma maior pesquisa por parte de leitores e escritores na revista que melhor entende do tema, levando conseqüentemente a uma maior citação dos trabalhos naquela revista.

Tabela 1 - As dez principais revistas científicas publicadas na produção fotossintética de hidrogênio verde.

Posição	Revista	P	FI	NP	NC	AC	P (%)
1	International journal of hydrogen energy	EN	7.139	145	2030	14	19,49%
2	Bioresource technology	NL	11.889	31	1217	39,3	4,17%
3	Renewable & sustainable energy reviews	USA	16.799	23	1071	46,6	3,09%
4	metabolic engineering	USA	8.829	12	867	72,3	1,61%

5	Journal of materials chemistry a	EN	14.511	24	621	25,9	3,23%
6	energy & environmental science	EN	39.714	12	538	44,8	1,61%
7	biotechnology for biofuels	EN	7.670	12	521	43,4	1,61%
8	Applied energy	EN	11.446	24	327	13,6	3,23%
9	Journal of cleaner production	USA	11.072	22	144	6,55	2,96%
10	advanced functional materials	GER	19.924	8	267	33,4	1,08%

Fonte: Autor (2022).

Um termo relevante para entendermos a relação entre as citações/publicações que são feitas é o FI, ou seja fator de impacto da revista que seria uma relação matemática da razão entre a quantidade de citações feitas em um determinado ano pela quantidade de itens citáveis. Então revistas podem apresentar o mesmo número de publicações, mas se tiverem diferentes fatores de impacto significa que uma revista possui trabalhos de maior relevância, ou seja trabalhos mais citados. Um outro medidor de impacto médio de uma determinada revista é a média das citações que é uma razão entre o número total de citações pelo número total de artigos. As pesquisas e publicações mostram-se mais evoluídas nos países da Europa mais concretamente na Inglaterra e na Alemanha, enquanto que no continente americano as pesquisas são dominadas pelos Estados Unidos da América.

5.1.3 Distribuição por país e instituição

No quesito das distribuições do número de publicações e citações por países como mostrado na **Tabela 2**, temos que os dez países com maior número de publicações representam respectivamente, 74,95 % do total de publicações na área de produção de hidrogénio verde fotossintético. A república Popular da China representa o maior número de publicações com 352 publicações sobre o tema, seguido dos Estados Unidos da América e Alemanha com respectivamente 143 e 118 publicações cada. No final do rank na nona posição temos a Austrália com 53 publicações e pôr fim a Espanha fechando o rank com 52 publicações. A relevância de cada País em termos gerais também é analisada pelo número de citações de cada país a China possui um total de 5904 citações e ocupa a primeira posição no quesito citações dos trabalhos seguido dos EUA com 3582 publicações e Alemanha com 1510 citações fechando assim o top três de número de citações que por coincidência é o mesmo top três do número de publicação, porém há que se ter atenção pois para o caso da

nona e décima posição temos respectivamente o Japão e a Índia com 853 e 696 citações no entanto esses dois países estão na sexta e sétima posição no quesito de números de publicações ou seja mais uma vez o número de citações mostrou-se não ter uma relação sempre de proporcionalidade direta com o número de publicações.

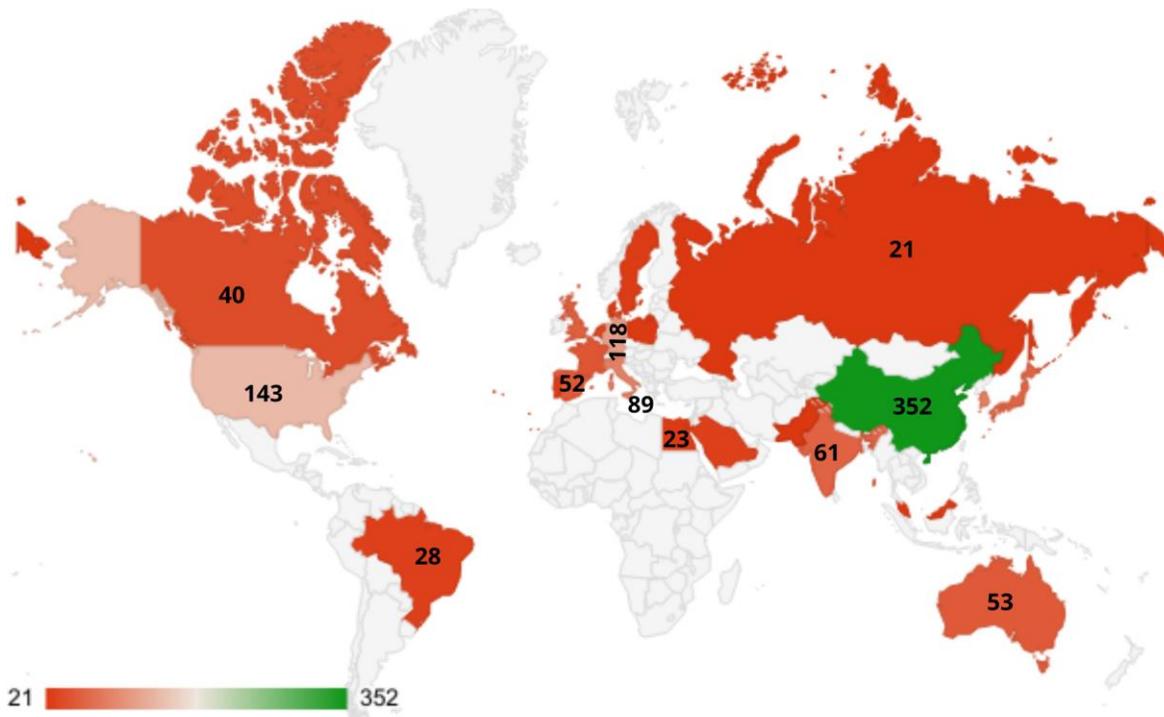
Tabela 2 - Os 10 principais países na publicação sobre produção fotossintética de hidrogênio verde.

Posição	País	NP	NC	AC	TLS	P (%)
1	China	352	5904	16,77	119	24,50%
2	Estados Unidos da América	143	3582	25,05	77	9,95%
3	Alemanha	118	1510	12,80	49	8,21%
4	Itália	89	1327	14,91	44	6,19%
5	Korea do Sul	88	1049	11,92	36	6,12%
6	Japão	63	853	13,54	26	4,38%
7	Índia	61	696	11,41	17	4,24%
8	Inglaterra	58	1020	17,59	55	4,04%
9	Australia	53	1283	24,21	45	3,69%
10	Espanha	52	558	10,73	26	3,62%

Fonte: Autor (2022).

A **Figura 3**, permite uma melhor visualização da geolocalização das publicações, sendo representadas apenas os países com mais de 21 publicações. Na América do Sul temos uma dominância dos EUA na questão das publicações 143 seguido do Canadá com 40 e do Brasil com 28 publicações, no continente Africano temos a referência apenas do Egito com 23 publicações no tema. No continente Europeu e asiático onde temos um maior número de artigos, seguramente a China tem a maior quantidade de trabalhos 352 e é representada pelo degradê verde na figura seguido da Índia com 61 publicações. Assim como a Alemanha representa o país com maior número de artigos no continente europeu 118 publicações respectivamente seguido da Itália com 89 artigos. Como analisado o tema é de certa forma ainda pouco difundido já que as figuras são referentes ao período de 2010 até 2022, e foram publicados poucos trabalhos ainda sobre o tema.

Figura 3 - Representação da publicação de trabalhos por país.

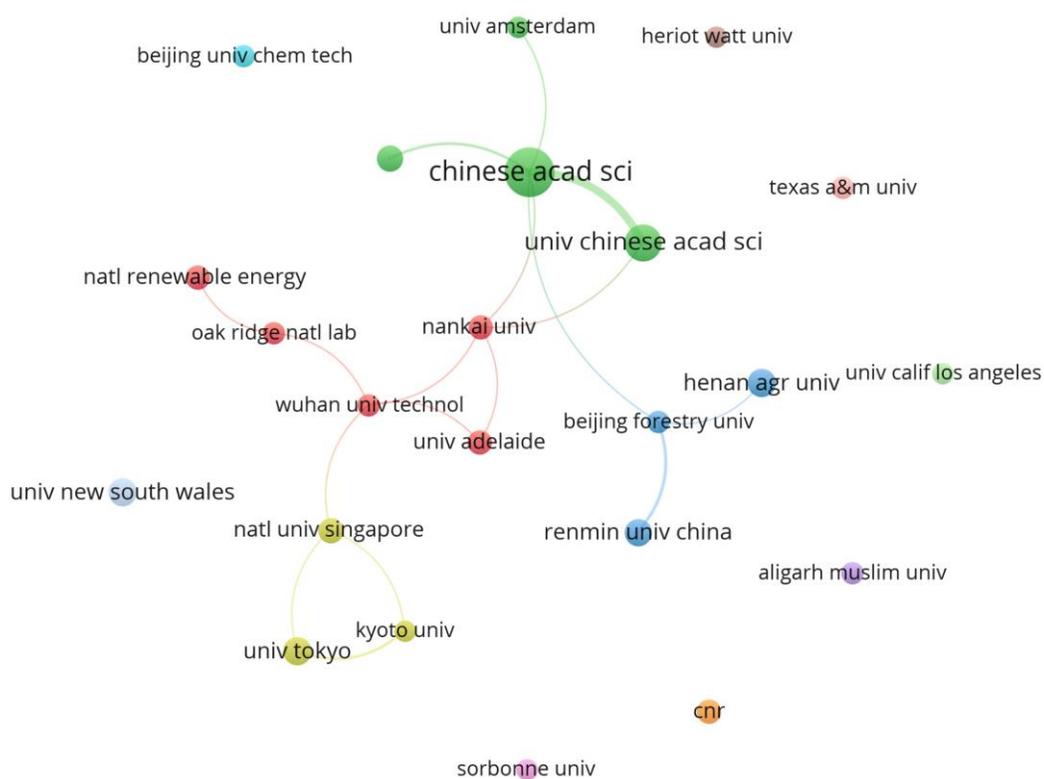


Fonte: Autor (2022)

A **Figura 4**, vem representando uma junção das informações da tabela 2 com a figura 3, ou seja, a mesma representa a correlação entre países com ao menos 5 publicações através de linhas denominadas Total Link Strength e de Clusters, em que o primeiro TLS representa a força de correlação entre dois ou mais autores que são de países diferentes e o cluster representa cada países em um nó específico. A China além de ser a maior publicadora de trabalhos sobre o tema a mesma também é o que possui maior relação de coautoria com outros países por isso de ela estar representada no centro da figura e possuir uma linha bem mais densa, ou seja, a mesma possui uma força total do link elevada o que implica que a China tem várias coautorias com outros países mais especificamente o caso dos Estados Unidos da América, da Austrália, do Japão e da Inglaterra.

