

Microrganismos que Geram Soluções: prospecção da eletrossíntese microbiana no combate ao CO₂

Microorganisms that Generate Solutions: technological prospection of microbial electrosynthesis in the fight against CO₂

Rafael da Silva Oliveira Holanda¹, Fabiane Caxico de Abreu Galdino¹

¹Universidade Federal de Alagoas, Maceio, AL, Brasil

Resumo

A eletrossíntese microbiana desponta como alternativa estratégica frente à crise climática ao viabilizar a captura de dióxido de carbono (CO₂) e sua conversão em compostos orgânicos por microrganismos eletrogênicos. Este estudo apresenta uma prospecção tecnológica do desenvolvimento da técnica entre 2010 e 2024, com ênfase no período pandêmico. Foram analisadas publicações científicas nas bases Scopus e ScienceDirect, bem como documentos de patentes nos repositórios WIPO, EPO, PI e Lens.org, utilizando os descritores “*microbial electrosynthesis*”, “*bioelectrochemical CO₂ reduction*”, “*microbial CO₂ reduction*” e “*microbial CO₂ conversion*”. Embora o caráter prospectivo não permita exaustividade, o recorte metodológico possibilitou identificar tendências consolidadas e lacunas investigativas. Os resultados evidenciam o fortalecimento da eletrossíntese como tecnologia relevante para a bioeconomia, neutralização de carbono e valorização de resíduos orgânicos, destacando seu potencial inovador em processos industriais e educacionais e a necessidade de investimentos interdisciplinares articulados a políticas públicas.

Palavras-chave: Eletrossíntese Microbiana; Sequestro de Carbono; Inovação Sustentável.

Áreas Tecnológicas: Biotecnologia Ambiental. Energias Renováveis e Tecnologias Limpas. Tecnologias para a Bioeconomia e Economia Circular.

Abstract

Microbial electrosynthesis emerges as a strategic alternative in response to the climate crisis, enabling the capture of carbon dioxide (CO₂) and its conversion into value-added organic compounds through the metabolic activity of electrogenic microorganisms. This study presents a technological prospecting of the development of this technique between 2010 and 2024, with particular emphasis on the pandemic period. Scientific publications indexed in Scopus and ScienceDirect were analyzed, as well as patent documents retrieved from WIPO, EPO, PI, and Lens.org databases, using the descriptors “*microbial electrosynthesis*,” “*bioelectrochemical CO₂ reduction*,” “*microbial CO₂ reduction*,” and “*microbial CO₂ conversion*.” Although the prospective approach does not allow exhaustive coverage, the adopted methodological framework enabled the identification of consistent trends and relevant research gaps. The findings highlight the consolidation of microbial electrosynthesis as a key technology for the bioeconomy, carbon neutralization, and organic waste valorization, underscoring its innovative potential in industrial and educational applications and the need for interdisciplinary investment aligned with public policies.

Keywords: Microbial Electrosynthesis; Carbon Sequestration; Sustainable Innovation.



1 Introdução

O agravamento das mudanças climáticas representa um dos maiores desafios ambientais contemporâneos, exigindo ações coordenadas em escala global. No Brasil, observa-se uma tendência preocupante: enquanto as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) diminuíram cerca de 7% em 2020 devido à pandemia de Covid-19, as emissões brasileiras aumentaram 9,5% no mesmo período, impulsionadas principalmente pelo desmatamento na Amazônia (OC, 2021). Em 2021, o país emitiu 2,42 bilhões de toneladas brutas de CO₂ equivalente, o maior valor dos últimos 19 anos (Instituto Clima e Sociedade, 2022).

Diante desse cenário, torna-se imperativo o desenvolvimento e a implementação de tecnologias inovadoras para mitigar as emissões de CO₂. Entre as abordagens emergentes, destaca-se a eletrossíntese microbiana, que utiliza microrganismos eletrogênicos para converter CO₂ em compostos orgânicos de valor agregado, como biocombustíveis e biopolímeros. Essa tecnologia não apenas contribui para a redução das emissões, mas também promove a valorização de resíduos orgânicos, alinhando-se aos princípios da economia circular (Zhang *et al.*, 2022; Nevin *et al.*, 2011).

A efetiva implementação de soluções sustentáveis depende da cooperação entre universidades, empresas e governo, em consonância com os novos arranjos colaborativos propostos no modelo *Triple Helix Twins*, que integra inovação e desenvolvimento sustentável de forma sinérgica (Zhou; Etkowitz, 2021). Evidências recentes confirmam que essa interação fortalece a inovação ambiental no setor produtivo, acelerando a transição para práticas mais responsáveis e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Murillo-Luna; Hernández-Trasobares, 2023).

Nas últimas décadas, o mundo tem assistido a um avanço expressivo de inovações tecnológicas voltadas para a sustentabilidade, especialmente em áreas como biotecnologia, nanotecnologia, inteligência artificial e fontes renováveis de energia. Entre essas inovações, ganham destaque as estratégias para captura e aproveitamento do dióxido de carbono, como a biofixação algal, o uso de reatores microbianos e o desenvolvimento de materiais catalíticos aplicados à conversão de CO₂. Essas alternativas vêm sendo testadas em diferentes países, ainda em escala-piloto, mas com resultados que sinalizam grande potencial de aplicação (Behera *et al.*, 2022; Yau; Hayes; Kalathil, 2022). Dentro desse panorama, a eletrossíntese microbiana se apresenta como uma tecnologia emergente e promissora. Ao utilizar resíduos agrícolas como substrato e microrganismos eletrogênicos como agentes de conversão, ela alia produção energética à mitigação ambiental, dialogando diretamente com os princípios da bioeconomia e da economia circular.

Em um cenário global cada vez mais dinâmico e competitivo, entender para onde caminham as inovações tornou-se indispensável. É nesse contexto que a **prospecção tecnológica** ganha força como uma ferramenta estratégica, permitindo não apenas antecipar tendências, mas também reconhecer gargalos e oportunidades em tempo hábil. Ao acompanhar o desenvolvimento de tecnologias emergentes e suas possíveis aplicações, a prospecção contribui para decisões mais assertivas tanto na formulação de políticas públicas quanto na gestão de investimentos em ciência e inovação (Kumaravel *et al.*, 2020). Este estudo propõe uma análise prospectiva da eletrossíntese microbiana, buscando compreender seus caminhos de consolidação, as barreiras que ainda precisam ser superadas e as conexões necessárias entre universidade, setor produtivo e governo para que essa tecnologia avance como aliada no enfrentamento das mudanças climáticas.

Nesse contexto, o presente estudo pretende explorar o potencial da eletrossíntese microbiana como ferramenta para o sequestro de CO₂, analisando suas aplicações sustentáveis e destacando a importância da cooperação entre os setores acadêmico, industrial e governamental para enfrentar os desafios das mudanças climáticas.

