

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA -CTEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS

RAFAEL DA SILVA OLIVEIRA DE HOLANDA

**ELETROSSÍNTESE MICROBIANA E CARACTERIZAÇÃO
MICROBIOLÓGICA DO MELAÇO: UMA ROTA SUSTENTÁVEL
PARA O SEQUESTRO DE CARBONO.**

MACEIÓ-AL
2025

RAFAEL DA SILVA OLIVEIRA DE HOLANDA

**ELETROSSÍNTESE MICROBIANA E CARACTERIZAÇÃO
MICROBIOLÓGICA DO MELAÇO: UMA ROTA SUSTENTÁVEL
PARA O SEQUESTRO DE CARBONO.**

Tese submetida ao corpo docente do Programa de Pós Graduação em ciências dos Materiais da Universidade Federal de Alagoas -UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Materiais.

Orientadora: Dr^a Fabiane Caxico de Abreu Galdino.

**MACEIÓ
2025**

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB4 - 661

- H722e Holanda, Rafael da Silva Oliveira de.
Eletrossíntese microbiana e caracterização microbiológica do melão : uma rota sustentável para o sequestro de carbono / Rafael da Silva Oliveira de Holanda. – 2025. 101 f. : il.
- Orientadora: Fabiane Caxico de Abreu Galdino.
Tese (doutorado em Engenharia de Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 98-101.
1. Eletrossíntese microbiana. 2. Melão de cana-de-açúcar. 3. Bacillus.
4. Biocátodo. 5. Captura de carbono. I. Título.

CDU: 544.653.1:664.111

RAFAEL DA SILVA OLIVEIRA DE HOLANDA

ELETROSSÍNTESE MICROBIANA E CARACTERIZAÇÃO
MICROBIOLÓGICA DO MELAÇO: UMA ROTA SUSTENTÁVEL
PARA O SEQUESTRO DE CARBONO.

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência dos
Materiais da Universidade Federal de
Alagoas e **aprovada** em 01 de agosto
de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



FABIANE CAXICO DE ABREU GALDINO
Data: 12/08/2025 23:09:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. FABIANE CAXICO DE ABREU GALDINO (Orientadora – PPGMateriais/UFAL)

Documento assinado digitalmente



DIOGENES MENESES DOS SANTOS
Data: 12/08/2025 10:31:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. DIOGENES MENESES DOS SANTOS (PPGMateriais/UFAL)

Documento assinado digitalmente



JOHNNATAN DUARTE DE FREITAS
Data: 12/08/2025 10:58:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. JOHNNATAN DUARTE DE FREITAS (PPGMateriais/UFAL)

Documento assinado digitalmente



JOAO INACIO SOLETTI
Data: 12/08/2025 11:09:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. JOAO INACIO SOLETTI (Externo ao Programa PPGEQ-UFAL)

Documento assinado digitalmente



JOAO ARAUJO BARROS NETO
Data: 12/08/2025 09:13:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. JOAO ARAUJO BARROS NETO (Externo ao ProgramaPPGNUT-UFAL)

Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor, planos de fazê-los prosperar e não de lhes causar dano, planos de dar-lhes esperança e um futuro.”

(Jeremias 29:11)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força que me sustentou em todos os momentos, pelas portas abertas e pela coragem que, muitas vezes, eu mesmo não conseguia encontrar. Foram quatro anos de doutorado repletos de acertos e erros, dias de grande alegria e outros em que a falta de reagentes ou equipamentos poderia ter sido um fator de desistência, mas que, ao contrário, se tornaram desafios que me trouxeram ainda mais para dentro da ciência, reforçando meu propósito e minha paixão pela pesquisa.

Agradeço aos meus familiares, que são meu porto seguro, em especial ao meu marido Renato Duarte, que me apoia desde o mestrado e esteve ao meu lado em cada passo dessa caminhada, dividindo comigo os dias bons e os dias difíceis. À minha mãe, Cida, mulher forte que me ensinou a nunca desistir dos meus sonhos; à minha sogra maravilhosa, Joana D’Arc, pelo carinho e apoio; à minha irmã Beatriz, que sempre torceu pelo meu sucesso; e ao meu filho, Ravi Gabriel, minha maior motivação para seguir sendo exemplo de coragem e determinação.

Dedico também um agradecimento cheio de gratidão à minha orientadora, Professora Doutora Fabiane Caxico, por todo apoio, paciência, confiança e ensinamentos que me guiaram durante essa jornada científica e pessoal.

Aos amigos que fizeram parte do meu percurso experimental, agradeço ao Aldy, pela ajuda fundamental nos experimentos, e aos colegas do LEMAN – Laboratório de Eletroquímica e Microsistemas de Análise –, em especial Lyniker, Ana Laís e Jailson, pela parceria, trocas de conhecimento, companheirismo e amizade ao longo desses anos.

Aos amigos especiais que não são do meio acadêmico, mas que me apoiaram desde o início até aqui: Anyelle Silva, Luciana Santos, Vitoria Cerqueira, Paulinha e Diego, vocês foram abrigo em dias difíceis. E aos amigos que o trabalho me deu e que acreditaram no meu potencial, minha gratidão eterna à família Onélia Campelo, que esteve comigo mesmo nos dias mais desafiadores.

Um agradecimento especial ao meu pai, que já não está aqui, mas que sempre sonhou em ter um filho doutor. Hoje esse sonho se realiza, pai. Sou doutor em Materiais, e carrego esse título com orgulho, lembrando sempre do seu exemplo e dos seus ensinamentos. À minha tia Cidinha, que partiu, mas permanece viva em meu coração, e à minha avó Lindinalva, que tenho certeza que, de onde estão, vibram com essa vitória.

Por fim, agradeço ao Governo de Alagoas, em especial à Secretaria de Educação, à FAPEAL e à CAPES pelo apoio financeiro e tecnológico que viabilizaram a realização deste sonho.

Este doutorado não é apenas meu. É de todos que caminharam ao meu lado. Minha eterna gratidão.

RESUMO

A emissão crescente de dióxido de carbono (CO₂) causada pelas atividades humanas gera sérios problemas ambientais, como aquecimento global e mudança climática. Este estudo avaliou o potencial do melaço de cana-de-açúcar como meio de cultura para eletrossíntese microbiana, visando a captura de CO₂ e sua conversão em compostos orgânicos energéticos. Análises microbiológicas revelaram uma comunidade diversificada, predominando espécies do gênero *Bacillus*, identificadas morfológicamente e confirmadas molecularmente via extração de DNA, amplificação do gene 16S rRNA por PCR e análise eletroforética, assegurando a compatibilidade funcional dos isolados com processos bioeletroquímicos. O melaço sustentou eficientemente o crescimento bacteriano e, sob aplicação de corrente elétrica, os microrganismos apresentaram aumento da atividade metabólica e assimilação de CO₂. Resultados eletroquímicos demonstraram que os biocátodos apresentaram aumento progressivo da corrente após inoculação, especialmente a potenciais de -0,8 V e -1 V vs. Ag/AgCl, atingindo picos de densidade de corrente negativa (-60 A/m²), indicativos de reações de redução. Análises por FTIR confirmaram a formação de compostos como acetato, enquanto PCA e diagramas de Venn destacaram a diversidade funcional microbiana nos biofilmes. A integração de dados microbiológicos e eletroquímicos reforça o melaço como substrato estratégico para processos bioeletroquímicos, consolidando a eletrossíntese microbiana como abordagem sustentável para captura de carbono, produção de bioenergia e valorização de resíduos industriais.

Palavras-chaves: Eletrossíntese microbiana; Melaço de cana; *Bacillus*; Biocátodo; Captura de carbono.

ABSTRACT

The increasing emission of carbon dioxide (CO₂) caused by human activities generates serious environmental problems, such as global warming and climate change. This study evaluated the potential of sugarcane molasses as a culture medium for microbial electrosynthesis, targeting CO₂ capture and its conversion into energy-rich organic compounds. Microbiological analyses revealed a diverse microbial community, predominantly composed of *Bacillus* species, identified morphologically and confirmed at the molecular level through DNA extraction, 16S rRNA gene amplification by PCR, and agarose gel electrophoresis, ensuring the functional compatibility of the isolates with bioelectrochemical processes. Sugarcane molasses efficiently supported bacterial growth, and under the application of electrical current, the microorganisms exhibited increased metabolic activity and CO₂ assimilation. Electrochemical results demonstrated that biocathodes showed a progressive increase in current after inoculation, especially at potentials of -0.8 V and -1 V vs. Ag/AgCl, reaching negative current density peaks of -60 A/m², indicative of reduction reactions. FTIR analyses confirmed the formation of compounds such as acetate, while PCA and Venn diagrams highlighted the functional microbial diversity within the biofilms. The integration of microbiological and electrochemical data reinforces sugarcane molasses as a strategic substrate for bioelectrochemical processes, establishing microbial electrosynthesis as a sustainable approach for carbon capture, bioenergy production, and industrial waste valorization.