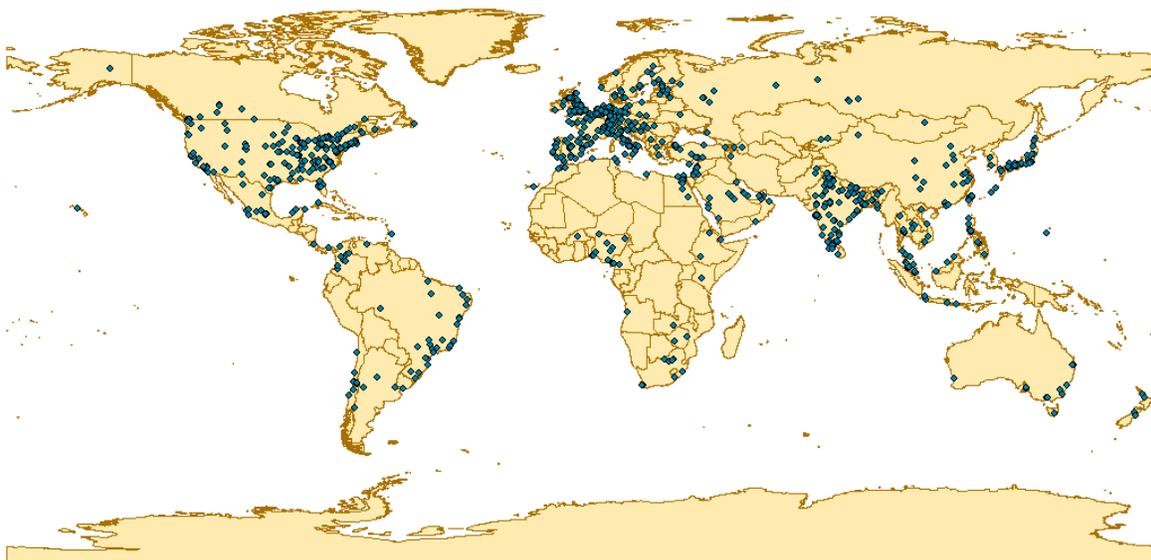
asiáticos, isso não implica que os mesmos possuam uma maioria esmagadora de publicações, a **Figura 6**, que representa um georreferenciamento dos trabalhos de acordo com o seu país de publicação, traz um panorama mostrando que de todos os trabalhos publicados com títulos ligados a produção fotossintética de hidrogénio verde há um grande interesse e trabalhos publicados por países europeus e norte-americanos. Sendo que 34 % dos trabalhos pertencem ao continente europeu, 44 % ao continente asiático, 15 % ao continente americano e 7% correspondendo a outros.

Figura 5 - Coautoria entre organizações com pelo menos 170 citações e 5 artigos publicados de janeiro de 2010 a setembro de 2022.



Fonte: Autor (2022)

Figura 6 - Mapa de georreferenciamento das publicações distribuídas por país.

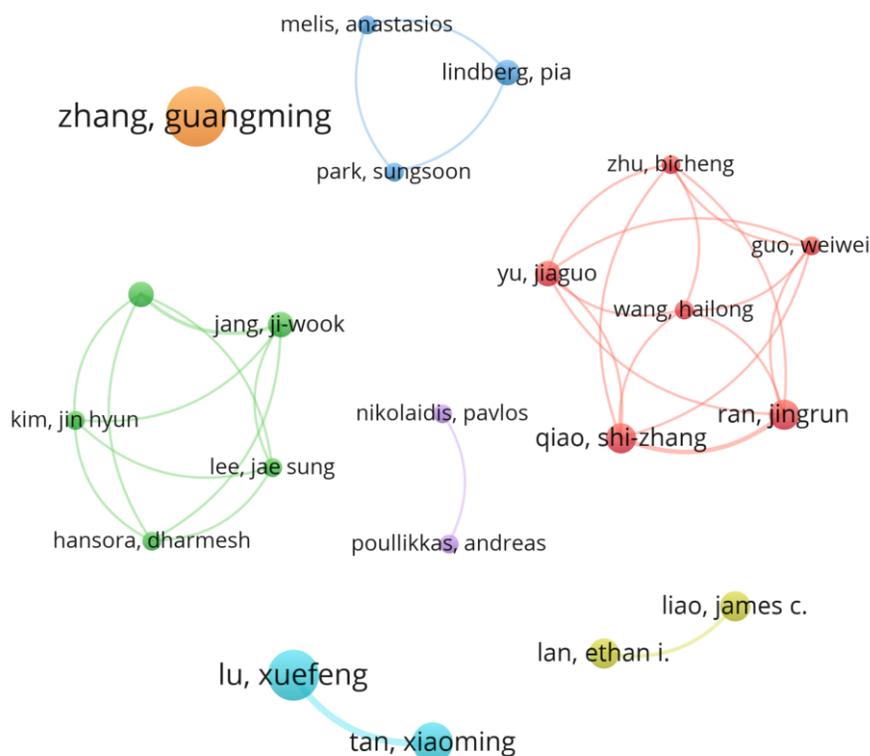


Fonte: Autor (2022)

Para terminar o mapeamento das coautorias e a consequente modelagem do perfil de trabalhos que estão sendo desenvolvidos na questão da origem e parcerias dos mesmos , a análise de dados também nos possibilita fazer um mapa de coautoria entre os autores representado na **Figura 7**, o mapa de visualização da rede é relacionado a colaboração entre os autores com pelo menos de pelo menos 1 publicação e 300 citações a mesma relaciona através de clusters ou nódulos e linhas, os trabalhos que foram produzidos entre um ciclo específico de autores, observamos que há uma maior correlação entre “Wang,hailong ; Yu,jiaguo ; Qiao, shi-zang; Ran,jingrun ; Ran, jingrun ; Guo weiwei ; Zhu,bicheng”, representado pelo cluster da cor vermelha, ou seja entre esses autores há pelo menos 1 publicação em comum que tenha no mínimo 300 citações, já a densidade das linhas representam o total de trabalhos elaborados por um conjunto de autores em que por exemplo “Wang,hailong”, possui apenas um documento em coautoria com os demais autores do mesmo cluster, já “Ran,jingrun” possui três documentos em coautoria com os demais. Assim como no cluster representado a azul claro nomeadamente entre os autores “tan, xiaoming” e “lu,xuefeng” apresentam uma maior densidade das linhas de correlação pelo facto de possuírem 16 trabalhos em coautoria. O artigo com mais citações é “A comparative overview of hydrogen production processes” (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017), possuindo 919

citações o artigo que é trabalhado por Nikolaidis em coautoria apenas com o Poullikkas, o que demonstra uma certa isolação dos autores do referido trabalho, o mesmo foi publicado em 2017, ou seja, um trabalho recente, porém com pouca difusão de coautorias.

Figura 7 - Mapa de visualização de coautorias entre autores com pelo menos um trabalho publicado e 300 citações nesse trabalho.



Fonte: Autor (2022).

5.1.4 Análise quantitativa dos artigos

Na Tabela 3 temos representados os dez artigos com maiores citações em ordem decrescente, seus respectivos títulos, anos de publicações e os autores dos mesmos. O artigo que possui a maior quantidade de citações trata-se de “A comparative overview of hydrogen production processes”(NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017), publicada a cerca de 5 anos em 2017 e correspondendo a 4,61% das citações de toda a base de dados analisada, em que os autores trazem um comparativo entre as principais técnicas de produção de hidrogénio trazendo os principais pontos que tornam cada um dos processos menos ou mais atraentes, tanto economicamente quanto em questões de eficiências de conversão. Segundo Playlos et all, há cerca de 96 % de hidrogénio produzido correspondente a fontes não

renováveis/fósseis, sendo 48% a partir de gás natural, 30% de óleos pesados e nafta e 18% de carvão. No entanto temos formas sustentáveis de produção do gás hidrogénio envolvendo matéria-prima sustentável, a biomassa por exemplo, com técnicas como a pirólise termoquímica e a gaseificação que são as abordagens que atualmente mostram-se como sendo os de melhor potencial e economicamente mais viáveis para a produção do hidrogénio verde, os processos biológicos de produção de hidrogénio apesar de terem um caminho aparentemente promissor, há ainda a necessidade de melhorar sua taxa de produção e diminuir os custos de construção dos sistemas biológicos de produção de hidrogênio verde(NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017). Em segundo lugar temos o artigo intitulado “Metal-Free 2D/2D Phosphorene/g-C3N4 Van der Waals Heterojunction for Highly Enhanced Visible-Light Photocatalytic H-2 Production”(RAN et al., 2018), possuindo um total de 536 citações e sendo publicado em 2018, ou seja, muito recente.

O mesmo artigo é significativo, pois a **Figura 7**, o representa como sendo o artigo que possui a maior quantidade de coautoria entre os autores da nossa base de dados. No referido artigo os autores trazem aspectos técnicos de produção fotocatalítica do hidrogénio verde apresentando uma nova foto catalizadora fosforeno /g-C3N4 livre de metal, mas também lança olhares sobre o projeto e fabricação de hetero junção VDW 2D/2D para aplicações em catálise, eletrônica e optoeletrônica(RAN et al., 2018).

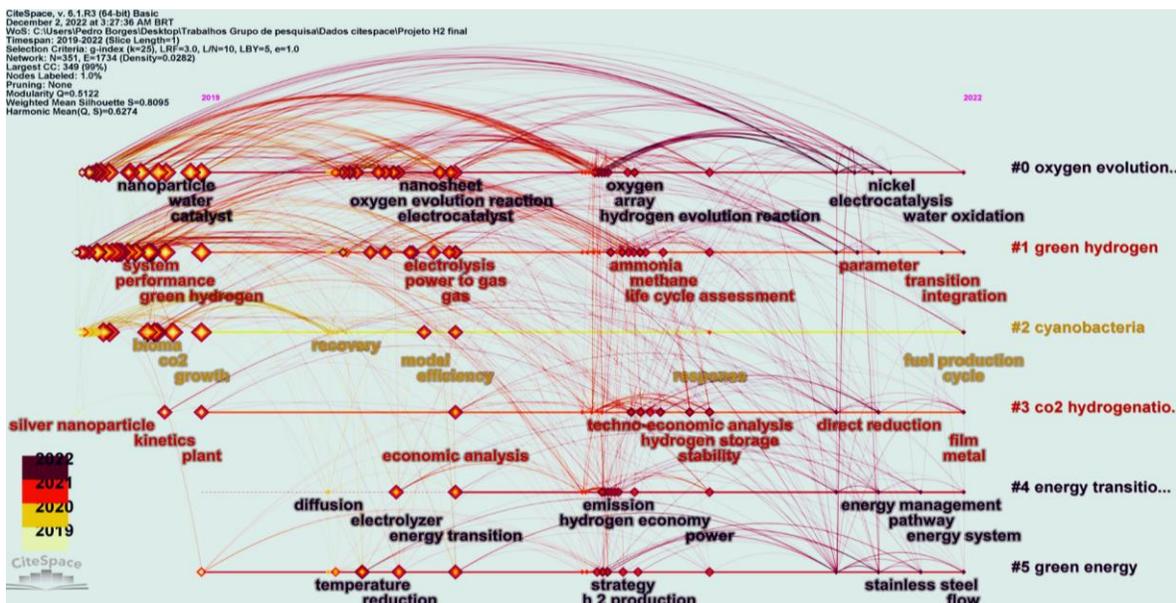
Tabela 3 - Os trabalhos mais citados sobre formas de produção de hidrogênio verde.