2 Fundamentação Teórica

A eletrossíntese microbiana tem ganhado destaque como uma tecnologia promissora no campo da bioeletroquímica, sobretudo pelo seu potencial em associar a mitigação de gases de efeito estufa à valorização de resíduos. Nesse processo, microrganismos eletroativos utilizam elétrons provenientes de eletrodos para fixar dióxido de carbono (CO₂) e convertê-lo em compostos orgânicos de interesse industrial. Pesquisas recentes apontam resultados expressivos, como a produção eficiente de carboxilatos de cadeia C₂ a C₆ em sistemas do tipo *flow-through*, com elevadas taxas de conversão e seletividade (Li *et al.*, 2024). Além disso, revisões atuais ressaltam avanços no entendimento das rotas metabólicas envolvidas e da transferência de elétrons em sistemas bioeletroquímicos, o que amplia as perspectivas de aplicação em larga escala (Chen *et al.*, 2023). Também se destacam progressos no desenvolvimento de cátodos à base de carbono, capazes de elevar os rendimentos de acetato e de atingir eficiências faradaicas próximas de 100%, consolidando a eletrossíntese como alternativa viável e sustentável para a captura e o aproveitamento do carbono (Zhang *et al.*, 2022).

Entre as espécies mais investigadas, estão as representantes dos gêneros *Geobacter* e *Shewanella*. Esses organismos apresentam adaptações estruturais, como proteínas do tipo citocromo c e extensões filamentosas chamadas de nanofios condutores, que facilitam a

transferência de elétrons para o meio externo (Das; Singh; Kumar, 2019). Essa capacidade é fundamental para o funcionamento das células bioeletroquímicas, já que tais microrganismos aderem aos eletrodos formando biofilmes e catalisam reações redutoras que resultam na formação de produtos como ácidos graxos voláteis, etanol ou materiais biopoliméricos (Zhang *et al.*, 2012; Kumaravel *et al.*, 2020).

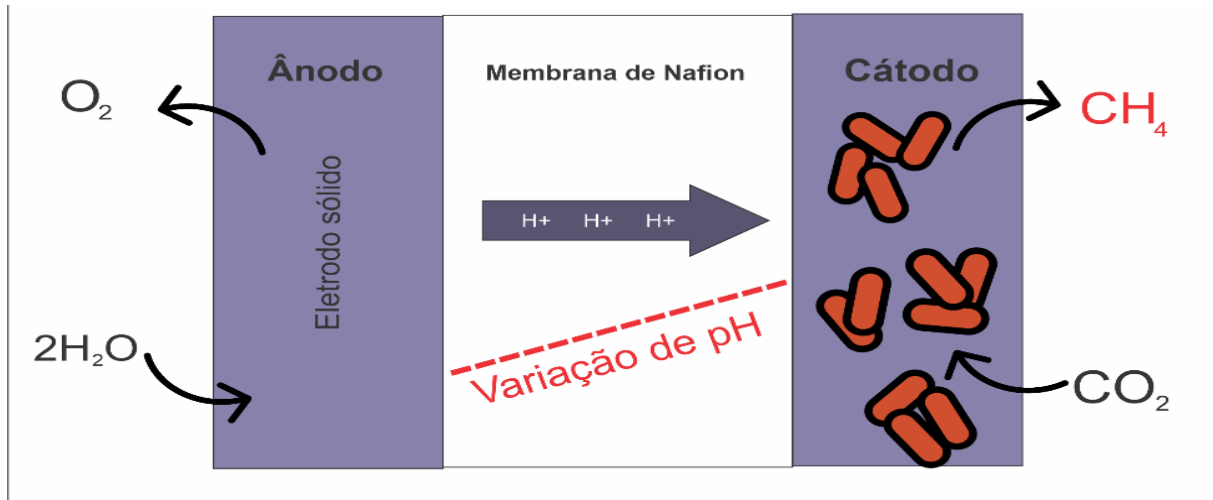
O avanço da eletrossíntese microbiana está alinhado aos objetivos da transição energética e da economia circular, promovendo o aproveitamento de resíduos orgânicos e industriais em processos de alto valor agregado. Esse tipo de inovação representa uma alternativa viável para reduzir a emissão de CO₂ ao mesmo tempo que se fomenta a produção de recursos renováveis. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do funcionamento de um sistema de eletrossíntese microbiana.

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado de um sistema de eletrossíntese microbiana (MES), estruturado com duas câmaras separadas por uma membrana de troca de prótons (PEM). No compartimento do ânodo, sem microrganismos, ocorre a oxidação da água, resultando na liberação de oxigênio molecular, prótons e elétrons. Esses elétrons são conduzidos externamente até o cátodo, enquanto os prótons atravessam a membrana seletiva, provocando um gradiente de pH entre as duas regiões (Rabaey; Rozendal, 2010; Das; Singh; Kumar, 2019). Já na

câmara catódica, os microrganismos eletroativos utilizam os elétrons e prótons disponíveis para reduzir dióxido de carbono (CO₂), originando compostos como metano (CH₄) ou ácidos graxos de cadeia curta. A reação pode ocorrer por meio da transferência direta de elétrons ou via hidrogênio molecular como intermediário (Bian *et al.*, 2020). Trata-se de um processo que se inspira na fotossíntese natural, com a vantagem de ser viável sob estímulo elétrico proveniente de fontes limpas e renováveis.

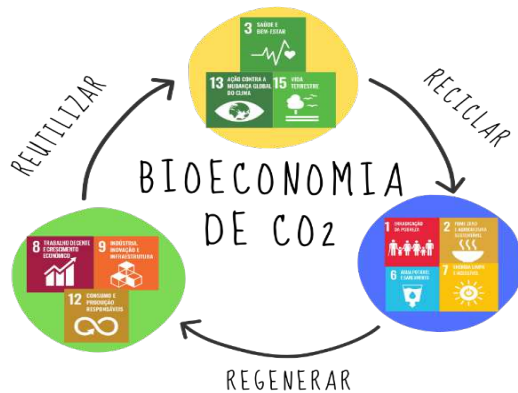
A configuração representada na Figura 1 não se limita a um arranjo laboratorial para redução de CO₂, mas simboliza um modelo funcional de integração entre biotecnologia e sustentabilidade. Os reatores de eletrossíntese microbiana operam como plataformas tecnológicas capazes de converter dióxido de carbono em compostos de interesse econômico, valendo-se da atividade de microrganismos eletroativos e do reaproveitamento de resíduos orgânicos. Essa abordagem se conecta diretamente ao conceito de bioeconomia circular, cuja essência está em transformar subprodutos e emissões em recursos renováveis, conforme ilustrado na Figura 2 (Venkata Mohan *et al.*, 2019). Assim, os sistemas MES se alinham às exigências atuais por inovação com responsabilidade ambiental, promovendo a redução das emissões de carbono e contribuindo para um modelo produtivo baseado na eficiência e no uso inteligente de recursos (Pant *et al.*, 2012; McArthur, 2013).

Figura 1 – Esquema conceitual do funcionamento de um reator de eletrossíntese microbiana



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Figura 2 – Demonstração da bioeconomia circular, em que o dióxido de carbono (CO₂) é transformado em um processo lógico e sustentável



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

A Figura 2 ilustra de forma clara o conceito de economia circular, que se contrapõe ao modelo linear baseado em extração, uso e descarte contínuo de recursos (Philp; Winickoff, 2018). Nesse novo paradigma, os resíduos deixam de ser considerados produtos finais e passam a integrar novos ciclos produtivos, promovendo maior eficiência e reduzindo perdas ao longo da cadeia (Heimann, 2019). Aplicado à eletrossíntese microbiana, esse princípio se concretiza por meio da utilização do dióxido de carbono como matéria-prima para a obtenção de compostos orgânicos com valor agregado, como ácidos graxos voláteis e biocombustíveis (Glaven, 2019). Trata-se de uma estratégia que alia inovação tecnológica e responsabilidade ambiental, favorecendo tanto a redução das emissões quanto o fortalecimento de um modelo produtivo mais sustentável. Ao integrar processos bioeletroquímicos com práticas circulares, os sistemas MES despontam como ferramentas-chave para a transição rumo a uma bioeconomia regenerativa, alinhada às metas globais de desenvolvimento sustentável (Gul; Ahmad, 2019; Pant *et al.*, 2010; McArthur, 2013; Venkata Mohan *et al.*, 2019).