Keywords: Microbial electrosynthesis; Sugarcane molasses; *Bacillus*; Biocathode; Carbon capture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tendência das emissões de CO₂ ligadas à matriz energética brasileira	15
Figura 2 - Evolução das emissões per capita de CO₂	15
Figura 3 - Consumo Final Total de Energia por Fonte, 2012 e 2022	20
Figura 4 - Princípio da eletrossíntese microbiana no cátodo	25
Figura 5 - Formação de biofilme bacteriano em meio à base de melão	26
Figura 6 - Estrutura secundária da região V6 do gene 16S rRNA	27
Figura 7 - Estrutura secundária global do gene 16S rRNA	28
Figura 8 - Fluxograma ilustrativo do processo de identificação bacteriana	28
Figura 9 - Etapas da Bioprospecção de Microrganismos Eletroativos	29
Figura 10 - Representação esquemática dos principais processos eletroquímicos ...	31
Figura 11 - Esquema simplificado de uma célula eletroquímica convencional	32
Figura 12 - Integração dos processos eletroquímicos tradicionais com sistemas bioeletroquímicos	32
Figura 13 - Fluxograma integrativo dos conceitos abordados	33
Figura 14 - Cronologia dos avanços na conversão de CO₂ por sistemas	35
Figura 15 - Princípio da eletrossíntese microbiana no cátodo	37
Figura 16 - Membrana de separação	37
Figura 17 - Esquema de Funcionamento de um Sistema Bioeletroquímico (BES)	38
Figura 18 - Demonstração da bioeconomia circular	41
Figura 19 - Metodologia utilizada para pesquisa de patentes	48
Figura 20 - Diluição e semeadura do efluente	48
Figura 21 - Imagem da configuração do reator	50
Figura 22 - Número de patentes em relação ao ano de deposição	57
Figura 23 - Distribuição de patentes por país	58

Figura 24 - Número de patentes em relação à classificação internacional (CIP)	59
Figura 25 - Distribuição dos artigos científicos por país de origem	61
Figura 26 - Placas de Petri mostrando o crescimento bacteriano	62
Figura 27 - Variação do pH durante a captura de CO₂	66
Figura 28 - Teste de solubilidade em KOH para confirmação de bactérias	67
Figura 29 - Observação das culturas bacterianas sob o método de coloração Gram	67
Figura 30 - Resultado da extração de DNA genômico e amplificação do gene 16S	69
Figura 31 - Confirmação da amplificação do DNA utilizando primers específico.....	69
Figura 32 - Distribuição da corrente elétrica por concentração de melão.....	72
Figura 33 - Análise microscópica da superfície do eletrodo de feltro de carbono	73
Figura 34 - Desenvolvimento das Correntes na Curva de Polarização	75
Figura 35 - Voltamograma cíclico (CV) durante a fase operacional.....	77
Figura 36 - Junção de vários ciclos ao longo de todos os experimentos	78
Figura 37 - Espectro de reação parcial da eletrossíntese microbiana	81
Figura 38 - Espectro de FTIR final do MÊS	82
Figura 39 - Avaliação de Componentes Principais (PCA) das Comunidades Eubacterianas	83
Figura 40 - Diagrama de Venn das comunidades biológicas	87
Figura 41 - Sistema Bioeletroquímico para Eletrossíntese Microbiana	89
Figura 42 - Cromatogramas TIC obtidos por GC-MS	90
Figura 43 - Espectro de massa obtido da amostra após contato com feltro de carbono	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gases de efeito estufa, suas influências no aquecimento global e suas principais origens.....	19
Tabela 2 - Parâmetros físico-químicos do melão de cana de açúcar.....	23
Tabela 3 - Composição química típica do melão de cana-de-açúcar.....	24
Tabela 4 - Número de patentes e documentos encontrados segundo as palavras-chave por base de dados	56
Tabela 5 - Número de artigos recuperados a partir das palavras-chave por base de periódicos	60
Tabela 6 - Corrente média gerada em diferentes concentrações de melão de cana-de-açúcar (mA)	64
Tabela 7 - Corrente média gerada em diferentes concentrações de melão de cana-de-açúcar (mA)	71

SIGLAS

- BEAs:** Bactérias Eletroquimicamente Ativas
- BEN:** Balanço Energético Nacional
- BES:** Sistema Bioeletroquímico (Bioelectrochemical System)
- CCS:** Captura e Armazenamento de Carbono
- CO₂:** Dióxido de Carbono
- CONAB:** Companhia Nacional de Abastecimento
- DET:** Transferência Direta de Elétrons (Direct Electron Transfer)
- EET:** Transferência Extracelular de Elétrons
- EPE:** Empresa de Pesquisa Energética
- FTIR:** Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
- GEE:** Gases de Efeito Estufa
- H₂:** Hidrogênio
- IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPCC:** Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- MCTI:** Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
- MES:** Eletrossíntese Microbiana
- MFCs:** Células Combustível Microbianas
- NDC:** Contribuições Nacionalmente Determinadas
- OTUs:** Unidades Taxonômicas Operacionais (Operational Taxonomic Units)
- PBS:** Solução Tampão de Fosfato (Phosphate Buffer Solution)
- PCA:** Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis)
- PEM:** Membrana de Troca de Prótons (Proton Exchange Membrane)
- REN:** Rede de Políticas de Energia Renovável
- SBEs:** Sistemas Bioeletroquímicos
- TACO:** Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
- TEE:** Transferência de Elétrons Extracelular
- VC:** Voltametria Cíclica (Cyclic Voltammetry)
- VFAs:** Ácidos Graxos Voláteis (Volatile Fatty Acids)

SUMÁRIO

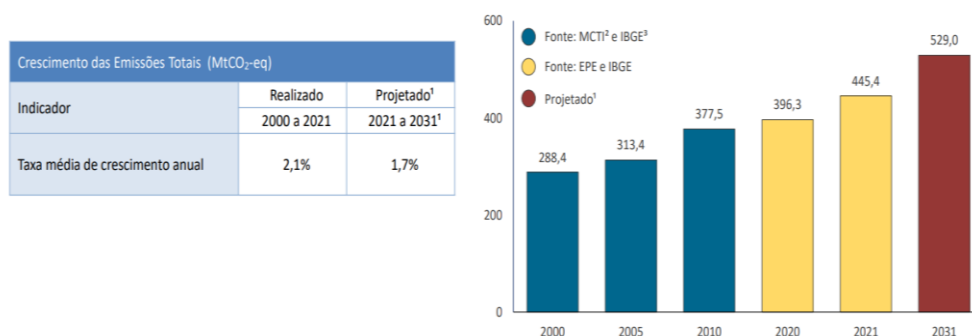
I.	INTRODUÇÃO	14
II.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
	2.1. Emissão de CO ₂ e Fatores Climáticos.....	18
	2.2. Agroindústria Cana de Açúcar	21
	2.3. Potencial Microbiológico e Caracterização do Melaço de Cana-de-Açúcar	24
	2.4. Bioprospecção de Microrganismos Eletroativos Aplicada à Eletrossíntese Microbiana	26
	2.5. Processos Eletroquímicos: Fundamentos e Aplicações Tecnológicas	30
	2.6. Eletrossíntese Microbiana	34
	2.7. Microrganismo Eletroquimicamente Ativo	39
	2.8. Economia Circular	41
III.	OBJETIVOS	43
	3.1. Objetivos Gerais	43
	3.2. Objetivos Específicos	43
IV.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
	4.1. Prospecção Tecnológica	45
	4.2. Preparo, Cultivo e Padronização do Inóculo	46
	4.3. Análise da Comunidade Microbiana	49
	4.4. Configurações do Reator Bioeletroquímico	49
	4.5. Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	51
	4.6. Voltametria Cíclica (VC)	51
	4.7. Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS)	52
	4.8. Monitoramento do Eletrodo com Microscópio Digital	53
	4.9. Análise Estatística	53
V.	RESULTADOS	55
	5.1. Prospecção.....	55
	5.2. Experimental	62
VI.	CONCLUSÃO	93
VII.	PERSPECTIVAS	96
VIII.	REFERÊNCIAS	97

I. INTRODUÇÃO

Em 2023, as emissões de dióxido de carbono alcançaram níveis sem precedentes, segundo FRIEDLINGSTEIN (2023) impulsionadas principalmente pela queima de combustíveis fósseis e por práticas extensivas de desmatamento, atingindo a impressionante marca de 40,9 bilhões de toneladas métricas. Esse aumento coloca em xeque os esforços globais para combater as mudanças climáticas, conforme revelado pelo Orçamento Global de Carbono 2023. Este relatório anual detalha não apenas o volume de carbono adicionado à atmosfera através de atividades humanas, como a queima de combustíveis e mudanças no uso do solo, mas também quanto carbono foi naturalmente absorvido pela terra e pelos oceanos.

A análise inicial para o ano de 2023 feitas por FRIEDLINGSTEIN (2023) indicou que as emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis aumentaram em 1,1%, totalizando 36,8 bilhões de toneladas de CO₂. Com a inclusão de outras fontes, como a desflorestação e uma temporada particularmente severa de incêndios florestais no Canadá, as emissões totais chegaram a 40,9 bilhões de toneladas.

Figura 1 - Tendência das emissões de CO₂ ligadas à matriz energética brasileira



Fonte: BEN, 2022.

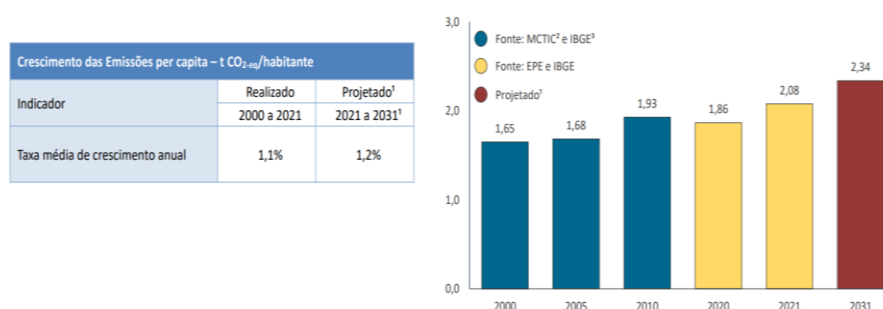
A figura 1 ilustra a tendência das emissões de CO₂ ligadas à matriz energética brasileira, evidenciando um aumento considerável desde o ano 2000, com uma taxa média de crescimento anual de 2,1%. As projeções até 2031 indicam um crescimento mais moderado, de 1,7% ao ano, refletindo esforços para controlar as emissões, embora ainda em níveis elevados. Por outro lado, na figura 2, destaca o aumento das emissões per capita associadas à matriz energética, crescendo a uma taxa anual de 1,1%, com expectativas de aceleração para 1,2% ao ano até 2031.

Os dados fornecem uma visão abrangente do contínuo aumento das emissões de CO₂ no Brasil, tanto em termos absolutos quanto per capita. Mesmo com a redução projetada na taxa de crescimento das emissões totais, de 2,1% para 1,7%, a trajetória ascendente permanece, apontando para desafios significativos na mitigação das emissões no setor energético. Este aumento persistente das emissões ressalta a importância de políticas e medidas eficazes para controlar o impacto ambiental da matriz energética.