Posição	Título dos artigos	Autores	Ano de publicação	Total de citações	Referências
1	A comparative overview of hydrogen production processes	Nikolaidis, Pavlos; Poullikkas, Andreas	2017	919	(NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017)
2	Metal-Free 2D/2D Phosphorene/g-C3N4 Van der Waals Heterojunction for Highly Enhanced Visible-Light Photocatalytic H-2 Production	Ran, Jingrun; Guo, Weiwei; Wang, Hailong; Zhu, Bicheng; Yu, Jianguo; Qiao, Shi-Zhang	2018	536	(RAN et al., 2018)
3	Engineering a platform for photosynthetic isoprene production in cyanobacteria, using Synechocystis as the model organism	Lindberg, Pia; Park, Sungsoo; Melis, Anastasios	2010	389	(LINDBERG; PARK;

					MELIS, 2010)
4	Toward practical solar hydrogen production - an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge	Kim, Jin Hyun; Hansora, Dharmesh; Sharma, Pankaj; Jang, Ji- Wook; Lee, Jae Sung	2019	372	(KIM et al., 2019b)
5	ATP drives direct photosynthetic production of 1-butanol in cyanobacteria	Lan, Ethan I.; Liao, James C.	2012	251	(LAN; LIAO, 2012)
6	Photosynthetic production of ethanol from carbon dioxide in genetically engineered cyanobacteria	Gao, Zhengxu; Zhao, Hui; Li, Zhimin; Tan, Xiaoming; Lu, Xuefeng	2012	246	(GAO et al., 2012)
7	Photosynthetic carbon partitioning and lipid production in the oleaginous microalga <i>Pseudochlorococcum</i> sp (Chlorophyceae) under nitrogen-limited conditions	Li, Yantao; Han, Danxiang; Sommerfeld, Milton; Hu, Qiang	2011	205	(LI et al., 2011)
8	Bifunctional Heterostructured Transition Metal Phosphides for Efficient Electrochemical Water Splitting	Zhang, Haojie; Maijenburg, A. Wouter; Li, Xiaopeng; Schweizer, Stefan L.; Wehrspohn, Ralf B.	2020	185	(ZHANG et al., 2020)
9	Feeding the world: improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production	Simkin, Andrew J.; Lopez-Calcano, Patricia E.; Raines, Christine A.	2019	163	(SIMKIN; LÓPEZ- CALCAGN O; RAINES, 2019)
10	Stoichiometric and energetic analyses of non-photosynthetic CO ₂ -fixation pathways to support synthetic biology strategies for production of fuels and chemicals	Fast, Alan G.; Papoutsakis, Eleftherios T.	2012	142	(FAST; PAPOUTSA KIS, 2012)

Fonte: Autor (2022).

Figura 8 - Visualização da linha do tempo das palavras-chave dominantes nos documentos de produção fotossintética de hidrogênio verde entre 2019 e 2022.



Fonte: Autor (2022)

Um aspecto em comum dos artigos apresentados é o de que todos trazem questões relacionadas às técnicas de produção assim como mostrado na **Figure 8**, a figura apresenta uma visão da linha do tempo de palavras-chave dos artigos estudados de janeiro de 2019 até meados de setembro de 2022, em que para cada palavra-chave central observamos os tópicos mais importantes, ou seja, palavras indicadoras de linhas a serem estudadas. A palavra-chave central **# 0 oxygen evolution reaction**, que é bastante aliada à questão da eficiência do processo de produção do hidrogênio, uma vez que na produção do mesmo há uma liberação de oxigênio e o balanceamento do mesmo é necessária para desenvolver a eficiência do projeto. No cluster **# 1 green hydrogen**, aspectos ligados à sua conversão em outros combustíveis (Power-to-fuel), ligado à transição energética é mostrada como de interesse muito recente. No cluster é analisada a matéria mais promissora para a produção de hidrogênio verde fotossintético, **# 2 cianobactérias** que é seguida por tópicos de interesse como o ciclo de produção do combustível, a eficiência do processo e a biomassa, com evolução nas pesquisas da esquerda para a direita de 2019 a 2022. No cluster **# 3 CO₂ hydrogenation**, enfatiza-se pesquisas relacionadas ao uso de hidrogênio na indústria para transformação de CO₂ em subprodutos ao invés de jogá-los no meio ambiente. Enquanto que **# 4 energy**

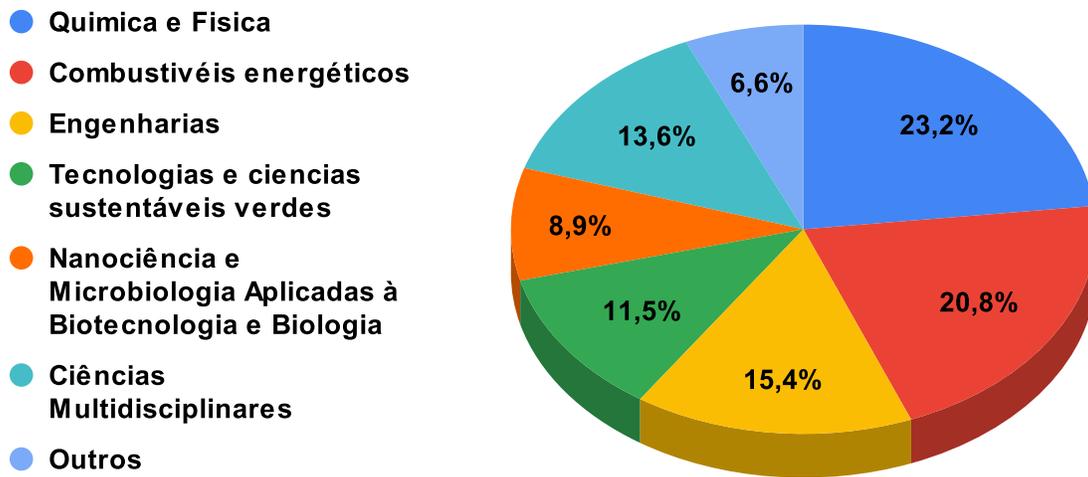
transition, traz a ideia de pesquisas se direcionando ao longo do tempo para a economia do hidrogénio, eletrolisadores, sistemas energéticos, entre outros, por último no cluster # **5 green energy** é seguida por palavras como redução da temperatura, estratégias de produção do hidrogénio e Fluxo de aço inoxidável(HAYWARD; SVISHCHEV; MAKHIJA, 2003).

No decorrer deste tópico pudemos observar que em termos de matéria prima a mais emergente apresentada são as cianobactérias apresentadas no cluster # **2 cianobactérias**, então no decorrer dos próximos tópicos tentaremos destrinchar o papel dessa matéria no processo de produção de hidrogénio verde fotossintético.

5.1.5 Áreas de pesquisa

A partir da **Figura 9**, temos representados a distribuição das publicações de 2010 a 2022 pelas áreas de estudos, sobre a produção de hidrogênio verde fotossintético. São cerca de 91 áreas de estudo distintas que possuem ao menos uma publicação sobre o tema, sendo que temos apresentado na referida figura as 7 áreas globais com os maiores números de publicações. Sendo que a grande área de Química e física possuem o maior quantitativo, somando 705 trabalhos, correspondendo efetivamente a 23,2% das publicações, seguido da área de combustíveis energéticos com 20,8% das publicações, nomeadamente 633 publicações, completando o top três temos a grande área que representa as publicações feitas em jornais de engenharias, com seus 469 documentos, ou seja, efetivamente 15,4 % dos trabalhos publicados sobre hidrogênio verde fotossintético. As restantes 4 grandes áreas são respectivamente, ciências multidisciplinares com 13,6%, 413 publicações, tecnologia e ciência sustentável verde com 11,5%, 351 publicações, nanociência e microbiologia aplicadas à biotecnologia e biologia com 8,9%, 270 publicações, e por último, outros que representam todas as outras áreas de pesquisas restantes com um total de 200 publicações correspondendo a 6,6 % das publicações.

Figura 9 - Distribuição das áreas de pesquisa.

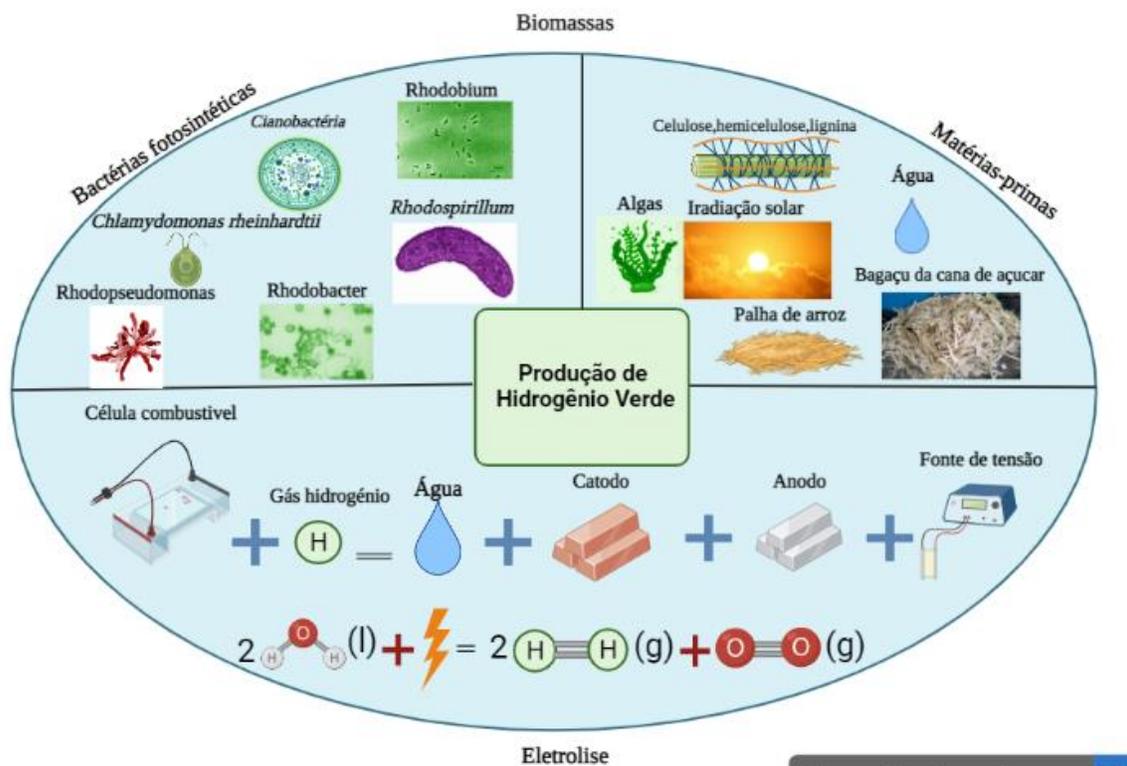


Fonte: Autor (2022)