3 Metodologia

A prospecção tecnológica desenvolvida neste estudo teve como objetivo analisar tendências e aplicações emergentes da eletrossíntese microbiana voltada para o sequestro de dióxido de carbono (CO₂), utilizando como base dados científicos e tecnológicos de alcance internacional. A metodologia foi dividida em duas

etapas principais: o levantamento bibliográfico em bases especializadas e a análise de documentos de patente.

3.1 Levantamento Bibliográfico

A primeira etapa envolveu a revisão de literatura científica por meio das bases de dados Scopus e ScienceDirect, reconhecidas pela qualidade e abrangência de periódicos técnicos e científicos. A seleção das publicações seguiu critérios de relevância, atualidade (2010-2024) e aderência temática. Para isso, foram empregados operadores booleanos em estratégias de busca com termos como: “*microbial electrosynthesis*” AND “*carbon dioxide capture*”, “*bioelectrochemical system*” AND CO₂ AND (*conversion OR fixation*), adaptados para a língua portuguesa em pesquisas complementares realizadas em repositórios como o Google Acadêmico e o Portal de Periódicos da Capes.

A triagem inicial priorizou artigos de revisão, estudos experimentais e trabalhos com enfoque em aplicações industriais e ambientais. Foram excluídas publicações duplicadas, de escopo genérico ou sem revisão por pares. A classificação e análise do conteúdo seguiram abordagem qualitativa, com destaque para autores recorrentes, periódicos com alto fator de impacto e contribuições teóricas consolidadas.

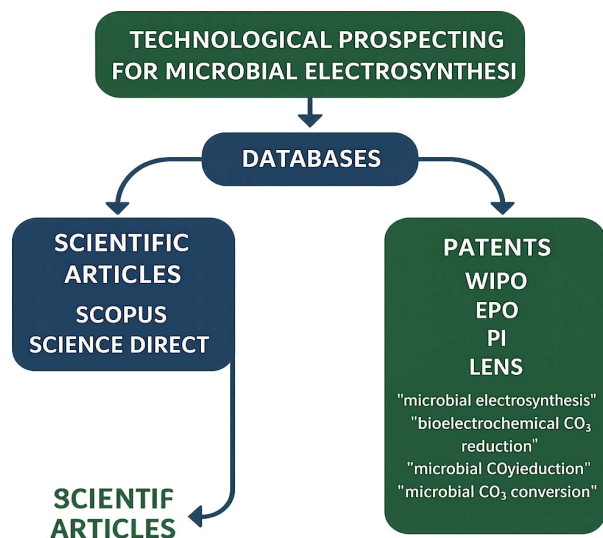
3.2 Análise de Documentos de Patentes

Na segunda etapa, foi realizado um levantamento de patentes por meio de bases gratuitas e abertas: Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), World Intellectual Property Organization (WIPO), European Patent Office (Espacenet) e Lens.org. Esta última foi adotada como principal fonte devido à sua cobertura global e pelos recursos analíticos avançados (Graham; De Ruyter, 2021).

As buscas foram realizadas com o auxílio da ferramenta de busca combinada, utilizando filtros por título, resumo e Classificação Internacional de Patentes (IPC), com base nos mesmos termos utilizados na etapa bibliográfica. O recorte temporal foi de 2010 a 2024, com o intuito de identificar tendências recentes e detectar tecnologias em ascensão. Patentes em processo de sigilo ou com dados incompletos foram excluídas da análise final.

A plataforma Lens.org também permitiu o cruzamento de informações sobre inventores, titulares, colaborações institucionais e frequência de citações tecnológicas, o que auxiliou na identificação de atores estratégicos na área de eletrossíntese microbiana e sequestro de carbono. A análise permitiu ainda o mapeamento dos principais países depositantes e das rotas tecnológicas em consolidação.

Figura 3 – Metodologia utilizada para pesquisa de patentes



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

4 Resultados e Discussão

A eletrossíntese microbiana (MES) desponta como tecnologia inovadora para converter CO₂ e resíduos orgânicos em compostos de alto valor agregado. Esse campo combina biotecnologia e eletrônica avançada, recebendo crescente atenção internacional. Em termos de patentes, observa-se que países como China, EUA, Coreia do Sul e membros da União Europeia lideram os registros, fruto de políticas públicas de apoio à pesquisa em bioenergia e bioeconomia. Por exemplo, China e EUA têm lançado programas robustos de P&D em tecnologias de captura de carbono e reutilização de resíduos, enquanto a Coreia e a Itália investem em biotecnologia para indústria química limpa. O Brasil, por sua vez, vem estruturando recentemente uma Estratégia Nacional de Bioeconomia – com criação da Secretaria Nacional de Bioeconomia e elaboração do PNDBIO – sinalizando prioridade em biotecnologias. No entanto, o número de patentes brasileiras

em MES ainda é modesto comparado aos líderes globais, o que reflete menor investimento histórico em bioeletrônica, assim como encontrado em outros setores biotecnológicos no país (Graham; De Ruyter, 2021).

A Tabela 1 fornece um panorama quantitativo das buscas por patentes com base em diferentes palavras-chave e bases de dados. Nota-se uma predominância de resultados nas bases WIPO e EPO, com destaque para os descritores “bioelectrochemical system” AND “CO₂ fixation”. Essa combinação remete a uma abordagem tecnológica mais ampla, que abrange os princípios eletroquímicos da conversão microbiana, sugerindo que a MES está inserida em um campo interdisciplinar mais vasto. Esse dado também indica que a terminologia utilizada nas buscas pode influenciar significativamente a quantidade de resultados recuperados e que há uma tendência para classificar a MES sob nomenclaturas diversas nos bancos de patentes internacionais, o que exige um esforço de padronização terminológica para fins de prospecção tecnológica (Fleischmann; Zhang; Krause, 2020).

A Figura 4 mostra a evolução anual do número de depósitos de patentes vinculadas à eletrossíntese microbiana entre 2010 e 2024. O período entre 2010 e 2015 foi marcado por um crescimento progressivo, refletindo o avanço da biotecnologia aplicada a sistemas bioeletroquímicos e o interesse crescente em rotas sustentáveis para a fixação de carbono (Rabaey; Rozendal, 2010; Logan; Rabaey, 2012). A partir de 2016, esse ritmo desacelera, culminando em uma queda expressiva em 2019 – o que pode ser relacionado a instabilidades econômicas globais e à reconfiguração de investimentos em inovação tecnológica no período pré-pandêmico (OECD, 2020). A retomada, no entanto, torna-se visível a partir de 2020, coincidindo com a intensificação das agendas climáticas e de transição energética pós-Covid-19. Em 2024, o volume de depósitos atinge patamares equivalentes aos anos de maior produtividade tecnológica, sugerindo um novo ciclo de valorização da eletrossíntese microbiana como ferramenta estratégica para o desenvolvimento de soluções limpas, circulares e de alto valor agregado (Glaven, 2019; Graham; De Ruyter, 2021).