O gráfico presente na figura 1, apresenta essa tendência de forma visualmente clara e impactante, enfatizando a necessidade urgente de ações significativas para mitigar o impacto ambiental. Para alcançar uma matriz energética mais sustentável, é essencial implementar estratégias mais eficientes e adotar tecnologias inovadoras que reduzam as emissões de CO₂, alinhando-se às diretrizes internacionais de proteção ambiental e sustentabilidade (Fonte: MCTI² e IBGE², EPE e IBGE). A figura 2 indica uma tendência contínua de crescimento. Esse aumento reflete tanto o crescimento econômico quanto a maior demanda por energia, ressaltando a necessidade de intervenções políticas e tecnológicas para controlar e eventualmente reduzir essas emissões.

A projeção de 2,34 t CO₂-eq/habitante em 2031 evidencia os desafios ambientais que o Brasil enfrenta. É essencial adotar estratégias eficazes para mitigar o impacto das emissões de CO₂, promovendo a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Além disso, políticas públicas que incentivem a redução das emissões per capita são fundamentais. O gráfico presente na figura 2, oferece uma visão clara da evolução das emissões per capita de CO₂, alertando para a urgência de ações significativas para garantir a proteção ambiental e a sustentabilidade a longo prazo.

Figura 2 - Evolução das emissões per capita de CO₂



Fonte: BEN, 2022.

Este cenário sublinha a importância crescente da eletricidade renovável e da bioeletrossíntese, oferecendo novas vias para a produção de combustíveis e produtos químicos de forma mais sustentável. A redução dos custos de equipamentos e as condições favoráveis de financiamento têm sido catalisadores essenciais para o crescimento das energias renováveis, evidenciados pelo recorde de investimentos em 2015. Especialmente notável tem sido o avanço na energia solar fotovoltaica e nas turbinas eólicas.

O Sistema Bioeletroquímico (BES), através da Eletrossíntese Microbiana (MES), representa uma abordagem inovadora na conversão de CO₂ em produtos químicos valiosos, utilizando a habilidade de microrganismos eletroativos em realizar reações redox sobre bioeletrodos. Essa tecnologia, conforme descrito por Rabaey (2010), não apenas permite a transformação eficiente do CO₂, um dos principais gases de efeito estufa, em compostos orgânicos multicarbonados, mas também destaca o potencial desses processos em armazenar energia elétrica sob a forma de produtos químicos. Este método depende crucialmente do biocatalisador específico e do acceptor de elétrons terminal utilizado, ressaltando a sua alta especificidade.

À medida que o MES é aprimorado para superar desafios operacionais, como a solubilidade do CO₂, através de técnicas como a pulverização direta de CO₂ e a adição de bicarbonato, segundo Bajracharya (2017) a tecnologia não só contribui para a redução das emissões de CO₂, mas também apoia a promoção de uma economia circular e sustentável. A capacidade de converter eficazmente o CO₂ em produtos valiosos pode desempenhar um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas e no apoio à sustentabilidade ambiental.

Uma inovação particularmente interessante no campo do MES é a utilização do melaço de cana-de-açúcar como meio de cultura. O melaço, rico em açúcares fermentáveis, oferece uma fonte de carbono econômica e abundante para o crescimento de culturas puras de bactérias homoacetogênicas, como *Sporomusa sp.* e *Clostridium sp.*, que são utilizadas para bioeletrorredução de CO₂. Esta abordagem não só reforça a sustentabilidade do MES ao integrar subprodutos agrícolas, mas também abre caminho para a conversão eficiente de resíduos agrícolas em produtos de valor agregado, minimizando simultaneamente as emissões de gases de efeito estufa.

Nas últimas décadas, o mundo tem assistido a um avanço expressivo de inovações tecnológicas voltadas à 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 et al., 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.

Neste contexto, o presente estudo visa 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.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Emissão De Co₂ – Fatores Climáticos

À medida que a urbanização global acelera, projeções indicam que até dois terços da população mundial estarão vivendo em cidades até 2050, segundo o Toda Materia (2018). Este crescimento urbano intensifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente devido ao aumento da demanda energética e produtiva, com a agricultura desempenhando um papel significativo neste processo.

O Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), de 2021, destaca que estamos a caminho de superar o limite de aquecimento global de 1,5°C a 2°C já nas próximas décadas se não conseguirmos reduzir drasticamente as emissões de GEE. Diante deste cenário, o Brasil, que figura entre os dez maiores emissores globais de GEE, estabeleceu metas ambiciosas através do Acordo de Paris e suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC). Compromete-se a reduzir suas emissões em 43% até 2030, comparado aos níveis de 2005, conforme apontado por Albuquerque et al. (2020).

O dióxido de carbono (CO₂) se destaca entre os GEE, sendo responsável por cerca de 60% do efeito estufa e permanecendo na atmosfera por séculos. As principais fontes de CO₂, como explicado por Penna (1999), incluem a queima de combustíveis fósseis e práticas agrícolas como desmatamentos e queimadas, que eliminam importantes sumidouros de carbono.

A tabela 1, nos oferece um panorama dos principais gases que intensificam o efeito estufa, mostrando um aumento alarmante na concentração desses gases desde 1750 e destacando suas principais fontes antropogênicas. Esta tabela ressalta não apenas a importância, mas também a urgência de adotarmos medidas eficazes para a captura de CO₂. A implementação de práticas agrícolas mais sustentáveis e o desenvolvimento de tecnologias para captura e armazenamento de carbono são essenciais para atenuar nosso impacto ambiental e cumprir os compromissos internacionais de redução de emissões. É crucial que a agricultura, como um dos setores chave, adote inovações que reduzam sua contribuição para as emissões globais de CO₂.

Tabela 1 - Gases de efeito estufa, suas influências no aquecimento global e suas principais origens.

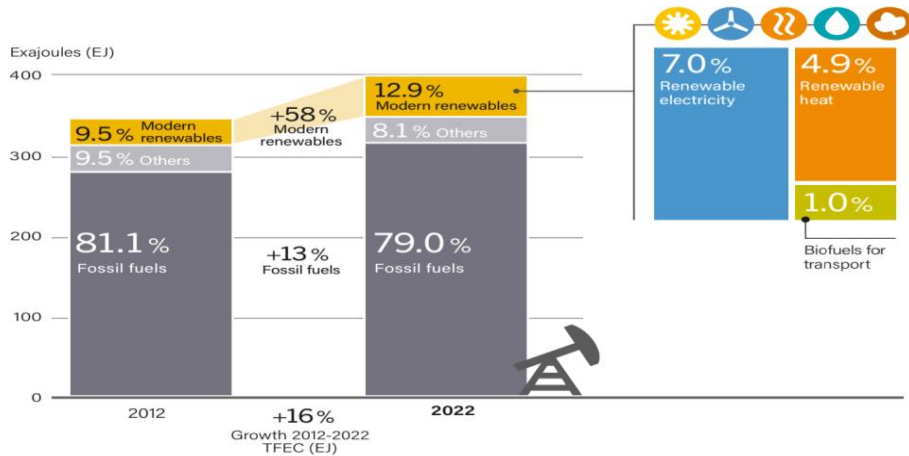
GEE	Crescimento da concentração desde 1750.	Participação no aquecimento global (%)	Principal origem
CO ₂	149%	66%	Utilização de combustíveis fósseis, desflorestamento e mudanças no uso do solo.
CH ₄	262%	16%	Geração e utilização de energia (incluindo biomassa), práticas agrícolas, criação de animais, gestão de aterros sanitários e tratamento de águas residuais.
N ₂ O	123%	7%	Aplicação de fertilizantes, fabricação de ácidos, e a combustão de biomassa e combustíveis fósseis.
Halogenados (HFC, PFC e SF ₆)	-----	11%	Indústria química, sistemas de refrigeração, uso de aerossóis e propelentes, espumas expansíveis e solventes.

Fonte: Readaptado pelo autor, a partir dos dados do WMO, 2021.

Ao abordar a indústria da cana-de-açúcar e sua dualidade como fonte significativa de energia renovável e, ao mesmo tempo, uma contribuinte para as emissões de CO₂, é crucial destacar as práticas que podem transformar esse setor em um modelo de sustentabilidade energética. A cana-de-açúcar é valorizada por sua capacidade de produzir etanol e bioeletricidade, servindo como alternativa limpa aos combustíveis fósseis. Essa contribuição é exemplificada na Figura 3, que apresenta uma comparação do consumo final total de energia por fonte nos anos de 2012 e 2022, medido em exajoules (EJ). A imagem é dividida em duas partes principais: a evolução do consumo de diferentes fontes de energia ao longo da década e a participação específica das energias renováveis em 2022, que mostra que cerca de 18,1% da

energia global é derivada de fontes renováveis, segundo dados do REN21, com a cana-de-açúcar desempenhando um papel importante nesse contexto, especialmente no Brasil.

Figura 3- Consumo Final Total de Energia por Fonte, 2012 e 2022



Fonte: REN21, 2022.

A figura 3 ilustra uma tendência positiva no aumento da participação das energias renováveis modernas no consumo final total de energia ao longo da década. Enquanto a dependência de combustíveis fósseis ainda é predominante, com uma participação de 79% em 2022, houve um aumento significativo na contribuição das fontes renováveis, passando de 9,5% em 2012 para 12,9% em 2022.

O crescimento das energias renováveis é impulsionado principalmente pela eletricidade renovável (7,0%), seguida pelo calor renovável (4,9%) e pelos biocombustíveis para transporte (1,0%). Esse aumento reflete um avanço nos esforços para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, visando maior sustentabilidade e redução das emissões de CO₂.

Em resumo, a figura 3 destaca a necessidade contínua de investimentos e políticas de apoio para promover o uso de energias renováveis, a fim de alcançar uma matriz energética mais equilibrada e sustentável no futuro.

No entanto, as práticas de cultivo e processamento da cana-de-açúcar emitem quantidades significativas de CO₂, principalmente através da queima pré-colheita da cana, da decomposição

de resíduos e do uso intenso de fertilizantes. Essas emissões apontam para a necessidade de revisão das práticas agrícolas. Estratégias como a adoção de cultivo direto, que minimiza a queima de campos, e o uso mais eficiente de fertilizantes para reduzir as emissões de óxido nitroso são essenciais.