5.2 Técnicas/Matérias-primas para a produção do hidrogénio verde

Como foi apontado no decorrer desse trabalho, o hidrogénio verde será destrinchado no quesito de suas técnicas de produção, as técnicas de produção são diferenciadas pelas matérias primas necessárias ao processo de produção. Em linhas gerais há três formas de produção do hidrogênio, sendo eles o hidrogênio produzido através de combustíveis fósseis, através da água e através da biomassa. O hidrogênio produzido via combustíveis fósseis é bastante difundido, porém a técnica não é ambientalmente viável, pois os processos envolvem por exemplo reforma a vapor do gás natural, oxidação parcial dos hidrocarbonetos pesados e ou ainda através da gaseificação do carvão. Por outro lado, teremos o hidrogênio Verde produzido de forma limpa através de matérias-primas como a água e a biomassa, que apesar de ainda não possuírem um forte papel na produção mundial de hidrogênio, vem apresentando fortes indícios de avanços tecnológicos de produção que os equipararam e possivelmente superaram a produção de hidrogênio não sustentável (DE SÁ; CAMMAROTA; FERREIRA-LEITÃO, 2014a).

Figura 10 - Matérias-primas para a produção de hidrogênio verde em função da técnica de produção.



Fonte: Autor (2022)

A **Figura 10** representa a classificação das matérias-primas para a produção de hidrogênio verde, dependendo da técnica utilizada para a produção de hidrogênio verde. Portanto, temos dois grandes grupos de matérias-primas para a produção de hidrogênio sustentável. Água, na qual, por meio de processos como a eletrólise da água envolvendo células a combustível, processos termoquímicos e foto eletroquímicos, há a produção de hidrogênio verde, separando a molécula de gás hidrogênio do oxigênio. E a biomassa, que possui processos de obtenção de hidrogênio por meio da gaseificação da biomassa, reforma a vapor do etanol, reforma na fase líquida e processos biológicos. Os processos biológicos são a biofotólise da água, a foto fermentação e a fermentação anaeróbica. (DE SÁ; CAMMAROTA; FERREIRA-LEITÃO, 2014b)

A produção de hidrogênio é dividida em aproximadamente 40% através da reforma do gás natural, seguido de 30% da oxidação de hidrocarbonetos pesados, 18% da gaseificação do carvão e 5% correspondem à eletrólise da água e cerca de 1% correspondem a processos

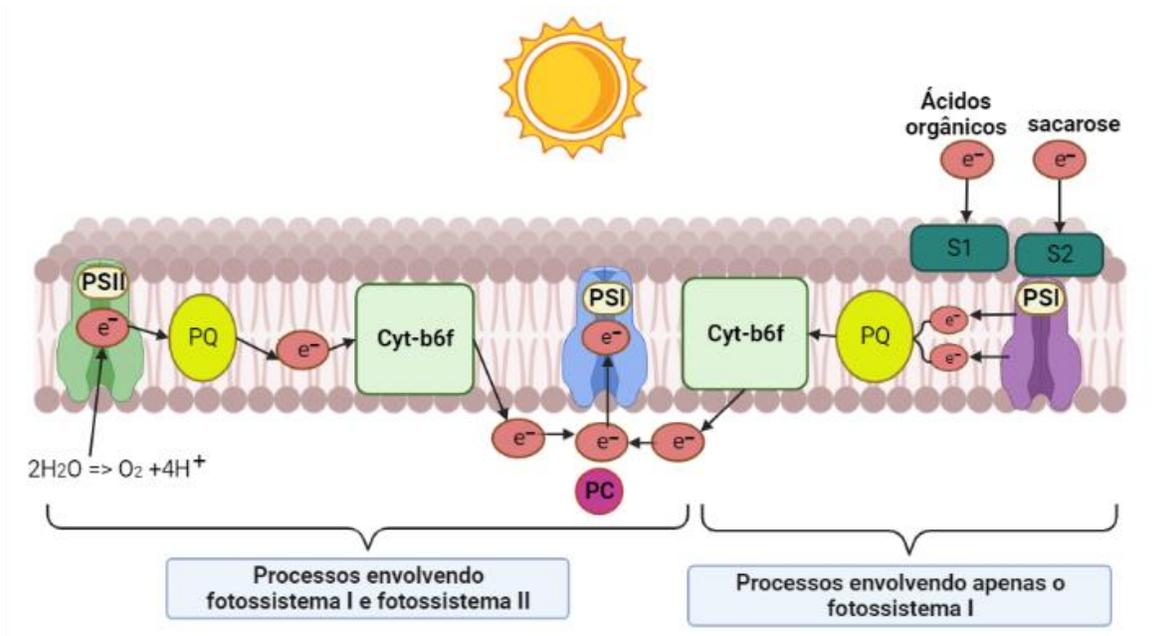
biológicos. Seguindo essas percentagens e dissertando sobre produção sustentável de hidrogênio os tópicos a seguir apresentaram os conceitos das técnicas mais promissoras indicadas nos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos. Sendo eles eletrólise da água e o processo biológico de biofotólise direta mais concretamente produção fotossintética de hidrogênio, como o presente trabalho visa demonstrar com maior ênfase o panorama da produção fotossintética de hidrogênio traremos uma explicação aprofundada desse processo bem como suas características que iram impulsionar ou não sua difusão para os próximos anos(DE SÁ; CAMMAROTA; FERREIRA-LEITÃO, 2014a).

5.2.1 Produção fotossintética de hidrogênio verde

Para a produção fotossintética do hidrogênio é necessária uma fonte de energia, para esse caso a luminosa, um substrato doador de elétrons, e um catalizador que combina elétrons e prótons para gerar o gás hidrogênio. (GHIRARDI et al., 2009)

Na **Figura 11**, temos representado um modelo simplificado da fotossíntese oxigenada em algas verdes ligada à produção de H_2 pela [FeFe]-hidrogenase, bem como a fotossíntese oxigenada em células vegetativas de cianobactérias acoplada à produção de H_2 catalisada por nitrogenase em heterocistos e por último a fotossíntese não oxigênica em bactérias roxas não sulfurosas ligada à produção de H_2 pela nitrogenase. (GHIRARDI et al., 2009; REDDING et al., 2022)

Figura 11 - Processo fotossintético de produção de H_2 : a estrutura verde, azul e roxa representa as moléculas coletoras de luz clorofila, ficobilinas e bacterioclorofilas, respectivamente.



Fonte: Autor (2022)

O sistema da **Figura 11**, é de fundamental importância para o entendimento do processo fotossintético de produção de hidrogénio, tanto oxigênica, quanto a não oxigênica, na medida em que os processos da fotossíntese oxigenada, ou seja, aonde há a liberação do gás oxigénio como produto, possuem a necessidade de dois fotos-sistemas (PSI e PSII), enquanto processos da fotossíntese não oxigênica, envolvem apenas um foto-sistema (PSI)(MULKIDJANIAN, 2007).

Algas verdes e cianobactérias são organismos foto autotróficos (ABOAL et al., 2022) que podem crescer sob luz solar e dióxido de carbono, sem fontes orgânicas de carbono. Eles realizam fotossíntese, que converte energia luminosa em energia química para transporte de elétrons. Se acompanharmos da esquerda para a direita na **Figura 11**, na estrutura verde o ambiente em que ocorre o PSI, esse processo, que ocorre nas membranas tilacóides (SVOBODA et al., 2023), começa com a absorção de luz por moléculas de pigmento (clorofilas, ficobilinas e carotenóides) (RAKHIMBERDIEVA et al., 2007) ligadas a complexos proteicos coletores de luz associados a dois complexos proteicos multimembranosos, Fotos sistema I (PSI) e Fotos sistema II (PSII)(VIRUVURU;

FRAGATA, 2008). A energia da luz absorvida é então transferida para os pigmentos do centro de reação de PSII e PSI, onde ocorre a separação de carga. Após a obtenção da carga já separada e para evitar a recombinação de carga entre os lados redutor e oxidante ocorre uma rápida transferência de elétrons para a Plastoquinona (PQ)(SZWALEC et al., 2022) essa por sua vez, quando duplamente reduzida, deixa seu sítio de ligação na proteína do centro de reação e se difunde através da membrana tilacóide para atracar e reduzir aceptores intermediários de elétrons no complexo citocromo (Cyt-b6f) (MALONE et al., 2021), o oxidante forte extrai elétrons de um resíduo de tirosina e oxida sequencialmente duas moléculas de água ligadas ao complexo de evolução de Oxigénio, essa mesma reação libera oxigénio e prótons. Independentemente de como ocorre a separação de carga, a carga negativa é então transferida através de uma série de moléculas altamente redutoras e é eventualmente usada para reduzir a ferredoxina (AKUH et al., 2022) (moléculas transportadoras de redutores como a enzima responsável pela separação de hidrogénio hidrogenase) o oxidante gerado no PSI que não é capaz de oxidar água, então ela aceita elétrons do complexo Cyt-b6f, através de uma molécula de PC (VIOLA et al., 2021), a reação de separação da água que ocorre no lado oxidante do PSII é única na natureza e é catalisada pelo complexo de evolução de Oxigénio com a obtenção final da molécula H_2 de hidrogénio verde mais a molécula de oxigénio.