Tabela 1 – Número de patentes e documentos identificados por palavras-chave nas bases de dados no período de 2010 a 2024

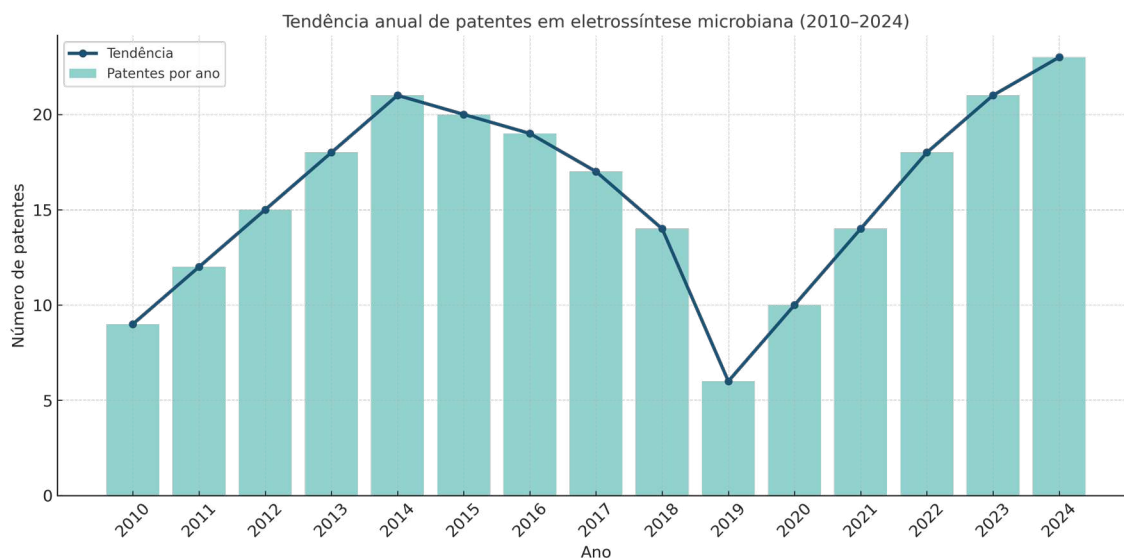
PALAVRAS-CHAVE	BANCO DE DADOS				
	INPI	WIPO	EPO	PI	LENS
Termos para o título/abstract					
"eletrossíntese microbiana" AND "CO"	1	9	3	3	2
"microbial electrosynthesis" AND "COsequestration"	-----	2	6	9	17
"microbial electrosynthesis" AND "carbon dioxide capture"	-----	16	21	8	11
"bioelectrochemical system" AND "COfixation"	-----	25	19	12	15
Total	1	52	49	32	45

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Observa-se uma correlação entre os picos de depósito de patentes e a realização de eventos internacionais relacionados à eletroquímica microbiana, como o encontro regional LA-ISMET, realizado em Fortaleza, Brasil, em setembro de 2024, e o encontro A-ISMET, organizado em Ain Sokhna, Egito, em fevereiro de 2025 (International Society for Microbial Electrochemistry and Technology, 2024; 2025). Esses eventos favorecem não apenas o intercâmbio técnico-científico, mas também constituem espaços propícios para *networking* entre pesquisadores e representantes da indústria, estimulando novas demandas e oportunidades de inovação.

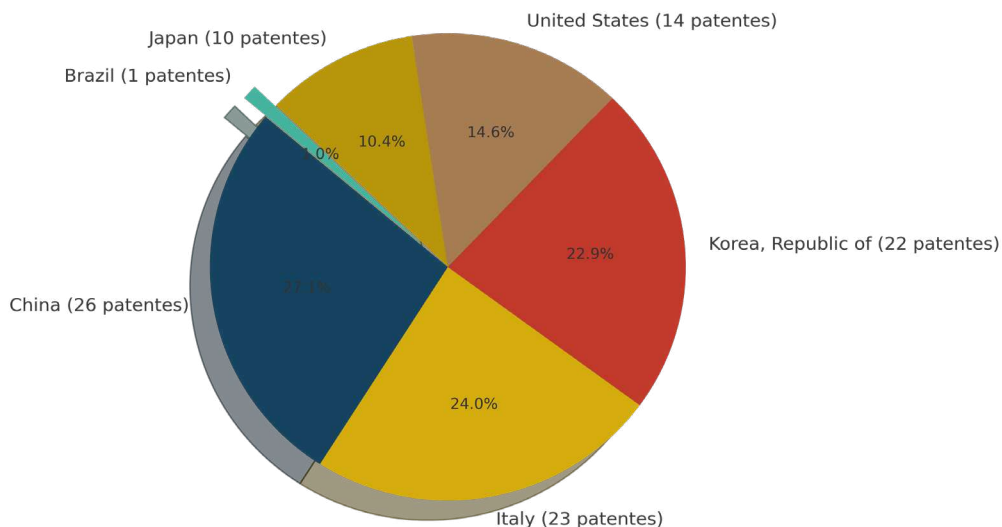
A Figura 5 representa a distribuição recente das patentes vinculadas à eletrossíntese microbiana segundo a jurisdição dos países depositantes. Nota-se que a China lidera com 26 registros, evidenciando seu papel de destaque na geração de tecnologias voltadas para a conversão sustentável de carbono. O Brasil aparece com apenas um registro no período analisado, o que revela uma participação ainda incipiente nesse cenário tecnológico. Essa disparidade reforça a urgência de ampliar os investimentos em ciência e tecnologia ambiental no país (Graham; De Ruyter, 2021).

Figura 4 – Número de patentes em relação ao ano de depósito



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Figura 5 – Distribuição de patentes por país



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Essa liderança da China pode ser explicada por estratégias nacionais que articulam política industrial, inovação tecnológica e segurança energética. Documentos como o 14º Plano Quinquenal Chinês enfatizam o papel das tecnologias verdes, e, dentro desse escopo, a bioeletrônica ambiental figura como prioridade. Além disso, a forte presença de universidades e institutos de pesquisa aplicados à engenharia ambiental, como a Tsinghua University e o Dalian Institute of Chemical Physics, contribuem para a geração de soluções patenteáveis com aplicação prática (Zhao *et al.*, 2022).