Para potencializar os benefícios ambientais da cana-de-açúcar, a implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) pode ser uma solução inovadora para controlar as emissões durante a produção de etanol. Essas melhorias tecnológicas e práticas agrícolas sustentáveis podem consolidar a indústria da cana-de-açúcar não só como um pilar da matriz energética global mais limpa, mas também como um exemplo de responsabilidade ambiental no uso de bioenergia.

2.2 Agroindústria – Cana De Açúcar

O Brasil lidera a produção global de cana-de-açúcar, com uma colheita impressionante na safra de 21/22, onde 578,8 milhões de toneladas foram processadas, resultando em 34,9 milhões de toneladas de açúcar e 26,4 bilhões de litros de etanol, de acordo com dados da CONAB (2023). Os estados de São Paulo, Goiás e Minas Gerais são responsáveis por quase três quartos da produção total do país. A região de Alagoas, embora contribua menos em volume, desempenha um papel crucial na economia regional e enfrenta desafios significativos relacionados à sustentabilidade.

O setor sucroalcooleiro figura como um dos pilares da produção de energia renovável e alimentos no cenário global. Nos últimos anos, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem se expandido significativamente, impulsionada pela demanda por combustíveis limpos e pela necessidade de alternativas sustentáveis aos recursos fósseis. O Brasil ocupa posição de destaque nesse contexto, sendo responsável por mais de 40% da produção mundial de açúcar e etanol, consolidando-se como potência estratégica no fornecimento desses insumos (SANTOS et al., 2021).

Essa relevância é reforçada por indicadores recentes: apenas em 2024, o país exportou 35,2 milhões de toneladas de açúcar, o que representa mais da metade do comércio global (TRENDSCE, 2024). Mesmo diante de desafios climáticos, a safra 2024/2025 foi estimada em 689,8 milhões de toneladas, mantendo o Brasil entre os maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo (CONAB, 2024). Além de sua contribuição como alimento e matéria-prima energética, a cana-de-açúcar tem sido cada vez mais reconhecida como uma solução viável no

combate às mudanças climáticas, seja por sua utilização na produção de etanol, seja pela geração de bioeletricidade (SANTOS et al., 2021).

Historicamente, o cultivo da cana-de-açúcar está entrelaçado com o desenvolvimento agrícola do Brasil desde os tempos coloniais, passando por períodos de expansão e crises relacionadas à competição internacional e flutuações de preços (Sanders e Sanders, 2018). O melaço, é um subproduto tradicional obtido pelo cozimento do caldo da cana, *S. officinarum*, até a evaporação e a formação de um xarope denso. Este processo inclui etapas críticas de purificação através da remoção de impurezas acumuladas na espuma (Gaspar, 2009).

Apesar da tradição e do valor econômico, a produção da cana pode ser uma fonte intensiva de emissões de CO₂, especialmente quando envolve práticas como a queima da cana antes da colheita. Embora essa prática tenha diminuído com o aumento da mecanização, ela ainda é significativa e contribui para o aumento das emissões de carbono. O processo de fermentação e destilação do etanol, apesar de ser uma alternativa mais verde aos combustíveis fósseis, também libera CO₂.

O melaço não só possui uma rica tradição como também é altamente nutritivo, oferecendo minerais essenciais como ferro, cálcio, fósforo e magnésio, importantes para a saúde animal (TACO, 2011). Este perfil nutricional reforça a importância do melaço como um alimento energético e potencialmente benéfico contra a anemia, destacando o valor dos subprodutos da cana-de-açúcar.

Para mitigar os impactos ambientais da produção de cana-de-açúcar, é fundamental a implementação de práticas agrícolas sustentáveis. Essas incluem reduzir a queima da cana, otimizar o uso de fertilizantes e adotar tecnologias avançadas que minimizem as emissões durante os processos de fermentação e destilação. Essas estratégias não apenas ajudarão a reduzir o impacto ambiental associado à cana-de-açúcar, mas também fortalecerão sua contribuição como uma fonte vital de bioenergia na transição global para uma matriz energética mais limpa.

O melaço, um subproduto da cana-de-açúcar, não é apenas um item de valor tradicional e nutricional; ele também possui qualidades que o tornam ideal para uso em práticas ambientalmente sustentáveis, como a eletrossíntese microbiana. Esta técnica aproveita as características microbiológicas do melaço, cuja composição rica e a presença de bactérias eletrossensíveis facilitam a conversão eficiente do CO₂ em compostos sustentáveis (Smith et al., 2021).

Na eletrossíntese microbiana, o melaço proporciona um meio reacional robusto, fornecendo os nutrientes necessários para cultivar comunidades microbianas específicas. Essas bactérias usam eletrodos para transferir elétrons, convertendo CO₂ em uma variedade de produtos químicos úteis, como ácidos orgânicos e alcoóis (Jones e Greenfield, 2019). Essa transformação não apenas exemplifica a inovação tecnológica, mas também a eficiência energética, levando em considerações parâmetros importantes ilustrados na tabela 2. Esses fatores físico-químicos do melaço de cana-de-açúcar são essenciais para entender sua composição e comportamento em processos bioeletroquímicos, proporcionando um ambiente adequado para a atividade bacteriana e a conversão eficiente de CO₂ em produtos de base biológica. Nesse caso, umidade indica a quantidade de água presente no melaço. Um nível adequado de umidade é em torno de 20% do volume total. Logo é importante para manter a fluidez e a facilidade de manuseio do melaço, além de ser essencial para o metabolismo bacteriano.

Tabela 2 - Parâmetros Físico-químicos do melaço de cana de açúcar

Parâmetro	Valor
Acidez Total (g/kg)	1,2
Brix (%)	82
Sacarose (% m/m)	39,9
pH	5,7
Frutose (% m/m)	7,5
Glucose (% m/m)	5,5
Umidade (%)	18
Proteínas (g/kg)	2-3
Cálcio (g/kg)	1-2
Potássio (g/kg)	3-5
Magnésio (g/kg)	0,5-1

Fonte: Readaptado pelo autor, a partir dos dados do WMO, 2021.

Adotar o melaço em eletrossíntese microbiana exemplifica um princípio de economia circular dentro da indústria da cana-de-açúcar. Este enfoque transforma um subproduto potencialmente descartável em uma valiosa fonte de novos materiais, minimizando o

desperdício e maximizando a utilidade dos recursos naturais. Além disso, essa prática contribui para a redução de emissões de carbono, alinhando-se com esforços globais para um ambiente mais limpo e sustentável (Patel et al., 2020).

Dessa forma, o uso do melaço na eletrossíntese microbiana não apenas sublinha a capacidade da cana-de-açúcar de contribuir para soluções energéticas sustentáveis e a redução de carbono, mas também, reforça a importância de adotar modelos de economia circular. Esses modelos não só valorizam cada subproduto, como também promovem processos industriais que são inovadores e amigáveis ao meio ambiente (Chang, 2022).

2.3 Potencial Microbiológico E Caracterização Do Melaço De Cana-De-Açúcar

O melaço de cana-de-açúcar, tradicionalmente considerado um subproduto da indústria sucroalcooleira, destaca-se na atualidade como uma matriz biotecnológica de interesse crescente devido à sua composição rica em açúcares fermentescíveis e micronutrientes essenciais ao metabolismo microbiano (KUMAR et al., 2022). Formado principalmente por sacarose, glicose e frutose, como mostrado na tabela 3, o melaço apresenta ainda quantidades significativas de minerais como cálcio, magnésio e potássio, elementos que favorecem o crescimento celular e a estabilidade metabólica de microrganismos cultivados em condições industriais (CANAL DA CANA, 2024). Por essa razão, o melaço tem sido amplamente estudado como meio de cultura econômico e eficiente para microrganismos de interesse biotecnológico.

Tabela 3 – Composição química típica do melaço de cana-de-açúcar

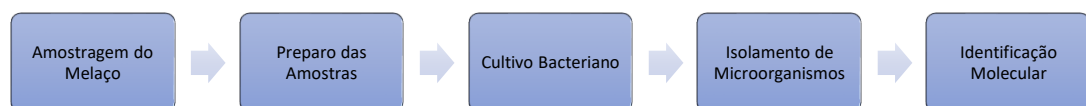
CONSTITUINTE	TEOR MÉDIO
Sacarose	30-40%
Glicose	10-15%
Frutose	8-12%
Umidade	20-25%
pH	5
Potássio (g/kg)	25-40
Magnésio (g/kg)	4-6

Fonte: Readaptado pelo autor, a partir dos dados do WMO, 2021.

Sob a perspectiva microbiológica, o melão fornece condições favoráveis à proliferação de espécies adaptadas a ambientes hiperosmóticos e ricos em substratos orgânicos. Estudos recentes confirmam que o uso do melão como base de cultivo resulta no favorecimento de gêneros bacterianos como *Bacillus*, *Clostridium* e *Lactobacillus*, conhecidos por suas propriedades metabólicas versáteis e pela produção de metabólitos secundários de interesse industrial (KUMARAVEL et al., 2020). Além disso, o melão tem demonstrado eficácia no enriquecimento seletivo de microrganismos eletroativos, aqueles capazes de realizar transferência extracelular de elétrons (TEE), essenciais em processos bioeletroquímicos.

Para a caracterização microbiológica do melão, métodos clássicos de microbiologia analítica são aplicados, como mostrado na figura 7. As etapas incluem o cultivo em meios sólidos e líquidos, observação morfológica por microscopia óptica, coloração de Gram e análise bioquímica básica. Adicionalmente, técnicas moleculares, como a amplificação do gene 16S rRNA e o sequenciamento genético, permitem identificar com precisão as espécies predominantes e avaliar sua diversidade funcional (AL-MAMUN et al., 2023). Essa caracterização se torna relevante principalmente na identificação de espécies com potencial biotecnológico e eletroquímico.