5.2.2 Matérias primas quentes: Cianobactéria e microalgas

Os trabalhos realizados na temática de produção fotossintética de hidrogénio mostram fortes interesses dos pesquisadores em estudar o papel das cianobactérias e de outras microalgas no processo. A exemplo do trabalho “Engineering a platform for photosynthetic isoprene production in cyanobacteria, using *Synechocystis* as the model organism” (LINDBERG; PARK; MELIS, 2010), em que os autores buscam trazer a ideia das aplicações de um único organismo que possa produzir biocombustíveis, atuando tanto como foto catalizador, quanto produtor do combustível pronto, para o estudo de caso da cianobactéria *Synechocystis*, a mesma gera hidrocarbonetos isoprenos voláteis a partir de CO_2 e H_2O . Os resultados mostraram que a fotossíntese oxigénica pode ser redirecionada para gerar pequenos hidrocarbonetos voláteis úteis, enquanto consome CO_2 , sem necessidade prévia de

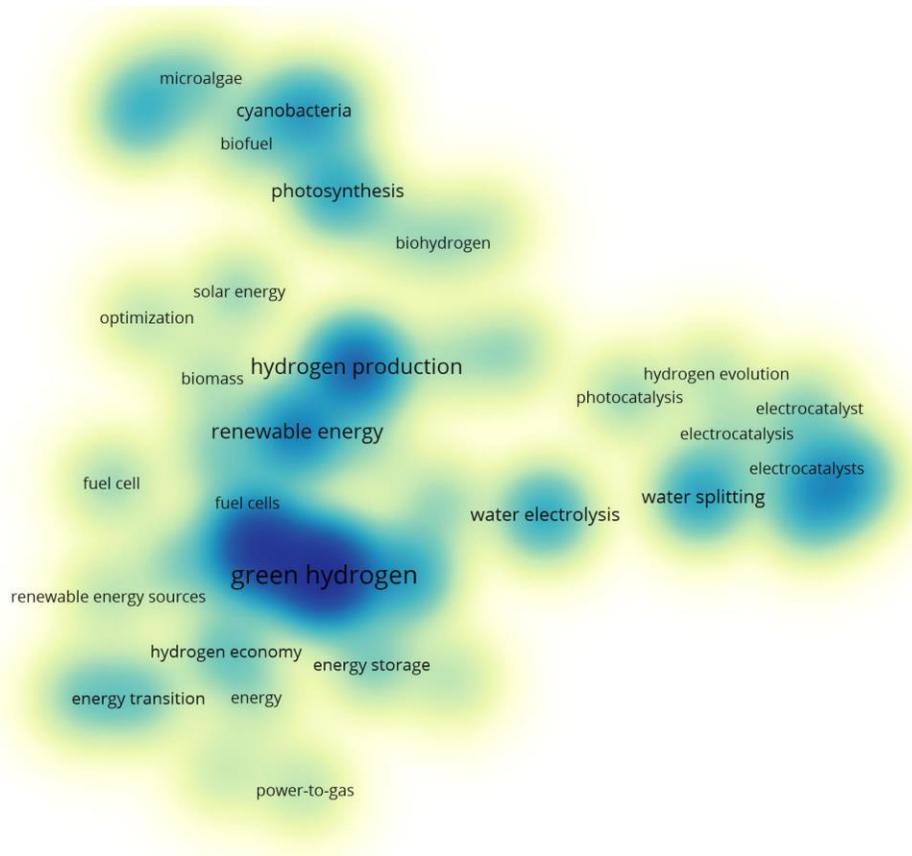
colheita, desidratação e processamento da respectiva biomassa. O trabalho referido é o terceiro no rank de citações com 389 citações e publicada no ano de 2010.

Outro estudo relevante também desenvolvido é apresentado no trabalho intitulado, "ATP drives direct photosynthetic production of 1-butanol in cyanobacteria"(LAN; LIAO, 2012), em que o autor traz a ideia do uso de uma cianobactéria fotossintética na produção de butanol, na medida que há um consumo adicional de ATP, contrário ao que frequentemente é defendido por especialistas como sendo o mecanismo que melhor facilita a produção microbiana de produtos químicos. Demonstram ainda que a substituição de aldeído/álcool desidrogenase bifuncional por butiraldeído desidrogenase separada e álcool desidrogenase dependente de NADPH aumentou a produção de 1-butanol em 4 vezes.

Esses resultados demonstraram a importância das forças motrizes do ATP e do cofator(DUNCAN; SETATI; DIVOL, 2023; KU; LAN, 2018) como um princípio de design para alterar o fluxo metabólico. Esse artigo possui 251 citações, sendo publicada no ano de 2012 e ocupando a quinta posição dos artigos mais citados. O que também nos remete ao artigo que ocupa a sexta posição, "Photosynthetic production of ethanol from carbon dioxide in genetically engineered cyanobacteria"(GAO et al., 2012),ou seja, há um uso significativo de cianobactérias geneticamente modificadas/ engenhariadas para a produção de outros biocombustíveis além do hidrogénio verde sendo elas no caso o etanol e o butanol.

A partir da Figura 12, podemos observar que as palavras chaves que representam as matérias primas com maiores ocorrências coligadas com produção de hidrogénio fotossintético são: as microalgas, as cianobactérias e a biomassa. Sendo que as com maior ocorrência são os a seguir, a microalga *chlamydomonas reinhardtii*(TORRES-TIJI et al., 2022), *rhodobacter capsulatus*(DESEURE et al., 2021), *synechocystis sp pcc6803*(WANG et al., 2017) e *chlorophyll fluorescence*(BHAGOOI et al., 2021). Com respectivamente 10, 6, 6 e 8 ocorrências.

Figura 12 - Mapa de densidade de coocorrência de palavras-chave dos autores com um número mínimo de ocorrências de 10 palavras-chave, sendo selecionadas 44 palavras-chave.



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 12, temos também a nominalidade das técnicas de produção do hidrogênio verde e que representam uma maior ocorrência em relação a outros termos significativos a produção de hidrogênio verde, a eletro catálise, foto catálise, divisão da água e fotossíntese com respectivamente 1,13 %, 1,03%, 2,85% e 2,59 % de ocorrências.

5.3 Tópicos de pesquisas importantes

5.3.1 Análise quantitativa da frequência das palavras chaves

A análise da frequência de cada palavra chave usada nos trabalhos, referentes a base de dados estudada nos permitirá ter uma noção muito mais abrangente dos tópicos que são tratados como essenciais ao hidrogênio verde e a produção fotossintética de hidrogênio(DONTHU et al., 2021). A tabela 4 apresenta as 24 palavras chaves que possuem as maiores frequências a que ocupa o topo trata-se de hidrogênio verde (162), seguido por

hidrogénio (127) e produção de hidrogênio (80). Para a questão das técnicas e matérias primas mais citadas temos, eletrolise (43), divisão de água (43), reação de evolução de oxigênio (42), fotossíntese (39) e fechando o top 10 temos a cianobactéria (35). Logo é de se observar que a produção do hidrogénio verde é muito ligado a eletrolise com bastante preocupação na reação de evolução de oxigênio (SANCHEZ CASALONGUE et al., 2014), um determinante crítico da eficiência da separação da água impulsionada pela energia solar é o perfil cinético do catalisador de evolução do gás oxigênio (BEDIAKO; SURENDRANATH; NOCERA, 2013).

A Figura 13, ilustra o mapa de visualização de rede da coocorrência de palavras-chave, em que o número mínimo de ocorrências de cada palavra-chave é 5, foram apresentados um total de 3481 palavras-chave, das quais 118 estão dentro do limite proposto, ou seja, possuem 5 ocorrências ou mais. A referida Figura 13, nos traz três linhas distintas, porém correlacionadas no quesito produção de hidrogénio. Primeiramente o cluster representado a vermelho mostra uma forte correlação entre fotossíntese, microalgas, cianobactérias, celulose e biomassas com a produção de hidrogénio, cluster representado como central. Seguidamente os clusters representados em laranja, lilás e castanho apresentam aspectos sociopolíticos da implementação do hidrogénio verde, nomeadamente, a descarbonização, as mudanças climáticas, o desenvolvimento sustentável, a estratégia do hidrogénio, a transição energética, entre outros (JOVAN; DOLANC, 2020). Por último mais não menos importante, temos representados no cluster verde aspectos ligados a produção de hidrogênio verde por técnicas já bastantes difundidas, como é o caso da eletrolise, que é o termo que se mostra mais próximo da produção de hidrogénio, bem como a energia eólica e a fotovoltaica. O tópico que interliga as três linhas gerais do estudo da produção de hidrogénio verde é a simulação dos processos, representado pelo cluster amarelo.

Tabela 4 - As 24 principais palavras-chave e suas frequências nos trabalhos consultados sobre a produção de hidrogênio verde fotossintético.

Posição	Palavra chave	Frequência	TLS	Posição	Palavra chave	Frequência	TLS
1	green hydrogen	162	247	13	hydrogen economy	23	38
2	Hydrogen	127	206	14	energy transition	21	53

3	hydrogen production	80	120	15	decarbonization	20	43
4	renewable energy	60	117	16	energy storage	20	45
5	electrolysis	43	92	17	hydrogen storage	18	35
6	water splitting	43	65	18	metabolic engineering	18	23
7	oxygen evolution reaction	42	52	19	electrocatalyst	17	24
8	photosynthesis	39	46	20	microalgae	17	12
9	water electrolysis	39	62	21	sustainability	17	38
10	cyanobacteria	35	46	22	fuel cell	16	32
11	hydrogen evolution reaction	31	38	23	green hydrogen production	16	17
12	photosynthetic bacteria	29	15	24	photocatalysis	16	19

Fonte: Autor (2022).

5.4.1 Campos de pesquisa

O cluster #0 tem “case study”, como a palavra chave principal. Estudo de caso é entendido como um trabalho realizado infligindo estudos a um fenômeno específico (ZITZLER; THIELE, 1999). O trabalho desenvolvido por Bellotti (BELLOTTI; RIVAROLO; MAGISTRI, 2022), traz um estudo entre a produção de hidrogênio verde através da eletrolise e sua conversão em combustíveis alternativos como metano, metanol e amônia, processo comumente chamado de Power-to-Fuel. Aspectos econômicos e técnicos são trabalhados no artigo, onde calcula-se a eficiência global do processo, a capacidade de armazenamento, os custos anuais e o custo de produção dos diferentes combustíveis para um cenário de referência. Na mesma linha o trabalho de Frankowska (FRANKOWSKA et al., 2022), apresenta um conjunto de suposições conceituais do modelo estrutural de estabilização da rede elétrica no sistema de cadeia de fornecimento de hidrogênio verde. O terceiro artigo do referido cluster “Charging station stochastic programming for hydrogen/battery electric buses using multi-criteria crow search algorithm.” (PANAH et al., 2021), desenvolvido por Panah, traz uma abordagem sobre os postos de carregamento multiprodutos nos terminais de ônibus selecionados para reabastecimento de hidrogênio e eletricidade. Em que são utilizados métodos de simulação e amostragem como o Analytic Hierarchy Process e a Criteria Importance through Inter-criteria Correlation, estimando assim valores de lucros estimados em função das variáveis introduzidas no algoritmo.