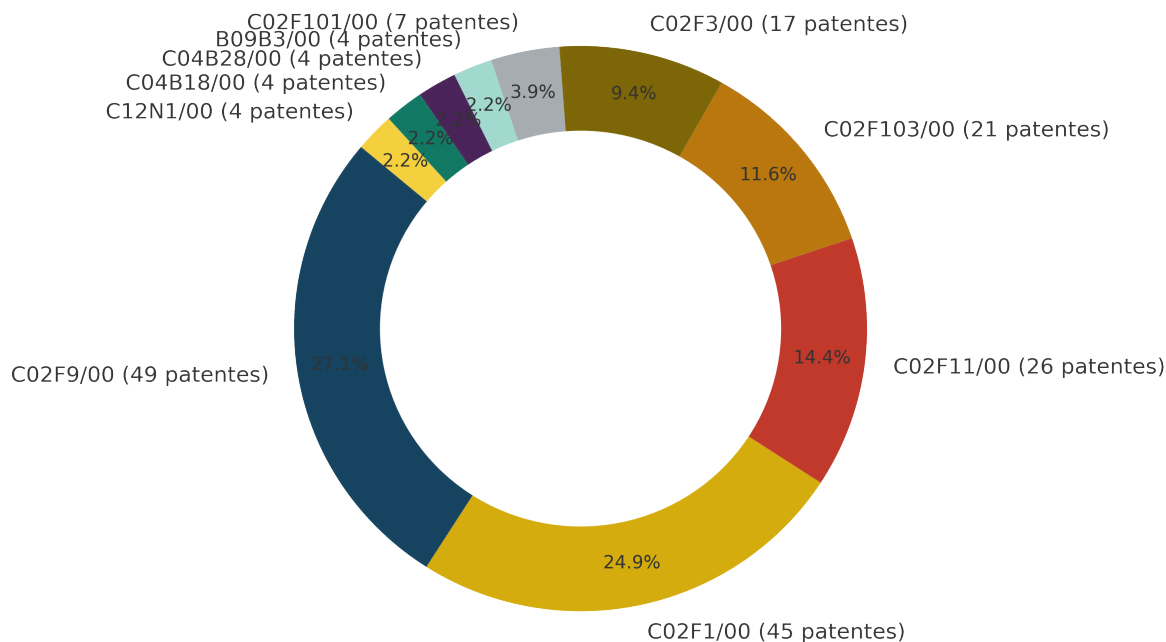
No cenário brasileiro, a atividade inventiva no campo da eletrossíntese microbiana ainda é incipiente. Uma das poucas iniciativas identificadas foi registrada sob o número BR 102016023862-5, depositada por BiomassTrust em 2019, abordando um sistema bioeletroquímico voltado para a conversão de CO₂ em compostos químicos de interesse industrial. Essa patente representa um passo importante para o reconhecimento da eletrossíntese microbiana como rota viável de valorização de carbono no contexto nacional, embora sua presença ainda seja isolada frente ao panorama internacional.

A Figura 6 apresenta a Classificação Internacional de Patentes (CIP) dos registros encontrados, revelando a

concentração em subclasses voltadas para a biotecnologia industrial, catálise e processos eletroquímicos. Essa classificação indica que a MES se localiza na interseção entre bioprocessos e engenharia química, o que demanda equipes interdisciplinares e centros de pesquisa com infraestrutura robusta. A ausência de classificações específicas para tecnologias emergentes como a MES ainda representa um desafio para análise estatística mais refinada.

A Tabela 2 apresenta o quantitativo de publicações científicas relacionadas à eletrossíntese microbiana voltada para o sequestro de dióxido de carbono (CO₂), obtido nas bases internacionais ScienceDirect e Scopus. Foram utilizadas diferentes combinações de descritores para representar as principais abordagens do campo, com base em terminologias recorrentes na literatura científica. Os dados indicam que a expressão “eletrossíntese microbiana” AND “CO₂” foi a mais relevante em ScienceDirect, com 32 publicações, enquanto a mesma combinação em inglês – “microbial electrosynthesis” AND “CO₂ sequestration” – obteve maior retorno na base Scopus, com 21 resultados. Isso sugere que há uma predominância de artigos em língua inglesa circulando em periódicos com maior indexação internacional, o que está de acordo com as observações de Kumaravel *et al.* (2020) sobre a centralização da produção técnico-científica em ambientes editoriais anglófonos.

Figura 6 – Número de patentes em relação à Classificação Internacional de Patentes (CIP)



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

A Figura 7 ilustra a distribuição revisada das publicações científicas relacionadas à eletrossíntese microbiana, conforme dados obtidos na base Scopus®, totalizando 47 artigos. Os Estados Unidos lideram com 12 publicações, evidenciando seu protagonismo na produção acadêmica e na consolidação de pesquisas voltadas para a conversão de CO₂ por vias biotecnológicas. Na sequência, pode-se observar as contribuições relevantes de países europeus e asiáticos, como Alemanha (8), Índia (7) e Reino Unido (5). A China figura com quatro registros, e outras nações como Canadá, França, Austrália e Países Baixos mantêm um volume mais discreto de publicações.

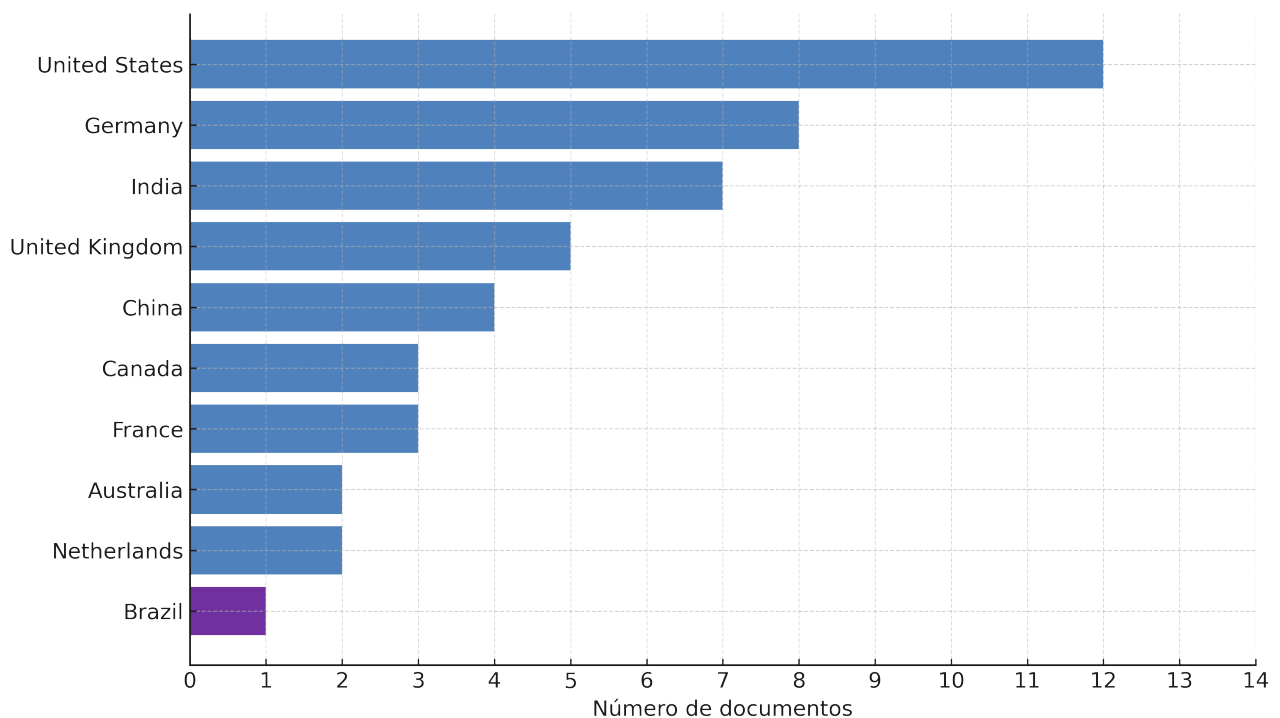
Esse cenário corrobora a tendência internacional de concentrar esforços em pesquisas transdisciplinares relacionadas à mitigação das mudanças climáticas. A MES é reconhecida como tecnologia promissora não apenas por sua capacidade de capturar carbono, mas também por permitir a síntese de compostos químicos com valor comercial direto, como ácidos graxos voláteis, metano e polihidroxicanoatos (PHAs) (Nevin *et al.*, 2011; Krackermeier *et al.*, 2015). Essa dupla função – ambiental e econômica – pode representar um vetor estratégico para países em desenvolvimento estruturarem políticas industriais sustentáveis, desde que invistam em infraestrutura científica e marcos regulatórios adequados.