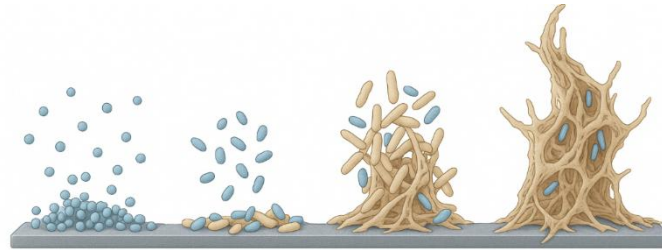
Figura 4 – Fluxograma do protocolo de caracterização microbiológica aplicado ao melão de cana.



Fonte: Autor, 2025.

Diversos estudos evidenciam que a composição química do melão favorece não apenas o crescimento celular, mas também a formação de biofilmes robustos, característica essencial em sistemas bioeletroquímicos (GOPAKUMARI-SATHEESH-CHANDRAN et al., 2023). Em aplicações práticas, como reatores microbianos e sistemas de eletrossíntese, a presença de nutrientes no melão contribui para a viabilidade e estabilidade dos microrganismos eletroativos, permitindo sua aplicação como substrato estratégico em processos de captura de carbono e bioconversão (LIU et al., 2023).

Figura 5 – Formação de biofilme bacteriano em meio à base de melaço



Formação de Biofilme Bacteriano em meio à base de melaço

Fonte: Autor, 2025.

Portanto, o melaço de cana-de-açúcar revela-se um recurso subutilizado com elevado potencial em aplicações microbiológicas, figura 5, e biotecnológicas, destacando-se como meio de cultura sustentável e eficiente para o isolamento, enriquecimento e aplicação de microrganismos em processos industriais. Sua versatilidade química e microbiológica reafirma seu papel como substrato estratégico na bioeconomia circular e em processos sustentáveis emergentes, como a eletrossíntese microbiana (CHEN et al., 2023).

2.4 Bioprospecção De Microrganismos Eletroativos Aplicada À Eletrossíntese Microbiana

A bioprospecção microbiana consiste na investigação sistemática de ambientes naturais e industriais para a identificação de microrganismos com propriedades metabólicas específicas e aplicáveis em processos biotecnológicos (ALMEIDA et al., 2021). No contexto dos sistemas bioeletroquímicos (BES) e da eletrossíntese microbiana (MES), a bioprospecção direciona-se à descoberta de bactérias eletroquimicamente ativas, capazes de catalisar reações redox essenciais à conversão de dióxido de carbono (CO_2) em compostos orgânicos de interesse industrial (TIAN et al., 2022).

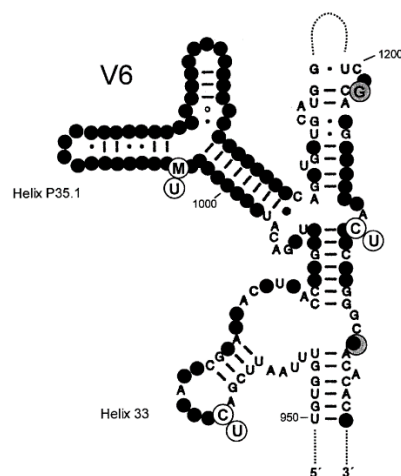
O crescente interesse por soluções tecnológicas para mitigação das emissões de CO_2 impulsiona pesquisas sobre a utilização de microrganismos em processos de captura biológica e bioeletrorredução (BEHERA et al., 2022). Bactérias pertencentes aos gêneros *Geobacter*, *Shewanella*, *Clostridium* e *Bacillus* têm sido identificadas como biocatalisadores promissores devido à sua capacidade de realizar transferência extracelular de elétrons (EET) e participar ativamente da formação de biofilmes eletroativos (VASSILEV et al., 2023).

A seleção e caracterização de microrganismos com potencial eletroativo são passos críticos, envolvendo técnicas clássicas de microbiologia, análises moleculares (como amplificação do gene 16S rRNA) e ensaios eletroquímicos que permitem avaliar a eficiência da transferência de elétrons e da conversão de substratos (FU et al., 2022). Além disso, ambientes como solos industriais, lamas anaeróbias e efluentes agroindustriais são considerados fontes estratégicas na bioprospecção de novas linhagens adaptadas a condições extremas de pH, temperatura e potenciais redox (LIMA et al., 2020).

O gene 16S rRNA é uma das principais ferramentas moleculares utilizadas na identificação e classificação de microrganismos bacterianos. Esse gene codifica o RNA ribossomal 16S, componente essencial da subunidade 30S do ribossomo bacteriano, sendo caracterizado por regiões altamente conservadas intercaladas com regiões hipervariáveis, como V1 a V9, responsáveis pela diferenciação taxonômica entre gêneros e espécies (SILVA et al., 2022).

A estrutura do RNA ribossomal 16S apresenta um arranjo complexo de hastes e loops, resultado do emparelhamento interno de bases. A figura 6 destaca a organização da região V6, frequentemente utilizada como marcador molecular por apresentar variações específicas entre diferentes gêneros bacterianos, incluindo o gênero *Bacillus*.

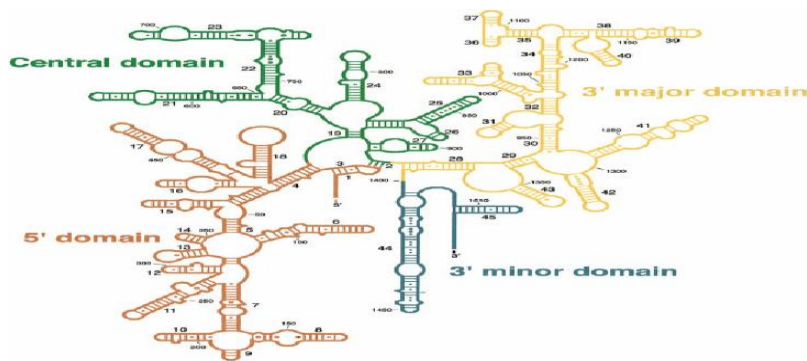
Figura 6 – Estrutura secundária da região V6 do gene 16S rRNA, evidenciando as formações de loops e hastes características, como as hélices P35.1 e 33



Fonte: Autor, 2025.

Além das regiões variáveis, o gene 16S rRNA é organizado em quatro domínios estruturais principais: domínio 5', domínio central, domínio 3' major e domínio 3' minor, como ilustrado na figura 7. Essa organização estrutural é responsável pela conformação funcional do RNA dentro do ribossomo e fundamenta sua estabilidade e conservação evolutiva (KUMAR et al., 2023).

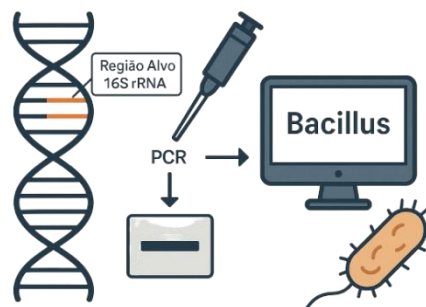
Figura 7- Estrutura secundária global do gene 16S rRNA, destacando seus quatro domínios principais



Fonte: Readaptado pelo autor, a partir dos dados do NEVIN et al, 2021.

A identificação bacteriana através da amplificação do gene 16S rRNA se dá pela aplicação da técnica de Reação em Cadeia da Polimerase (PCR). Após a extração do DNA genômico, utiliza-se primers específicos que amplificam regiões alvo do 16S rRNA. Os produtos amplificados são analisados via eletroforese e submetidos à sequenciação para posterior identificação por comparação com bancos de dados moleculares (NEVIN et al., 2021). O processo metodológico está representado na figura 8.

Figura 8- Fluxograma ilustrativo do processo de identificação bacteriana baseado na amplificação do gene 16S rRNA via PCR



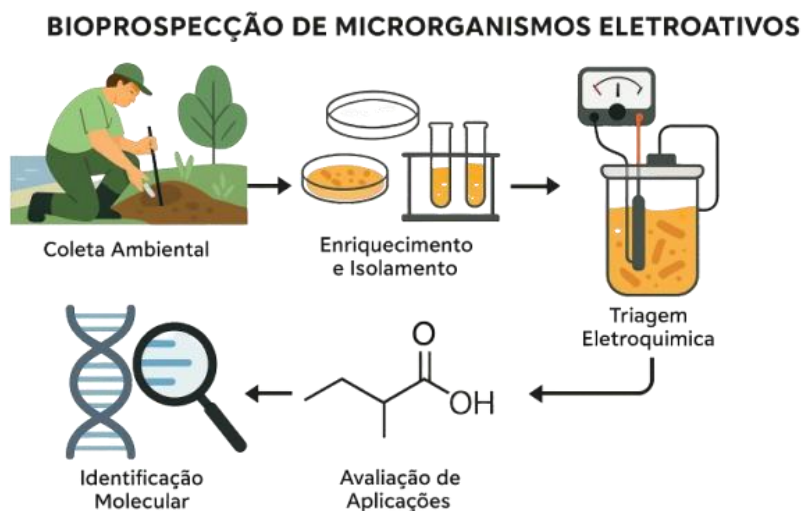
Fonte: Autor, 2025.

O avanço das técnicas de sequenciamento e bioinformática, especialmente após 2020, potencializou o uso do 16S rRNA em estudos metagenômicos, diagnósticos clínicos e microbiologia industrial, consolidando-o como marcador padrão para análises filogenéticas bacterianas (MALIK; RAMESH; GOEL, 2024).

Estudos recentes apontam que comunidades microbianas diversas podem atuar de forma sinérgica em sistemas MES, favorecendo a produção de compostos como ácidos graxos voláteis (VFAs) e álcoois de cadeia curta (CHANG, 2022). Assim, a prospecção de microrganismos não apenas amplia o banco genético aplicável, mas também contribui para otimizar o rendimento de produtos e a eficiência do sequestro de carbono.

No cenário da bioeconomia e da economia circular, a integração da bioprospecção microbiana, figura 9, ao desenvolvimento de sistemas bioeletroquímicos reforça o papel da biotecnologia como ferramenta estratégica na transição para processos industriais mais sustentáveis (OLIVEIRA et al., 2020).

Figura 9 – Etapas da Bioprospecção de Microrganismos Eletroativos



Fonte: Autor. 2025.