O cluster #1 tem “oxygen evolution reaction”, como a palavra chave principal. O artigo de maior influência nesse cluster foi desenvolvido por Liu (LIU et al., 2022), em que o mesmo a partir do problema das aplicações em larga escala da eletrólise da água dificultados pelos altos sobre potenciais e cinética de reação inferior no ânodo, é desenvolvido um método hidrotérmico fácil de uma etapa aplicado ao crescimento *in situ* do eletro catalisador Ni₃S₂ co-dopado com Fe e V em substrato de espuma de níquel (Fe, V-Ni₃S₂/NF), levando assim ao aumento das atividades de reação de evolução de oxigênio, atividade diretamente ligada a produção de hidrogênio verde. Em seguida o artigo de Lin (LIN et al., 2022), apresenta o desenvolvimento de um eletrolisador de separação da água do mar real. O eletro catalisador otimizado demonstra um excelente bifuncionalidade com uma baixa tensão de retorno. Em terceiro lugar o temos o artigo que o autor busca solucionar o problema de as fontes energéticas sofrerem por vezes cortes, ocasionando na queda da vida útil dos eletrizadores,

então um novo eletrodo de reação de evolução de hidrogênio com arranjos hierárquicos de micro rode encapsulados por camada de carbono ultrafina dopada com nitrogênio e crescido no local em espuma de níquel foi relatado.(ZHANG et al., 2022)

Tabela 5 - Os oito principais clusters de cocitação em matérias-primas para pesquisa de produção de hidrogênio verde com base na análise do Citespace.

CID	Rótulo	NS	Anos	Cinco termos principais	Artigos representativos
#0	case study	130	2021	case study; hydrogen production; green hydrogen; green hydrogen production; techno-economic analysis	(BELLOTTI, D 2022) and (FRANKOWSKA, M 2022)
#1	oxygen evolution reaction	120	2020	oxygen evolution reaction; green hydrogen production; hydrogen evolution reaction; recent advance; overall water splitting	(LIU, L 2022) and LIN, S 2022)
#2	hydrogen production	100	2013	photosynthetic bacteria; photosynthetic bacteria wastewater treatment; pigments production; case study; biodiesel production	(FRADINHO, J 2013) and (FRADINHO, J 2013)
#3	photosynthetic capacity	72	2015	photosynthetic capacity; biomass production; photosynthetic production; photosynthetic efficiency; essential oil production	(PIRASTRU, L 2012) and (WANG, B 2013)
#4	photosynthetic production	46	2014	photosynthetic production; metabolic engineering; photosynthetic isoprene production; enhancing photosynthetic production; photosynthetic condition overexpression	(LAN, E 2016) and WANG, X 2015)
#5	nitrogen fertilization	29	2014	nitrogen fertilization; labisia pumila benth; high co2; photosynthetic rate; total non-structural carbohydrate fossil fuel;	BANG YOU, Zheng, 2011) and (IBRAHIM, M 2011)
#6	supercritical water electrolysis	24	2012	photosynthetic microbial mat; hydrogen production; hot spring; microbial mat; filamentous anoxygenic photosynthetic bacterium kinetic analysis;	BUROW, LC, 2012) and OTAKI, H ,2012)
#7	light olefin	13	2021	light olefin; catalyst deactivation; recent advance; understanding degradation effect; elevated temperature operating condition green hydrogen production;	(WEBER, D 2021) and (GARBE, S 2021)

Fonte: Autor (2022).

5.4.2 Tendências emergentes

O cluster #2 possui a palavra-chave central emergente “hydrogen production”, como tópico de maior importância, ou seja, na base de dados analisada o termo produção de hidrogênio é o que possui a maior tendência emergente. O autor Fradinho, possui no ano de 2013, a publicação de dois artigos que ocupam a primeira e a segunda posição em termos de importância nos tópicos emergentes. Sendo o primeiro um artigo em que se realiza um experimento de investigação da capacidade de uma cultura fotossintética mista composta por um consórcio de bactérias e algas tem de acumular polihidroxicarboxilatos (FRADINHO et al., 2013). O segundo trabalho realiza um estudo da possibilidade de operar um polihidroxicarboxilato viável produzindo cultura mista fotossintética sob períodos claro/escuro sem aeração (FRADINHO; OEHMEN; REIS, 2013). O terceiro artigo nesse rank foi o desenvolvido por Zhang, no ano de 2010, em que o mesmo faz uma análise do desempenho de um fotobiorreator tipo groove para produção de hidrogênio por bactérias fotossintéticas imobilizadas. Em que como resultado provou-se que a técnica de biofilme é um método eficaz de imobilização de células para a biodegradação de águas residuais, mas tem uso restrito no campo da produção fotobiológica de H_2 (ZHANG et al., 2010).

O cluster #3 possui como palavra-chave central emergente “photosynthetic capacity”. O trabalho desenvolvido por Pirastru, em 2010 traz um estudo da alteração das funções fotossintéticas e produção de carotenoides na microalga verde *Scenedesmus sp.*, quando as culturas de algas são expostas a condições que incluem conteúdo limitado de nitrogênio com a adição de acetato de sódio (PIRASTRU et al., 2012). A segunda posição é ocupada pelo trabalho de Wang, publicada em 2013, em que o autor visou construir e otimizar por vias metabólicas de síntese a cianobactéria *Synechocystis sp. PCC 6803* para produzir fotos sinteticamente, 3-hidroxiacetato diretamente do CO_2 (WANG et al., 2013). Um outro artigo que possui também muita importância é o desenvolvido por Ibrahim, em 2013 e que trata das alterações induzidas pelo ácido abscísico (hormônio vegetal) na Produção de metabólitos primários e secundários, aspectos como a Capacidade fotossintética, capacidade antioxidante, enzimas antioxidantes e atividade inibitória da lipoxigenase de *Orthosiphon stamineus* benth, são experimentados e avaliados (IBRAHIM; JAAFAR, 2013).

O cluster #4 possui como palavra-chave central emergente “photosynthetic production”, aonde são estudados temas ligados a produção fotossintética dos mais variados produtos e suas implicações no processo. O trabalho de maior relevância nesse tópico é do autor Lan, desenvolvido no ano de 2016 em o mesmo busca, através da cianobactéria *Synechococcus elongatus PCC 7942* produzir succinato fotos sinteticamente, succinato é um importante substancia para a indústria química, uma vez que a mesma se trata de um remédio muito importante para o tratamento da hipertensão arterial(LAN; WEI, 2016). O artigo de Wang, em que o autor avalia a produção de hidrocarbonetos terpênicos fotossintéticos para combustíveis e produtos químicos. A produção de hidrocarbonetos fotossintéticos contorna o processo tradicional de hidrólise de biomassa e representa a conversão mais direta da energia solar em biocombustíveis de próxima geração(WANG; ORT; YUAN, 2015). O artigo localizado na terceira posição do grau de importância foi publicado por Carbonell, sendo o mesmo o mais recentemente publicado, em 2019. Em que o autor aborda temas relacionados a ao uso da cianobactéria *Synechococcus* como alvo de engenharia e produtor de etileno, o etileno é um alceno volátil utilizado em larga escala comercial como precursor na indústria de plásticos, sendo atualmente derivado do refino do petróleo (CARBONELL et al., 2019) .

O cluster #5 possui como palavra-chave central emergente “nitrogen fertilization”, nesse cluster são apresentados os desempenhos fotossintéticos de algumas matérias-primas, consoante a mudança do clima. O artigo trabalhado por BangYou, nos apresenta uma avaliação da influência do escurecimento global na produção fotossintética de arroz com base em modelagem tridimensional, em que os resultados indicam que o potencial de produção fotossintética do arroz aumenta significativamente em resposta a um aumento na fração difusa, desde que a radiação global não diminua muito(ZHENG et al., 2011). Outro trabalho desenvolvido por Ibrahim, relaciona a produção de fenólicos e flavonoides com carboidratos não estruturais totais e taxa fotossintética em *Labisia pumila Benth*, sob alta taxa de fertilização de CO_2 e nitrogênio, em que o autor realiza a projeção de experimento fatorial para examinar e caracterizar a relação entre a produção de metabólitos secundários, compostos orgânicos que não estão diretamente envolvidos nos processos de crescimento, com o desenvolvimento e a reprodução dos organismos, conteúdo de carboidratos e fotossíntese de três variedades da erva medicinal malaia *Labisia pumila benth* a

(alata , pumila e lanceolata) , enriquecidas com CO_2 e combinadas com quatro níveis de adubação azotada (IBRAHIM et al., 2010). Na terceira posição no referido cluster temos o artigo trabalho por Saggiomo, em que o mesmo analisa um estudo de caso dos processos primários de produção e desempenho fotossintético de um ecossistema periantártico único, no estreito de Magalhães. (SAGGIOMO et al., 2011)

O cluster #6 possui como palavra-chave central emergente “supercritical water electrolysis”, em que os trabalhos correlacionam processos de produção de hidrogênio verde e suas respectivas matérias primas, bem como o quantitativo do combustível produzido em função do tempo de duração de cada processo. O artigo de maior importância é o desenvolvido por Burow, o referido autor traz estudos biogeoquímicos e moleculares combinados de tapetes microbianos coletados na Califórnia, e suas implicações na produção de hidrogênio (BUROW et al., 2012). Em seguida temos o artigo de Otaki, onde o mesmo propõe e analisa produção e consumo de hidrogênio em esteiras microbianas de águas termais dominadas por uma bactéria fotossintética não oxigênica filamentosa a *Fervidobacterium* sp (OTAKI et al., 2012). Fechando o top três dos mais importantes trabalhos emergentes, o Kashiwaya, realiza uma análise cinética da reação de decomposição da injeção de CH_4 na escória fundida, a utilização do calor da escória é uma tecnologia chave para a redução da emissão de CO_2 nas indústrias siderúrgicas. No estudo, o gás metano foi injetado em uma escória fundida e o hidrogênio foi produzido através da reação de decomposição térmica. utilizando as constantes de velocidade obtidas o autor conseguiu estipular o aumento da área da superfície de reação durante a injeção de metano. Então verificou-se que a imersão lenta da lança de injeção poderia ser utilizada para o calor da escória fundida. Além disso, a forma da escória pode ser do tipo pó através da injeção de metano (KASHIWAYA; WATANABE, 2012).