Tabela 2 – Número de artigos recuperados a partir das palavras-chave por base de periódicos

PALAVRAS-CHAVE	SCIENCE DIRECT	SCOPUS
"eletrossíntese microbiana" AND "CO"	32	4
"microbial electrosynthesis" AND "COsequestration"	10	31
"microbial electrosynthesis" AND "carbon dioxide capture"	5	3
"bioelectrochemical system" AND "COfixation"	25	9
TOTAL	72	47

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Figura 7 – Distribuição dos artigos científicos por país de origem (base Scopus – total de 47)



Fonte: Scopus® - Dados consultados em 2025

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Os resultados obtidos a partir da análise de patentes e publicações científicas revelam padrões consistentes: a liderança internacional em termos de registros e produção acadêmica está concentrada em regiões com forte tradição de investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias verdes, especialmente mesclando biotecnologia e eletroquímica. Em contraste, o Brasil apresenta participação ainda modesta, tanto em depósitos de patentes quanto em publicações, evidenciando lacunas em infraestrutura, financiamento e políticas de fomento direcionadas à eletrossíntese microbiana.

A avaliação quantitativa demonstrou que a terminologia e a escolha de descritores influenciam diretamente os resultados recuperados, ressaltando a necessidade de padronização terminológica em futuras prospecções tecnológicas e revisões bibliográficas. Ademais, a correlação entre eventos científicos e picos de depósitos de patentes sugere que iniciativas de cooperação acadêmica e industrial, fomentadas em conferências e redes de pesquisa, desempenham papel crucial na aceleração de inovações nesse campo.

Do ponto de vista técnico-científico, os dados indicam que avanços em eletrodos de alto rendimento, otimização de condições operacionais (potenciais aplicados, materiais de eletrodos, condições de cultura microbiana) e compreensão dos mecanismos metabólicos e de transferência de elétrons permanecem como desafios centrais. A escalabilidade dos sistemas e a análise de custo-benefício para aplicação em larga escala carecem de estudos aprofundados, sobretudo em regiões emergentes como o Brasil. Aprimorar protocolos de caracterização analítica e desenvolver métodos padronizados de avaliação de desempenho dos sistemas MES são passos fundamentais para comparabilidade entre estudos.

Limitações identificadas incluem: possíveis vieses de busca em bases de patentes e publicações, considerando diferentes terminologias; período de análise restrito até 2024, sem captar desenvolvimentos muito recentes; ausência de acesso a dados detalhados de investimento privado; e escopo centrado principalmente em patentes e artigos, sem considerar relatórios técnicos ou dissertações que possam conter inovações ainda não patenteadas.

Perspectivas para pesquisas futuras envolvem: (i) investigação de cepas microbianas adaptadas a ambientes específicos, visando maior eficiência de conversão; (ii) desenvolvimento de eletrodos e materiais de suporte com maior durabilidade e condutividade; (iii) estudos sobre integração de MES em biorrefinarias, considerando cadeias de valor circular; (iv) avaliação socioeconômica e ambiental de sistemas MES em diferentes contextos regionais; (v) exploração de coprodução de múltiplos produtos (exemplo: cogeração de eletricidade e biomoléculas); e (vi) formulação

de políticas públicas e incentivos financeiros que estimulem parcerias academia-indústria e *startups* no setor.

A seção de Resultados e Discussão consolida evidências de tendências tecnológicas e acadêmicas na eletrossíntese microbiana, apontando tanto avanços quanto lacunas que devem orientar esforços futuros. Esse encerramento estabelece a base necessária para a seção de Conclusão, na qual serão sintetizadas as implicações gerais deste estudo e sugeridas recomendações estratégicas para promoção da MES, especialmente no contexto brasileiro.

5 Considerações Finais

A eletrossíntese microbiana (MES) reafirma-se como uma tecnologia pioneira no contexto das soluções para mitigação de CO₂ e geração de compostos de alto valor agregado. Além de seu potencial inerente de capturar e converter carbono em produtos úteis, as descobertas recentes apontam para avanços concretos em múltiplos aspectos técnicos, econômicos e institucionais. Estudos sobre materiais de eletrodos de base carbônica demonstram que a escolha de substratos eletricamente condutivos, biocompatíveis e de superfície aumentada pode acelerar significativamente a transferência de elétrons e o crescimento de biofilmes eletroativos (Gopakumari-Satheesh-Chandran *et al.*, 2023; Al-Mamun *et al.*, 2023). Essa linha de investigação corrobora a visão de que o desenvolvimento de materiais “verdes” e de baixo custo, possivelmente oriundos de resíduos (biochar, grafeno derivado de biomassas etc.), é fator crítico para viabilizar a escalabilidade de sistemas MES (Gopakumari-Satheesh-Chandran *et al.*, 2023).

No plano biológico, o entendimento mais profundo dos mecanismos de transferência extracelular de elétrons e das rotas metabólicas de produção de compostos – especialmente em bactérias acetogênicas e outros eletrotrofos como *Geobacter* e *Shewanella* – favorece a otimização de condições operacionais (temperatura, pH, potencial aplicado) e o eventual uso de estratégias de engenharia metabólica para ampliar a diversidade de produtos obtidos (Yixin Li, Mingfeng Cao, Vijai Kumar Gupta, and Yuanpeng Wang, 2023; Gaoxiang Chen, Rongchang Wang, Maoxin Sun, Jie Chen, Eheneden Iyobosa e Jianfu Zhao., 2023). Essas intervenções podem alavancar a eficiência energética e permitir a síntese dirigida de moléculas de interesse industrial, como ácidos graxos voláteis, álcoois, poli-hidroxialcanoatos e outros químicos de cadeia mais longa, ampliando o espectro de aplicações da MES (Zhang *et al.*, 2012; Nevin *et al.*, 2011).

Em termos de inovação e propriedade intelectual, as tendências de depósito de patentes confirmam que países com políticas robustas de incentivo à bioeconomia concentram grande parte dos registros, o que reforça a

necessidade de estratégias de fomento nacional para criar ecossistemas favoráveis à MES. No Brasil, a participação ainda é incipiente, mas o cenário nacional oferece condições promissoras: biodiversidade microbiana única, abundância de resíduos agroindustriais e recente fortalecimento de redes de pesquisa interinstitucionais (Etzkowitz; Leydesdorff, 2000; Venkata Mohan *et al.*, 2019). A promoção de parcerias academia-indústria-governo e a criação de programas de financiamento específicos para pesquisas e prototipagem de reatores MES podem catalisar a transformação dessas oportunidades em inovações patenteáveis e aplicações práticas.