A figura 9 ilustra de forma didática o fluxo metodológico da bioprospecção de microrganismos eletroativos, etapa fundamental no desenvolvimento de tecnologias baseadas em eletrossíntese microbiana. O processo se inicia com a coleta de amostras ambientais ou industriais, provenientes de ambientes ricos em matéria orgânica e condições redox específicas.

Essas amostras passam por processos de enriquecimento e isolamento em meio seletivo, com o objetivo de favorecer o crescimento de microrganismos potencialmente eletroativos. Na etapa seguinte, as culturas isoladas são submetidas à triagem funcional, por meio de ensaios eletroquímicos, onde se avalia sua capacidade de realizar transferência extracelular de elétrons (EET) em sistemas bioeletroquímicos.

Posteriormente, os isolados com maior desempenho eletroquímico são caracterizados molecularmente, utilizando técnicas como a amplificação e sequenciamento do gene 16S rRNA, visando sua identificação taxonômica. Por fim, as bactérias selecionadas são avaliadas quanto ao seu potencial biotecnológico em processos de captura de CO₂ e produção de compostos orgânicos de valor agregado. Como representado na figura, este fluxo integrativo permite mapear, selecionar e aplicar microrganismos adaptados às exigências dos sistemas MES, contribuindo para a expansão do conhecimento microbiológico e para o avanço de tecnologias sustentáveis voltadas à bioeconomia e mitigação das mudanças climáticas (TIAN et al., 2022; BEHERA et al., 2022).

2.5 Processos Eletroquímicos: Fundamentos E Aplicações Tecnológicas

Os processos eletroquímicos constituem um ramo da físico-química que estuda as reações químicas associadas à transferência de elétrons entre uma superfície condutora (eletrodo) e uma espécie química presente em solução. Essas reações, controladas eletricamente, permitem transformar energia química em elétrica e vice-versa, possibilitando aplicações industriais amplamente estabelecidas (TIAN et al., 2022). Os principais processos eletroquímicos incluem a eletrólise, a eletrocoagulação, a eletrocatálise, a eletrooxidação avançada e a eletrogravimetria, cada um deles explorado conforme a necessidade do setor produtivo.

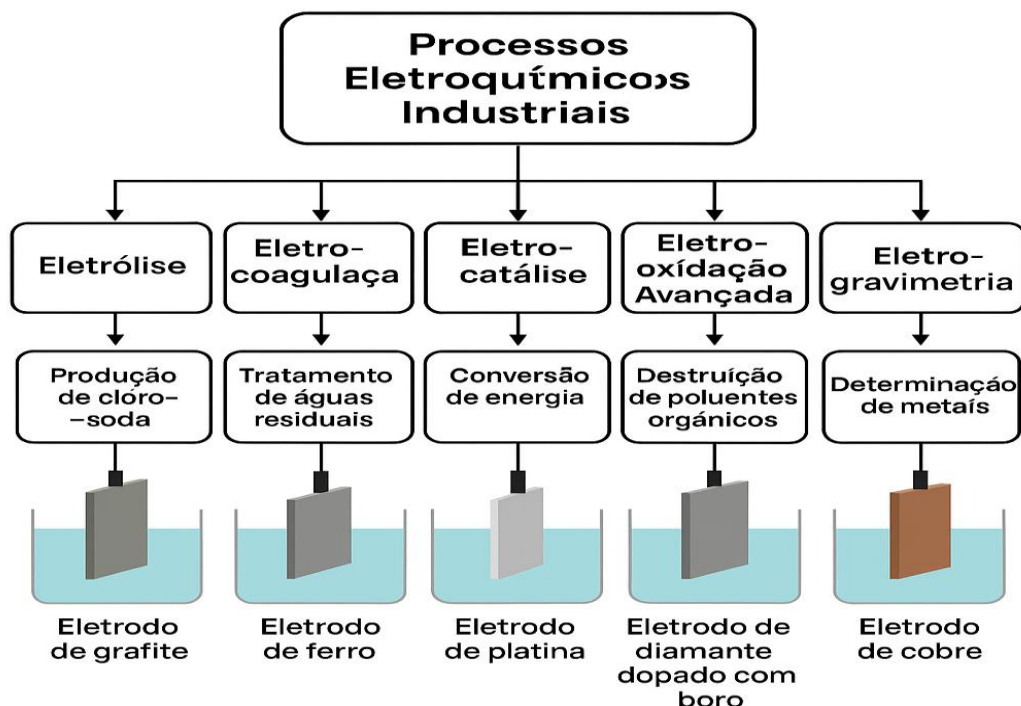
A eletrólise destaca-se como um dos processos mais clássicos, sendo amplamente utilizada na decomposição da água para geração de hidrogênio verde – combustível estratégico para a transição energética global (CHANG, 2022). Já a eletrocoagulação é aplicada no tratamento de águas residuárias industriais, onde eletrodos metálicos liberam íons que provocam a coagulação e posterior remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (BEHERA et al., 2022). Por sua vez, a eletrooxidação avançada, empregando ânodos como o

de diamante dopado com boro (BDD), é utilizada na degradação de poluentes emergentes, como fármacos e pesticidas, em estações de tratamento de água e efluentes (TIAN et al., 2022).

Outro processo relevante é a eletrocatalise, responsável por acelerar reações redox em eletrodos modificados por materiais catalíticos. Recentemente, tem-se investigado a eletroredução catalítica do CO_2 , convertendo este gás em produtos químicos como etileno, metano e álcoois, por meio da aplicação de potenciais controlados em eletrodos à base de cobre ou carbono nanoporoso (LEE et al., 2021). Estudos como os de Fu et al. (2022) comprovam o sucesso desse processo na conversão seletiva de CO_2 em etanol e acetato em reatores eletroquímicos pressurizados.

A Figura 10 apresenta um fluxograma esquemático dos principais processos eletroquímicos industriais, diferenciando-os quanto à finalidade e tipo de eletrodos empregados.

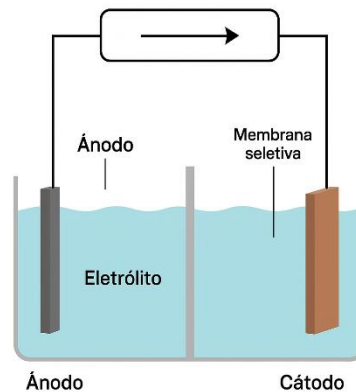
Figura 10 – Representação esquemática dos principais processos eletroquímicos industriais



Fonte: Autor, 2025.

As técnicas eletroanalíticas associadas a esses processos incluem a voltametria cíclica, a curva de polarização e a eletrogravimetria, essenciais para avaliar a eficiência electrocatalítica e os parâmetros operacionais do sistema. A Figura 11 ilustra o princípio básico de uma célula electroquímica convencional e suas principais zonas reativas.

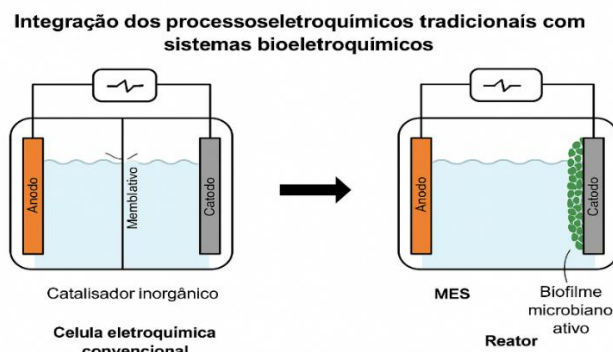
Figura 11 – Esquema simplificado de uma célula electroquímica convencional



Fonte: Autor, 2025.

Com o avanço da pesquisa aplicada, observa-se uma tendência crescente na integração de componentes biológicos aos sistemas electroquímicos tradicionais. Nesse cenário emergem os Sistemas Bioelectroquímicos (BESs) e, particularmente, a Eletrossíntese Microbiana (MES), onde microrganismos electroativos são explorados como biocatalisadores vivos no cátodo, participando ativamente da conversão de CO_2 em compostos orgânicos multicarbonados sob potenciais controlados (BEHERA et al., 2022).

Figura 12 – Integração dos processos electroquímicos tradicionais com sistemas bioelectroquímicos

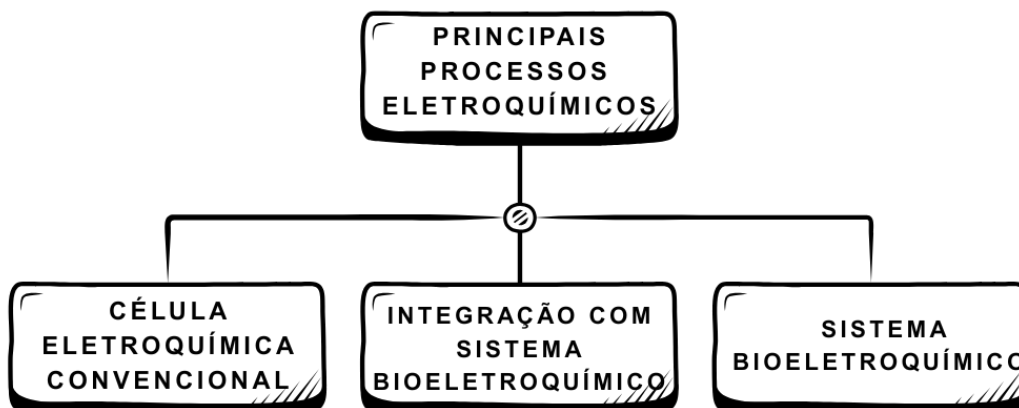


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 12 evidencia essa integração conceitual, contrastando processos eletroquímicos tradicionais com sistemas bioeletroquímicos modernos. A MES representa, assim, uma inovação no uso de processos eletroquímicos mediados biologicamente, oferecendo soluções sustentáveis para captura de carbono, produção de bioenergia e geração de compostos orgânicos de valor industrial (FU et al., 2022; CHANG, 2022). A aplicação desses sistemas reforça a importância da eletroquímica não apenas como ferramenta industrial clássica, mas também como estratégia inovadora frente aos desafios ambientais contemporâneos.