O cluster #7 possui como palavra-chave central emergente “light olefin”. Olefina ou alcenos como são conhecidos, eles são os hidrocarbonetos alifáticos insaturados, isto é, que apresentam uma ligação covalente duplo carbono/carbono entre seus átomos de carbono. Comumente usados na indústria de polímeros, na produção de plásticos, garrafas, recipientes, entre outros (OKABE; NOMURA, 2023). Weber, publicou o artigo de maior força no cluster, em que ele realiza análise a conversão catalítica de CO_2 em produtos químicos e

combustíveis de valor agregado, considerando uma abordagem promissora para a mitigação das emissões de CO_2 se o hidrogênio verde for usado, uma vez que hoje a maior parte dos polímeros e plásticos usam combustíveis fósseis como matéria prima (WEBER et al., 2021). Outro artigo representativo no cluster (GARBE et al., 2021), apresenta uma célula eletrolisadora de eletrólito de água de polímero alimentada com água líquida operada a uma temperatura de célula de 100 °C em comparação com uma célula de última geração operada a uma temperatura de 60 °C durante um período de corrente constante de 300 horas. O mesmo obteve uma eficiência de conversão de hidrogênio aumenta em até 5% em temperatura elevada o que tornou o hidrogênio verde mais barato, com a ressalva que, a temperatura é um fator de estresse que acelera as causas de degradação na célula. Já o autor Zang, em seu artigo (ZHANG et al., 2021), relata primeiramente que a conversão direta de dióxido de carbono usando hidrogênio verde é uma abordagem sustentável para a produção de combustível de aviação. No entanto, alcançar um alto nível de desempenho continua sendo um grande desafio devido à inércia do dióxido de carbono e sua baixa atividade para a subsequente formação de ligações duplas carbono/ carbono. No artigo o autor preparou um catalisador de liga de CoFe modificado por Sódio usando precursores de hidróxido duplo em camadas que transformam diretamente o CO_2 em um combustível de aviação composto de hidrocarbonetos $C_8 - H_{16}$ de combustível de aviação com seletividade muito alta. Respectivamente, uma seletividade de 63,5% com 10,2% de conversão de CO_2 e uma seletividade combinada baixa de menos de 22% para CO e CH_4 indesejados.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou fazer um levantamento, através dessa análise bibliométrica avançada dos principais países, organizações, autores e tópicos emergentes que estão ou serão de muita influência nos estudos futuros, ligados a produção fotossintética de hidrogênio verde. Em que de um total de 1507 trabalhos no período analisado de janeiro de 2010 a setembro de 2022, onde pudemos concluir que:

- Há uma enorme inclinação para o estudo de processos biológicos de produção do hidrogênio, em especial o fotossintético tendo em conta que no primeiro ano do período analisado possuía-se cerca de apenas 2 trabalhos no tema já no último ano

do período analisado as publicações chegam a ser de 230. A maior parte dos trabalhos foi desenvolvida pela República Popular da China, 352 publicações, Estados Unidos da América com 143 publicações e Alemanha com 118 publicações. O tema possui uma boa parte dos trabalhos com coautorias internacionais em vários continentes, a China tem várias coautorias com outros países mais especificamente o caso dos Estados Unidos da América, da Austrália, do Japão e da Inglaterra. Assim como esses países possuem bastante coparticipação entre si de trabalhos publicados.

- As análises mostram que a técnica produção de hidrogénio verde mais consolidada em estudos e menções está mais atrelada ao processo de eletrolise da água, seguindo depois para estudos da produção do hidrogénio verde fotossintético. Sendo então as matérias primas mais utilizadas a água e a biomassa, com as cianobactérias e microalgas sendo as biomassas apontadas como emergentes segundo as análises do citespace. Trabalhos apontam também para o uso de cianobactérias e outras biomassas para a produção de outros biocombustíveis, como o bioetanol, biobutanol e o biodiesel.
- As pesquisas mostram uma tendência de acoplamento de tópicos como transição energética, descarbonização, fontes renováveis de energias, energia solar, energia eólica, armazenamento e células a combustível à produção de hidrogénio verde.
- As análises apontam para alguns mercados já existentes para o uso do hidrogénio verde e que demonstram um futuro promissor, nomeadamente o mercado da mobilidade, mercado dos polímeros, e o mercado de fertilizantes. Na parte de mobilidade deve-se esse ponto de aumento ao crescente aumento na produção de veículos elétricos ou híbridos que possam usar a como fonte combustível o hidrogénio sustentável, já na parte de polímeros muito se pensa em fechar o ciclo de vida do carbono, adicionando ao mesmo substâncias limpas, como é o caso do hidrogénio verde, para que possamos transformar o mesmo em polímeros (PVC, PET, etc.), por fim na parte de fertilizantes encontramos alguns estudos que demonstra o interesse em produzir o hidrogénio e convertê-la posteriormente em amónia, para uso como fertilizante.

Após os tópicos concluídos vale ressaltar que podem ainda existir muitos trabalhos pertinentes sobre o tema que possam não ter sido trazidos, dado aos filtros estipulados para as pesquisas da língua, dos anos e dos tipos de documentos. No entanto sem dúvida a forma de produção do hidrogénio verde mais concretizada é através da eletrolise da água em células combustíveis, pelo facto de os outros métodos sustentáveis de produção de hidrogénio ainda possuírem muita pouca eficiência de conversão e o tempo de conversão ser um determinante. No entanto muito tem se estudado para diminuir o custo e o tempo de produção de técnicas como o hidrogénio verde fotossintético.

7. REFERÊNCIAS

ABOAL, M. et al. Photoautotrophs and macroinvertebrate trophic relations in calcareous semiarid streams: The role of Cyanobacteria. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 156206, set. 2022.

AKOREDE, M. F.; HIZAM, H.; POURESMAEIL, E. Distributed energy resources and benefits to the environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 724–734, fev. 2010.

AKROUM-AMROUCHE, D.; AKROUM, H.; LOUNICI, H. Green hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides*. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, p. 1–19, 15 set. 2019.

AKUH, O.-A. et al. The ferredoxin redox system – an essential electron distributing hub in the apicoplast of Apicomplexa. **Trends in Parasitology**, v. 38, n. 10, p. 868–881, out. 2022.

ATILHAN, S. et al. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 31, p. 100668, mar. 2021.

BEDIAKO, D. K.; SURENDRANATH, Y.; NOCERA, D. G. Mechanistic Studies of the Oxygen Evolution Reaction Mediated by a Nickel–Borate Thin Film Electrocatalyst. **Journal of the American Chemical Society**, v. 135, n. 9, p. 3662–3674, 6 mar. 2013.

BELLOTTI, D.; RIVAROLO, M.; MAGISTRI, L. A comparative techno-economic and sensitivity analysis of Power-to-X processes from different energy sources. **Energy Conversion and Management**, v. 260, p. 115565, maio 2022.

BHAGOOLI, R. et al. Chlorophyll fluorescence – A tool to assess photosynthetic performance and stress photophysiology in symbiotic marine invertebrates and seaplants. **Marine Pollution Bulletin**, v. 165, p. 112059, abr. 2021.

BICHENG, D. et al. Evolution and hotspots of peer instruction: a visualized analysis using CiteSpace. **Education and Information Technologies**, 15 ago. 2022.

BUROW, L. C. et al. Hydrogen production in photosynthetic microbial mats in the Elkhorn Slough estuary, Monterey Bay. **The ISME Journal**, v. 6, n. 4, p. 863–874, 20 abr. 2012.

CAO, L. et al. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. **Environmental Research**, v. 186, p. 109547, jul. 2020.

CAPURSO, T. et al. **Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. Energy Conversion and Management** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2022.

CARBONELL, V. et al. Enhanced stable production of ethylene in photosynthetic cyanobacterium *Synechococcus elongatus* PCC 7942. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 35, n. 5, p. 77, 8 maio 2019.

DE SÁ, L. R. V.; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. **Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - Aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais Brasileiros. Química Nova**, 2014a.

DE SÁ, L. R. V.; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. **Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - Aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais Brasileiros. Química Nova**, 2014b.

DESEURE, J. et al. Reliable determination of the growth and hydrogen production parameters of the photosynthetic bacterium *Rhodobacter capsulatus* in fed batch culture using a combination of the Gompertz function and the Luedeking-Piret model. **Heliyon**, v. 7, n. 7, p. e07394, jul. 2021.

DONTHU, N. et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, set. 2021.

DUNCAN, J. D.; SETATI, M. E.; DIVOL, B. Redox cofactor metabolism in *Saccharomyces cerevisiae* and its impact on the production of alcoholic fermentation end-products. **Food Research International**, v. 163, p. 112276, jan. 2023.

FAST, A. G.; PAPOUTSAKIS, E. T. Stoichiometric and energetic analyses of non-photosynthetic CO₂-fixation pathways to support synthetic biology strategies for production

of fuels and chemicals. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 1, n. 4, p. 380–395, nov. 2012.

FAYE, O.; SZPUNAR, J.; EDUOK, U. **A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy**Elsevier Ltd, , 5 abr. 2022.

FONSECA, J. D. et al. Trends in design of distributed energy systems using hydrogen as energy vector: A systematic literature review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 19, p. 9486–9504, abr. 2019.

FRADINHO, J. C. et al. Polyhydroxyalkanoates production by a mixed photosynthetic consortium of bacteria and algae. **Bioresource Technology**, v. 132, p. 146–153, mar. 2013.

FRADINHO, J. C.; OEHMEN, A.; REIS, M. A. M. Effect of dark/light periods on the polyhydroxyalkanoate production of a photosynthetic mixed culture. **Bioresource Technology**, v. 148, p. 474–479, nov. 2013.

FRANKOWSKA, M. et al. Structural Model of Power Grid Stabilization in the Green Hydrogen Supply Chain System—Conceptual Assumptions. **Energies**, v. 15, n. 2, p. 664, 17 jan. 2022.

GAO, C. et al. A bibliometric analysis based review on wind power price. **Applied Energy**, v. 182, p. 602–612, nov. 2016.

GAO, Z. et al. Photosynthetic production of ethanol from carbon dioxide in genetically engineered cyanobacteria. **Energy Environ. Sci.**, v. 5, n. 12, p. 9857–9865, 2012.

GARBE, S. et al. Understanding Degradation Effects of Elevated Temperature Operating Conditions in Polymer Electrolyte Water Electrolyzers. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 168, n. 4, p. 044515, 1 abr. 2021.

GENG, Y. et al. **A bibliometric review: Energy consumption and greenhouse gas emissions in the residential sector. Journal of Cleaner Production**Elsevier Ltd, , 15 ago. 2017.

GHIRARDI, M. L. et al. Photobiological hydrogen-producing systems. **Chem. Soc. Rev.**, v. 38, n. 1, p. 52–61, 2009.

HAYWARD, T. M.; SVISHCHEV, I. M.; MAKHIJA, R. C. Stainless steel flow reactor for supercritical water oxidation: corrosion tests. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 27, n. 3, p. 275–281, dez. 2003.