Do ponto de vista socioeconômico e de governança, a MES pode compor arranjos de bioeconomia circular ao integrar-se a sistemas de tratamento de resíduos orgânicos e reuso de subprodutos, gerando emprego e renda locais. Contudo, para que isso se concretize, é essencial avançar em estudos de viabilidade econômica detalhados – considerando CAPEX, OPEX e valor agregado dos produtos – e em avaliações de ciclo de vida (LCA), de modo a quantificar impactos ambientais e orientar decisões de investimento (Thulluru; Ghangrekar; Chowdhury, 2023; Al-Mamun *et al.*, 2023). Tais análises devem contemplar cenários de integração com fontes renováveis de energia (solar, eólica), avaliando o balanço energético e de emissões em escala demonstrativa e, subsequentemente, em operação piloto ou comercial.

Em resumo, a síntese das bibliográficas e de patentes reforça que a MES transcende a mera curiosidade científica: ela constitui uma plataforma tecnológica de caráter interdisciplinar (biotecnologia, eletroquímica, engenharia de materiais, economia ambiental) com potencial de impacto real em bioprodutos sustentáveis e mitigação de mudanças climáticas. Os avanços técnicos recentes indicam caminhos para superar os principais gargalos (transferência de elétrons, durabilidade de materiais, otimização de bioprocessos), enquanto as lacunas nacionais sinalizam oportunidades estratégicas de posicionamento do Brasil em um mercado global emergente. Essa conclusão sustenta a necessidade de maturação contínua da MES, por meio de investigações integradas, prototipagem e políticas que incentivem a inovação no país.

6 Perspectivas Futuras

A continuidade das pesquisas em eletrossíntese microbiana deve se apoiar em avanços integrados, que vão desde a elucidação dos mecanismos de transferência extracelular de elétrons até o desenvolvimento de materiais de eletrodos economicamente viáveis e sustentáveis. É esperado que estratégias de engenharia metabólica, apoiadas por ferramentas de biologia sintética, permitam não apenas ampliar o leque de produtos gerados a partir

de CO₂ mas também otimizar a eficiência de captação de elétrons por cepas eletrotóxicas, garantindo maior produtividade e seletividade de moléculas de alto valor agregado (Gopakumari-Satheesh-Chandran *et al.*, 2023; Li *et al.* 2023). Junto a isso, a pesquisa de materiais tende a explorar substratos derivados de resíduos orgânicos (como biochar ou grafeno de biomassa), combinados a técnicas emergentes de nanotecnologia e manufatura aditiva, para criar superfícies de alta área específica e biocompatibilidade aprimorada, favorecendo a adesão de biofilmes eletroativos e a durabilidade das estruturas de reatores (Al-Mamun *et al.*, 2023; *Frontiers in Microbiology*, 2023). A expectativa é que reatores projetados com essas inovações permitam operação estável em fluxo contínuo, com controle eficaz de parâmetros de massa e prótons, e que suportem condições reais de processo industrial ou de tratamento de resíduos.

Um aspecto central para torná-la viável em escala demonstrativa e comercial é a condução de estudos de viabilidade técnico-econômica e de avaliações de ciclo de vida que considerem custos de capital e operação, bem como o balanço energético e de emissões associadas à integração com fontes renováveis como solar e eólica (Thulluru, Ghangrekar e Chowdhury, 2023; Al-Mamun *et al.* 2023). Tais análises permitirão identificar gargalos e oportunidades de redução de custos, além de oferecer subsídios para investidores e formuladores de políticas na definição de incentivos adequados. No Brasil, como a abundância de resíduos agroindustriais e a biodiversidade microbiana oferecem terreno fértil para inovações, torna-se imperativo estruturar programas de pesquisa aplicada, planos de demonstração em parceria com cooperativas e indústrias locais, e linhas de financiamento que apoiem prototipagem de reatores MES adaptados às condições regionais (Venkata Mohan *et al.*, 2019; Kumaravel *et al.*, 2020).

Para que a eletrossíntese microbiana alcance maturidade, é fundamental consolidar arranjos institucionais que envolvam universidades, centros de pesquisa, empresas e governo, conforme o modelo da hélice tríplice, de modo a promover transferência de tecnologia e criação de startups dedicadas a bioeletrônica ambiental (Etzkowitz; Leydesdorff, 2000). A capacitação de recursos humanos especializados em bioeletroquímica, engenharia de bioprocessos e avaliação de sustentabilidade deve ser incorporada em currículos e programas de extensão, fortalecendo a cultura de inovação desde a formação acadêmica. Simultaneamente, governança e políticas públicas precisam reconhecer a MES como componente relevante de estratégias de baixo carbono, criando mecanismos de crédito de carbono e editais que privilegiem pesquisas em sistemas bioeletroquímicos para tratamento de resíduos e geração de bioprodutos.

Ademais, o monitoramento contínuo de desempenho e riscos, incluindo aspectos de biossegurança e aceitabilidade

social, deve acompanhar cada etapa de escalonamento, assegurando que a implantação de reatores não comprometa a segurança ambiental ou sanitária. A participação em redes internacionais de pesquisa, intercâmbio de dados e cooperação global será essencial para acessar infraestrutura avançada e compartilhar conhecimentos comparativos, acelerando o amadurecimento tecnológico no Brasil e em outros países emergentes. Por fim, a adoção de projetos educacionais que utilizem a MES como exemplo prático de integração entre microbiologia, eletroquímica e sustentabilidade fortalecerá a percepção pública sobre o papel das tecnologias circulares na mitigação de mudanças climáticas e incentivará futuras gerações a contribuir para esse campo.

Em conclusão, ao reescrever o panorama futuro em formato contínuo, destaca-se que a eletrossíntese microbiana possui múltiplos vetores de desenvolvimento interligados: avanços em biologia sintética e materiais; avaliação robusta de viabilidade econômico-ambiental; arranjos institucionais colaborativos; capacitação e sensibilização de stakeholders; e governança orientada a incentivar inovações de baixo carbono. No contexto brasileiro, o aproveitamento da biodiversidade e dos resíduos agroindustriais, aliado a políticas públicas bem direcionadas e à cooperação entre universidade, indústria e governo, oferece uma oportunidade singular de posicionar o país na vanguarda dessa tecnologia emergente. Encerramos aqui o artigo enfatizando que o caminho para a consolidação da MES requer esforços integrados e contínuos, mas que seu potencial de contribuir para a descarbonização e a geração de bioprodutos sustentáveis justifica plenamente esses investimentos e colaborações planejadas.