A figura 13 sintetiza de forma didática a transição evolutiva dos processos eletroquímicos industriais tradicionais até a incorporação de sistemas bioeletroquímicos. O diagrama evidencia como o conhecimento clássico, fundamentado em células eletroquímicas convencionais e processos como eletrólise, eletrocoagulação, eletrocatalise e eletrooxidação avançada, serve de base para o desenvolvimento de tecnologias mais complexas e sustentáveis. Essa progressão culmina na integração de componentes biológicos, como biofilmes microbianos, no cátodo das células, substituindo catalisadores inorgânicos e configurando sistemas bioeletroquímicos (BESs) e reatores de eletrossíntese microbiana (MES) (BEHERA et al., 2022; TIAN et al., 2022).

Figura 13 – Fluxograma integrativo dos conceitos abordados



Fonte: Autor, 2025.

Assim, conclui-se que os processos eletroquímicos constituem a base tecnológica essencial para o avanço da bioeletroquímica aplicada. A combinação entre fundamentos da engenharia eletroquímica e as inovações da biotecnologia permite a concepção de sistemas

híbridos, nos quais microrganismos atuam como catalisadores vivos, promovendo reações de conversão de CO₂ em compostos orgânicos de valor agregado. Essa convergência tecnológica representa uma estratégia promissora frente às demandas por processos industriais mais limpos, economicamente viáveis e ecologicamente sustentáveis (CHANG, 2022; FU et al., 2022). Nesse contexto, a eletrossíntese microbiana posiciona-se como uma aplicação inovadora dos princípios eletroquímicos clássicos, direcionada para a captura de carbono e mitigação dos impactos ambientais globais.

2.6 Eletrossíntese Microbiana

A eletrossíntese microbiana (MES) é um processo inovador que utiliza microrganismos como catalisadores catódicos para a redução eletroquímica de CO₂. Este método se destaca por suas vantagens significativas em relação aos catalisadores abióticos, incluindo alta seletividade, capacidade de autorregeneração e habilidade para produzir compostos orgânicos multicarbonados (Nevin et al., 2011; Salehizadeh et al., 2020). Desde o surgimento do conceito por volta de 2010, após a descoberta de que certos metanógenos e acetógenos podiam capturar elétrons do cátodo para produzir metano e acetato (Cheng & Logan, 2007), o MES tem ganhado crescente atenção nas áreas de valorização de CO₂ e armazenamento de energia renovável (Logan & Rabaey, 2012).

O desenvolvimento da MES tem sido impulsionado por avanços significativos no ajuste de materiais de eletrodos, descoberta de microrganismos eficazes e o entendimento dos mecanismos de transferência extracelular de elétrons (EET), além do desenvolvimento de novas configurações de reatores (Aryal et al., 2017; Krieg et al., 2014). Entre as várias técnicas de conversão de CO₂, como processos fotoeletroquímicos, fotocatalíticos, eletrocatalíticos, termocatalíticos e radiolíticos (Kumaravel et al., 2020; Behera et al., 2022; Ayyub & Rao, 2021; Zhang et al., 2022), a MES se destaca por permitir a transformação de CO₂ antropogênico e eletricidade renovável em produtos de alto valor agregado sob condições ambientais normais (Yau et al., 2022; Jadhav et al., 2022).

A escolha de materiais de eletrodos é crucial para a eficiência e seletividade dos produtos no processo de conversão de CO₂. Materiais carbonáceos são frequentemente preferidos devido à sua estabilidade química, área superficial eletroquimicamente ativa e biocompatibilidade (Lai et al., 2018). A técnica de adsorção física é comumente utilizada para imobilizar bactérias

nesses materiais, utilizando forças como interações de van der Waals e π - π , o que facilita a fixação de microrganismos (Chen et al., 2022).

Além disso, a integração de catalisadores nanométricos e o desenvolvimento de eletrodos tridimensionais têm mostrado melhorias significativas na eficiência dos processos MES. Esses avanços não apenas aumentam a área de superfície disponível para a atividade microbiana, mas também melhoram a transferência de massa e a condução de elétrons, resultando em taxas de conversão mais elevadas e maior seletividade de produtos. A otimização dos parâmetros operacionais, como a alimentação de CO_2 e as condições de operação do reator, também desempenha um papel fundamental na maximização do desempenho dos sistemas MES (Krieg et al., 2014; Lai et al., 2018).

Nos últimos dez anos, a pesquisa em MES alcançou marcos importantes com o desenvolvimento de diversos biocátodos que marcaram avanços tecnológicos significativos na área (Bajracharya et al., 2022; Marshall et al., 2012). Estes avanços estão esquematicamente representados na Figura 6, evidenciando a trajetória de inovação e aplicação do MES no contexto de uma economia mais verde e sustentável.

A cronologia apresentada na figura 14 demonstra o progresso significativo feito na conversão de CO_2 utilizando sistemas MES e eletrodos de carbono. A evolução dos métodos e a introdução de novas tecnologias e materiais mostram um caminho claro de avanços científicos e técnicos.

Figura 14 – Cronologia dos avanços na conversão de CO_2 por sistemas MES com eletrodos de carbono ao longo dos últimos 10 anos



Fonte: Autor, 2025.

Esses desenvolvimentos refletem a crescente capacidade de utilizar CO₂ como recurso para a produção de compostos valiosos, contribuindo para uma economia circular e mitigando os impactos ambientais das emissões de CO₂. A meta para 2025 de produzir licopeno a partir de CO₂ exemplifica o potencial dessas tecnologias para aplicações industriais sustentáveis.

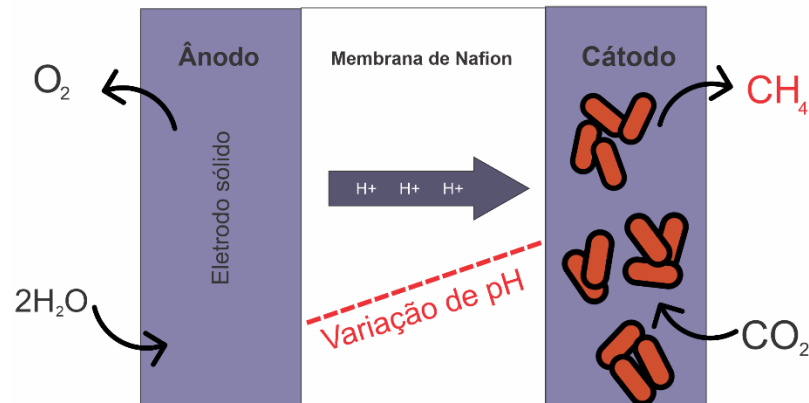
A Eletrossíntese Microbiana (MES) está despertando muito interesse no cenário laboratorial devido ao seu potencial promissor na transformação do CO₂ em produtos úteis. No entanto, ainda enfrentamos o desafio de desenvolver um plano abrangente que viabilize sua aplicação em larga escala (Larson, 2008). Recentemente, os pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de materiais de eletrodos mais acessíveis e à exploração das capacidades biotecnológicas da fixação microbiana de CO₂ para a produção de produtos químicos comercializáveis (Larson, 2008).

Os Sistemas Bioeletroquímicos (BESs), originalmente concebidos para o tratamento de águas residuais e geração de eletricidade, evoluíram para abranger uma gama mais ampla de aplicações, incluindo síntese química, biorremediação e recuperação de recursos (Rabaey & Rozendal, 2010). Esses sistemas têm demonstrado habilidade para converter resíduos de baixo valor ou CO₂ em combustíveis e produtos químicos de alto valor, tudo isso com um consumo mínimo de energia elétrica (Rabaey & Rozendal, 2010).

No contexto da MES, os BESs usam biocatalisadores catódicos para transformar os aceitadores de elétrons terminais em produtos úteis, contribuindo assim para uma gestão mais sustentável de resíduos e para a mitigação das mudanças climáticas (Rabaey & Rozendal, 2010). Além disso, a redução bioeletroquímica de CO₂, uma tecnologia autotrófica independente da biomassa, mostra-se promissora na produção de compostos orgânicos valiosos (Rabaey & Rozendal, 2010).

Estudos adicionais têm explorado diversos aspectos da MES, incluindo microbiologia, tecnologia e economia, assim como os mecanismos de transferência de elétrons e considerações práticas (Rabaey & Rozendal, 2010; Nevin et al., 2010). Nevin et al. foram pioneiros ao apresentar a primeira prova de conceito de MES como uma catálise microbiana de eletro-redução de CO₂ a compostos orgânicos multicarbonados, representando um avanço significativo na área (Nevin et al., 2010). Essa reação complexa envolve uma série de etapas, desde a oxidação no ânodo até a redução bioeletroquímica do CO₂ no cátodo, resultando na produção de produtos úteis como o acetato (Nevin et al., 2010).

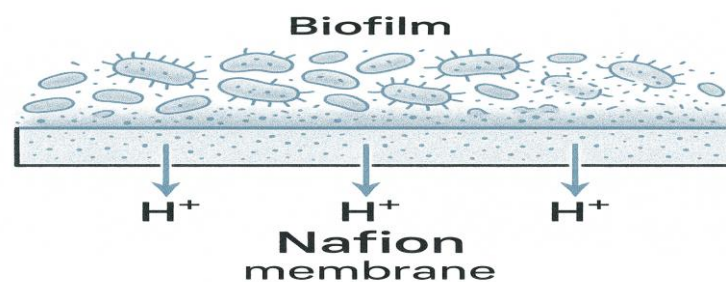
Figura 15 - Princípio da eletrossíntese microbiana no cátodo



Fonte: Autor, 2025.

Uma configuração típica de MES mostrada na figura 15 envolve duas câmaras distintas: uma câmara anódica abiótica e uma câmara catódica biótica, separadas por uma membrana de troca de prótons (PEM) mostrada na figura 8 (Rabaey & Rozendal, 2010). Nesse processo, as moléculas de água se dividem no ânodo em prótons, elétrons e oxigênio gasoso. O oxigênio é liberado da câmara anódica, enquanto os prótons migram para a câmara catódica através da PEM e os elétrons são direcionados para o cátodo por meio de um circuito externo (Das et al., 2019) e a membrana vai funcionar como um separador para evitar curto-circuito entre os eletrodos.