IBRAHIM, M. H. et al. The Relationship between Phenolics and Flavonoids Production with Total Non Structural Carbohydrate and Photosynthetic Rate in *Labisia pumila* Benth. under High CO₂ and Nitrogen Fertilization. **Molecules**, v. 16, n. 1, p. 162–174, 29 dez. 2010.

IBRAHIM, M.; JAAFAR, H. Abscisic Acid Induced Changes in Production of Primary and Secondary Metabolites, Photosynthetic Capacity, Antioxidant Capability, Antioxidant Enzymes and Lipoxygenase Inhibitory Activity of *Orthosiphon stamineus* Benth. **Molecules**, v. 18, n. 7, p. 7957–7976, 5 jul. 2013.

IQBAL, N. et al. Does exports diversification and environmental innovation achieve carbon neutrality target of OECD economies? **Journal of Environmental Management**, v. 291, p. 112648, ago. 2021.

JACQUET, J.; JAMIESON, D. Soft but significant power in the Paris Agreement. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 7, p. 643–646, 23 jul. 2016.

JOVAN, D. J.; DOLANC, G. Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions. **Energies**, v. 13, n. 24, p. 6599, 14 dez. 2020.

KAKOULAKI, G. et al. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. **Energy Conversion and Management**, v. 228, p. 113649, jan. 2021.

KASHIWAYA, Y.; WATANABE, M. Kinetic Analysis of the Decomposition Reaction of CH₄ Injecting into Molten Slag. **ISIJ International**, v. 52, n. 8, p. 1394–1403, 2012.

KHOJASTEH SALKUYEH, Y.; SAVILLE, B. A.; MACLEAN, H. L. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and

emerging technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 30, p. 18894–18909, jul. 2017.

KIM, J. H. et al. Toward practical solar hydrogen production – an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge. **Chemical Society Reviews**, v. 48, n. 7, p. 1908–1971, 2019a.

KIM, J. H. et al. Toward practical solar hydrogen production – an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge. **Chemical Society Reviews**, v. 48, n. 7, p. 1908–1971, 2019b.

KU, J. T.; LAN, E. I. A balanced ATP driving force module for enhancing photosynthetic biosynthesis of 3-hydroxybutyrate from CO₂. **Metabolic Engineering**, v. 46, p. 35–42, mar. 2018.

LAN, E. I.; LIAO, J. C. ATP drives direct photosynthetic production of 1-butanol in cyanobacteria. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 16, p. 6018–6023, 17 abr. 2012.

LAN, E. I.; WEI, C. T. Metabolic engineering of cyanobacteria for the photosynthetic production of succinate. **Metabolic Engineering**, v. 38, p. 483–493, nov. 2016.

LI, R. Latest progress in hydrogen production from solar water splitting via photocatalysis, photoelectrochemical, and photovoltaic-photoelectrochemical solutions. **Chinese Journal of Catalysis**, v. 38, n. 1, p. 5–12, jan. 2017.

LI, Y. et al. Photosynthetic carbon partitioning and lipid production in the oleaginous microalga *Pseudochlorococcum* sp. (Chlorophyceae) under nitrogen-limited conditions. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 123–129, jan. 2011.

LIN, S. et al. Higher Water-Splitting Performance of Boron-Based Porous CoMnB Electrocatalyst over the Benchmarks at High Current in 1 M KOH and Real Sea Water. **Advanced Sustainable Systems**, v. 6, n. 9, p. 2200213, 30 set. 2022.

LINDBERG, P.; PARK, S.; MELIS, A. Engineering a platform for photosynthetic isoprene production in cyanobacteria, using *Synechocystis* as the model organism. **Metabolic Engineering**, v. 12, n. 1, p. 70–79, jan. 2010.

LIU, L. et al. In situ growth Fe and V co-doped Ni₃S₂ for efficient oxygen evolution reaction at large current densities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 32, p. 14422–14431, abr. 2022.

MALONE, L. A. et al. Cytochrome b₆f – Orchestrator of photosynthetic electron transfer. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1862, n. 5, p. 148380, maio 2021.

MAO, G. et al. Past, current and future of biomass energy research: A bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1823–1833, dez. 2015.

MILLER, H. A. et al. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 4, n. 5, p. 2114–2133, 2020.

MULKIDJANIAN, A. Y. Proton translocation by the cytochrome bc₁ complexes of phototrophic bacteria: introducing the activated Q-cycle. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 6, n. 1, p. 19–34, 1 jan. 2007.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 597–611, jan. 2017.

OKABE, M.; NOMURA, K. Propylene/Cyclic Olefin Copolymers with Cyclopentene, Cyclohexene, Cyclooctene, Tricyclo[6.2.1.0(2,7)]undeca-4-ene, and Tetracyclododecene: The Synthesis and Effect of Cyclic Structure on Thermal Properties. **Macromolecules**, v. 56, n. 1, p. 81–91, 10 jan. 2023.

OLIVEIRA, B. G. **O estado da arte da ligação de hidrogênio**. **Quimica Nova** Sociedade Brasileira de Quimica, , 1 dez. 2015.

OTAKI, H. et al. Production and Consumption of Hydrogen in Hot Spring Microbial Mats Dominated by a Filamentous Anoxygenic Photosynthetic Bacterium. **Microbes and Environments**, v. 27, n. 3, p. 293–299, 2012.

OVERLAND, J. et al. The urgency of Arctic change. **Polar Science**, v. 21, p. 6–13, set. 2019.

PANAH, P. G. et al. Charging station Stochastic Programming for Hydrogen/Battery Electric Buses using Multi-Criteria Crow Search Algorithm. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 111046, jul. 2021.

PIRASTRU, L. et al. Carotenoid production and change of photosynthetic functions in *Scenedesmus* sp. exposed to nitrogen limitation and acetate treatment. **Journal of Applied Phycology**, v. 24, n. 1, p. 117–124, 29 jan. 2012.

RAKHIMBERDIEVA, M. G. et al. Phycobilin/chlorophyll excitation equilibration upon carotenoid-induced non-photochemical fluorescence quenching in phycobilisomes of the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1767, n. 6, p. 757–765, jun. 2007.

RAN, J. et al. Metal-Free 2D/2D Phosphorene/g-C₃N₄ Van der Waals Heterojunction for Highly Enhanced Visible-Light Photocatalytic H₂ Production. **Advanced Materials**, v. 30, n. 25, p. 1800128, 30 jun. 2018.

RANJBARI, M. et al. Two decades of research on waste management in the circular economy: Insights from bibliometric, text mining, and content analyses. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 128009, set. 2021.

RANJBARI, M. et al. Biomass and organic waste potentials towards implementing circular bioeconomy platforms: A systematic bibliometric analysis. **Fuel**, v. 318, p. 123585, jun. 2022.

REDDING, K. E. et al. **Advances and challenges in photosynthetic hydrogen production. Trends in Biotechnology** Elsevier Ltd, , 2022.

SAGGIOMO, V. et al. Primary production processes and photosynthetic performance of a unique periantarctic ecosystem: the Strait of Magellan. **Polar Biology**, v. 34, n. 9, p. 1255–1267, 6 set. 2011.

SALES, M. B. et al. The feedstocks for sustainability and challenges in biodiesel production: An advanced bibliometric analysis. 2022.

SANCHEZ CASALONGUE, H. G. et al. In Situ Observation of Surface Species on Iridium Oxide Nanoparticles during the Oxygen Evolution Reaction. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 53, n. 28, p. 7169–7172, 7 jul. 2014.

SHIVA KUMAR, S.; LIM, H. **An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production.** **Energy Reports**Elsevier Ltd, , 1 nov. 2022.

SIMKIN, A. J.; LÓPEZ-CALCAGNO, P. E.; RAINES, C. A. Feeding the world: improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 4, p. 1119–1140, 20 fev. 2019.

SVOBODA, V. et al. Quantification of energy-converting protein complexes in plant thylakoid membranes. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1864, n. 2, p. 148945, abr. 2023.

SZWALEC, M. et al. Unexpected spectral and redox properties of hemes b in cytochrome b6f and their potential consequences on the mechanism of plastoquinone reduction. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1863, p. 148837, set. 2022.

TORRES-TIJI, Y. et al. Optimized production of a bioactive human recombinant protein from the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* grown at high density in a fed-batch bioreactor. **Algal Research**, v. 66, p. 102786, jul. 2022.

VELAZQUEZ ABAD, A.; DODDS, P. E. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. **Energy Policy**, v. 138, p. 111300, mar. 2020.

VIDAS, L.; CASTRO, R. **Recent developments on hydrogen production technologies: State-of-the-art review with a focus on green-electrolysis.** **Applied Sciences (Switzerland)**MDPI, , 1 dez. 2021.

VIOLA, S. et al. In vivo electron donation from plastocyanin and cytochrome c to PSI in *Synechocystis* sp. PCC6803. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1862, n. 9, p. 148449, set. 2021.

VIRUVURU, V.; FRAGATA, M. Photochemical cooperativity in photosystem II. Characterization of oxygen evolution discontinuities in the light-response curves. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 10, n. 44, p. 6607, 2008.

WANG, B. et al. Engineering cyanobacteria for photosynthetic production of 3-hydroxybutyrate directly from CO₂. **Metabolic Engineering**, v. 16, p. 68–77, mar. 2013.

WANG, X. et al. Expression, purification and characterization of sll1981 protein from cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC6803. **Protein Expression and Purification**, v. 139, p. 21–28, nov. 2017.

WANG, X.; ORT, D. R.; YUAN, J. S. Photosynthetic terpene hydrocarbon production for fuels and chemicals. **Plant Biotechnology Journal**, v. 13, n. 2, p. 137–146, 28 fev. 2015.

WEBER, D. et al. Recent Advances in the Mitigation of the Catalyst Deactivation of CO₂ Hydrogenation to Light Olefins. **Catalysts**, v. 11, n. 12, p. 1447, 28 nov. 2021.

ZHANG, C. et al. Performance of a groove-type photobioreactor for hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 11, p. 5284–5292, jun. 2010.

ZHANG, H. et al. Bifunctional Heterostructured Transition Metal Phosphides for Efficient Electrochemical Water Splitting. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 34, p. 2003261, 29 ago. 2020.

ZHANG, L. et al. Direct conversion of CO₂ to a jet fuel over CoFe alloy catalysts. **The Innovation**, v. 2, n. 4, p. 100170, nov. 2021.

ZHANG, R. et al. Nitrogen doped carbon encapsulated hierarchical NiMoN as highly active and durable HER electrode for repeated ON/OFF water electrolysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 436, p. 134931, maio 2022.

ZHENG, B. et al. Assessment of the influence of global dimming on the photosynthetic production of rice based on three-dimensional modeling. **Science China Earth Sciences**, v. 54, n. 2, p. 290–297, 25 fev. 2011.

ZITZLER, E.; THIELE, L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 4, p. 257–271, 1999.