Referências

- AL-MAMUN, Abdullah *et al.* Recent advances in microbial electrosynthesis system: Metabolic investigation and process optimization. *Fuel*, v. 345, 128289, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128289>.
- BEHERA, B. K. *et al.* Carbon capture and utilization: A review of emerging technologies. *Environmental Research*, v. 208, p. 112689, 2022.
- BIAN, B. *et al.* Electroactive bacteria and biocathode in microbial electrosynthesis: From mechanism to applications. *Bioresource Technology*, v. 302, p. 122825, 2020.
- CHEN, Y. *et al.* Recent advances in microbial electrosynthesis: from pathways to applications. *Progress in Materials Science*, v. 135, p. 101076, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101076>.
- CHRISTODOULOU, X. *et al.* The use of carbon dioxide in microbial electrosynthesis: Advancements, sustainability and economic feasibility. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 18, p. 390-399, 2017.
- DAS, S.; SINGH, S.; KUMAR, S. Bioelectrochemical systems: Recent advances and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 113, p. 109271, 2019.
- ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. The dynamics of innovation: from National Systems and “Mode 2” to a Triple Helix of University-industry-government relations. *Research Policy*, v. 29, n. 2, p. 109-123, 2000.
- FLEISCHMANN, M.; ZHANG, T.; KRAUSE, S. Microbial Electrochemical Technologies: Recent Advances and Future Outlook. *Chem Electro Chem*, v. 7, p. 1-19, 2020.
- GLAVEN, R. H. Microbial electrosynthesis – progress, challenges and future opportunities. *Microbial Biotechnology*, v. 12, n. 6, p. 1220-1224, 2019.
- GOPAKUMARI-SATHEESH-CHANDRAN, L. *et al.* Microbial electrosynthesis: carbonaceous electrode materials for CO₂ conversion. *Materials Horizons*, v. 10, p. 292-312, 2023.
- GRAHAM, S.; DE RUYTER, A. **Propriedade intelectual:** patentes como ferramenta estratégica de inovação. São Paulo: Editora Senac, 2021.
- GUL, M.; AHMAD, S. Technological innovation and climate change mitigation: empirical evidence from G20 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, p. 15426–15438, 2019.
- HEIMANN, T. Bioeconomy and SDGs: Does the bioeconomy support the achievement of the SDGs? *Earth’s Future*, v. 7, p. 43-57, 2019.
- IGBARASHI, K.; KATO, S. Extracellular electron transfer in acetogenic bacteria and its application for conversion of carbon dioxide into organic compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 101, p. 6301-6307, 2017.
- INSTITUTO CLIMA E SOCIEDADE. **Emissões no Brasil:** Relatório Anual de Emissões de GEE. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade, 2022.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR MICROBIAL ELECTROCHEMISTRY AND TECHNOLOGY. **LA-ISMET**, Fortaleza, Brasil, 2 a 4 setembro 2024. Disponível em: <https://is-met.org/meetings/>. Acesso em: 17 maio. 2025.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR MICROBIAL ELECTROCHEMISTRY AND TECHNOLOGY. **A-ISMET**, Ain Sokhna, Egito, 5 a 7 fevereiro 2025. Disponível em: <https://is-met.org/meetings/>. Acesso em: 17 maio. 2025.

- JOURDIN, L. **Microbial Electrosynthesis from Carbon Dioxide: Performance Enhancement and Elucidation of Mechanisms**. 2016. 168p. Tese (Doutorado) – University of Queensland, Queensland, 2016.
- JOURDIN, L.; BURDYNY, T. Microbial Electrosynthesis: Where Do We Go from Here? **Trends in Biotechnology**, v. 39, p. 359-369, 2021.
- KRACKERMEIER, F.; VASSILEV, I.; KRÖMER, J. O. Microbial electron transport and energy conservation – The foundation for optimizing bioelectrochemical systems. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, 2015.
- KUMARAVEL, S. *et al.* Trends and Advances in Microbial Electrochemical Systems for Carbon Capture and Utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 132, p. 110056, 2020.
- LI, X. *et al.* Efficient CO₂ conversion into carboxylates using flow-through bioelectrochemical systems. **Trends in Biotechnology**, v. 42, n. 5, p. 512-525, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.03.004>.
- LI, Yixin *et al.* Metabolic engineering strategies to enable microbial electrosynthesis utilization of CO₂: recent progress and challenges. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 44, n. 3, p. 401–418, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2179867>.
- LIU, Z. *et al.* Role of microbial electrosynthesis system in CO₂ capture and conversion: a recent advancement toward cathode development. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1192187, 2023.
- LOGAN, B. E.; RABAEY, K. Microbial electrochemical technologies. **Nature Reviews Microbiology**, v. 10, p. 307-319, 2012.
- McARTHUR, J. W. **Clean energy technologies and developing countries**. Washington: Brookings Institution, 2013.
- MURILLO-LUNA, José Luis; HERNÁNDEZ-TRASOBARES, Alejandro. Drivers of corporate environmental innovation: The role of the Triple Helix collaboration. **Journal of Cleaner Production**, v. 425, p. 139463, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139463>.
- NEVIN, K. P. *et al.* Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. **mBio**, v. 1, n. 2, p. e00103-10, 2011.
- OC – OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Relatório de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (SEEG)**. São Paulo: Observatório do Clima, 2021.
- OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Science, Technology and Innovation Outlook 2020: Adapting to the Covid-19 crisis**. Paris: OECD Publishing, 2020.
- PANT, D. *et al.* Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. **RSC Advances**, v. 2, n. 4, p. 1248-1263, 2012.
- PHILP, M.; WINICKOFF, D. Realizing the circular bioeconomy. **Nature Biotechnology**, v. 36, p. 532-535, 2018.
- QURAIISHI, M. *et al.* Valorisation of CO₂ into Value-Added Products via Microbial Electrosynthesis (MES) and Electro-Fermentation Technology. **Fermentation**, v. 7, n. 4, p. 291, 2021.
- RABAEY, K.; ROZENDAL, R. A. Microbial electrosynthesis – revisiting the electrical route for microbial production. **Nature Reviews Microbiology**, v. 8, p. 706-716, 2010.
- THULLURU, Lakshmi Pathi; GHANGREKAR, Makarand M.; CHOWDHURY, Shamik. Progress and perspectives on microbial electrosynthesis for valorisation of CO₂ into value-added products. **Journal of Environmental Management**, v. 332, p. 117323, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117323>.
- VENKATA MOHAN, S.; PANDEY, A.; VARJANI, S. **Microbial electrochemical technology: sustainable platform for fuels, chemicals and remediation**. [S.l.]: Elsevier, 2018.
- VENKATA MOHAN, S. *et al.* Moving towards biorefinery and circular economy: Role of microbial electrochemical technologies in achieving sustainability. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, p. 100272, 2019.
- YAU, H. H.; HAYES, M.; KALATHIL, S. Bioelectrochemical systems for CO₂ capture and utilization: current status and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 165, p. 112527, 2022.
- ZHANG, H. *et al.* Advances in cathode materials for microbial electrosynthesis of organic acids. **Bioelectrochemistry**, v. 148, p. 108293, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108293>.
- ZHAO, Z. *et al.* China's innovation policy and clean energy technologies: institutional evolution and strategic directions. **Energy Policy**, v. 164, p. 112876, 2022.
- ZHOU, Chunyan; ETZKOWITZ, Henry. Triple Helix Twins: innovation and sustainability. **Sustainability**, v. 13, n. 12, p. 6535, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126535>.

Sobre os Autores

Rafael da Silva Oliveira Holanda

E-mail: rsoholanda@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2053-5961>

Doutor em Materiais,

Endereço profissional: Laboratório de Eletroquímica e Microbiologia Aplicada, Instituto de Química e Biotecnologia, da Universidade Federal de Alagoas, Câmpus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

Fabiane Caxico de Abreu Galdino

E-mail: fca@qui.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9723-414X>

Doutora em Química.

Endereço profissional: Laboratório de Eletroquímica e Microbiologia Aplicada, Instituto de Química e Biotecnologia, da Universidade Federal de Alagoas, Câmpus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.