Figura 16 – Membrana de separação



Fonte: Readaptado pelo autor, a partir dos dados do Das et al, 2019.

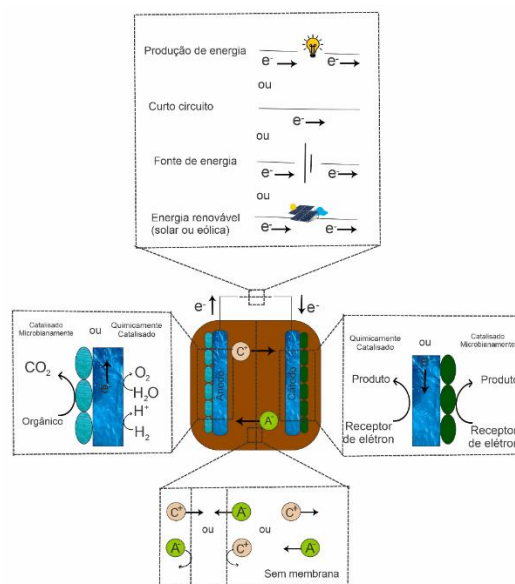
A figura 16 ilustra o desenvolvimento de um biofilme microbiano aderido à superfície de uma membrana de Nafion, destacando a liberação e transporte seletivo de prótons (H^+) através da membrana. A membrana de Nafion, composta por polímeros perfluorados sulfonados, é amplamente utilizada em sistemas bioeletroquímicos por suas propriedades de condutividade iônica, seletividade e resistência química. Sua estrutura permite a passagem controlada de

prótons enquanto atua como barreira física ao oxigênio e outros íons, favorecendo o equilíbrio eletroquímico entre as câmaras do reator e a manutenção da atividade metabólica do biofilme aderido (LIU et al., 2023; AL-MAMUN et al., 2023). Essa configuração é essencial para garantir a eficiência de processos como a eletrossíntese microbiana e o funcionamento otimizado de biocátodos.

Na câmara catódica, os elétrons e os prótons, ou portadores de energia como o hidrogênio (H_2) e o CO_2 , são combinados por biocatalisadores para produzir predominantemente ácidos graxos voláteis (VFAs), como formiato, acetato e butirato, por meio de transferência de elétrons mediada por H_2 ou transferência direta de elétrons (DET) (Bian et al., 2020). Este processo de MES, de certa forma, imita a fotossíntese natural, especialmente quando a energia elétrica externa é proveniente de fontes renováveis, como a energia solar (Rabaey & Rozendal, 2010).

Embora os acetógenos, seguindo a via de Wood-Ljungdahl (WL) para a fixação de CO_2 , tenham sido os principais biocatalisadores utilizados no cátodo dos sistemas MES, outros produtos químicos orgânicos com maior teor de carbono, como propionato, butirato, etanol, isopropanol, caproato e caprilato, também foram sintetizados a partir de CO_2 alimentado via MES (Das et al., 2020). Esses produtos químicos, denominados eletrocommodities, podem ser considerados como uma alternativa aos produtos químicos tradicionais, reduzindo assim a dependência de recursos não renováveis, como o petróleo bruto, e contribuindo para uma economia mais sustentável (Parry et al., 2007; Rabaey & Rozendal, 2010).

Figura 17 - Esquema de Funcionamento de um Sistema Bioeletroquímico (BES)



A figura 17, representa um esquema de um sistema bioeletroquímico (BES) para a conversão de CO₂ em produtos de base biológica. O esquema inclui várias partes e processos que ocorrem dentro deste sistema. A parte superior da imagem mostra diferentes formas de produção de energia usando o movimento de elétrons (e⁻). As opções incluem a produção direta de energia (exemplificada por uma lâmpada acendendo), curto-circuito, utilização como fonte de energia ou energia renovável (solar ou eólica).

No centro da figura 17, está o diagrama de uma célula bioeletroquímica com dois compartimentos, o ânodo e o cátodo, separados por uma membrana seletiva. A membrana seletiva permite a passagem de íons (C⁺ e A⁻) enquanto impede a mistura direta dos compostos anódicos e catódicos, garantindo a separação das reações redox.

Este esquema representa a operação básica de um sistema bioeletroquímico que pode ser utilizado para várias aplicações, incluindo a conversão de CO₂ em produtos úteis, tratamento de águas residuais, e geração de energia renovável. Os sistemas BES utilizam a capacidade de certos microorganismos para transferir elétrons, aproveitando processos biológicos e eletroquímicos para atingir esses objetivos de maneira eficiente e sustentável.

Esta figura 17, ilustra a complexidade e a integração de diferentes processos físico-químicos e biológicos que ocorrem em um BES, destacando a importância do design dos componentes do sistema e a gestão eficiente dos recursos energéticos.

2.7 Microorganismo Eletroquimicamente Ativo

Os sistemas bioeletroquímicos (SBEs) são uma ponte inovadora entre a microbiologia e a eletrônica, explorando o potencial das bactérias eletroquimicamente ativas (BEAs) para transformar a energia química de substratos orgânicos e inorgânicos em energia elétrica durante a respiração anaeróbia. Esta conversão é facilitada por caminhos metabólicos que as BEAs utilizam para transferir elétrons aos eletrodos ou por meio de mediadores em dispositivos como células combustível microbianas (MFCs), conforme explorado por Vassilev et al. (2018) e Lee et al. (2021).

O processo, conhecido como biotransformação e descrito por Schröder (2007), é essencial tanto para a produção de energia quanto para a manutenção da vida microbiana. A equação que Schröder apresentou:

$$\Delta G_{SBE}^0 = \Delta G_{TOTAL}^0 - \Delta G_{biol}^0$$

ΔG_{SBE}^0 é a energia do sistema

ΔG_{TOTAL}^0 é a energia total

ΔG_{biol}^0 é a energia biológica

Na prática, como no caso do tratamento de melaço de cana-de-açúcar, os SBEs aproveitam esse subproduto rico em açúcares para otimizar a conversão de energia química em elétrica. A eficácia dessa conversão depende crucialmente do equilíbrio entre a energia gerada e a energia consumida pelos microrganismos para crescimento e manutenção, um fator determinante tanto para a eficiência energética quanto para a eficácia do tratamento de efluentes, como destacado por Lee et al. (2021).

Os SBEs são versáteis e podem ser configurados para diversas aplicações, incluindo a produção de bioeletricidade, hidrogênio e biocompostos como biometano e bioálcool. Sua integração com tecnologias fotovoltaicas em células solares microbianas ou sua utilização em processos de dessalinização ressalta seu potencial sustentável e aplicabilidade industrial e tecnológica (Tahir et al., 2021).

Em termos de escolha de substratos, os microrganismos em SBEs que utilizam melaço de cana-de-açúcar selecionam cuidadosamente seus doadores e aceptadores de elétrons baseando-se nos potenciais redox. Eles preferem aceptadores com altos potenciais para maximizar a captação de energia, especialmente em ambientes onde aceptadores solúveis são escassos, levando-os a recorrer à transferência de elétrons extracelular (TEE) para utilizar aceptadores insolúveis como ânodos nos SBEs, uma dinâmica eficazmente apoiada pelos estudos de Pant et al. (2012) e Lovley (2011).

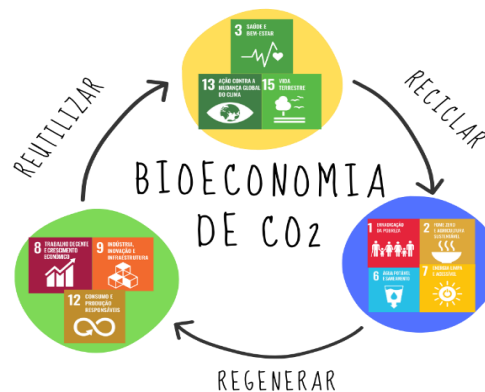
Essa TEE é viabilizada por estruturas e moléculas especializadas na superfície celular, como citocromos e nanofios, essenciais para a eficiente transferência de elétrons ao eletrodo. Esses centros redox não apenas facilitam a transferência de elétrons, mas também refletem uma adaptação evolutiva que capacita os microrganismos a explorarem uma vasta gama de ambientes e condições metabólicas. Ao otimizar o potencial redox e a transferência de elétrons, os pesquisadores podem melhorar significativamente a produção de energia e a eficiência do tratamento nos SBEs, contribuindo para processos mais sustentáveis e eficazes.

2.8 Economia Circular

A transição para uma economia mais sustentável é uma necessidade urgente diante do avanço industrial e do conseqüente aumento da poluição e das emissões de CO₂ (Gul & Ahmad, 2019). Nesse contexto, a eletrossíntese microbiana surge como uma alternativa promissora para enfrentar esses desafios e promover a sustentabilidade econômica e ambiental (Pant et al., 2010).

Os sistemas bioeletroquímicos (BES), mas, precisamente os de Eletrossíntese Microbiana (MES) são exemplos concretos dessa abordagem, oferecendo uma maneira eficiente de transformar resíduos em produtos valiosos de base biológica, ao mesmo tempo em que reciclam o CO₂ (McArthur, 2013). Esses sistemas operam de acordo com os princípios da economia circular, maximizando a eficiência na utilização de recursos e minimizando a geração de resíduos (Venkata Mohan et al., 2019).

Figura 18 - Demonstração da bioeconomia circular, onde o dióxido de carbono (CO₂) é transformado em um processo lógico e sustentável



Fonte: Autor, 2025.

Ao contrário da economia linear tradicional, que se baseia no conceito de "retirar-fazer-usar-descartar", a economia circular mostrada na figura 18 promove a reutilização, reciclagem e regeneração de recursos (Philp & Winickoff, 2018). Essa abordagem busca fechar o ciclo de vida dos materiais, maximizando o aproveitamento dos recursos disponíveis (Heimann, 2019).

No contexto da eletrossíntese microbiana, a economia circular é promovida através da utilização eficiente de CO₂ como substrato para a produção de produtos de base biológica de alto valor agregado (Glaven, 2019). Essa abordagem contribui para a mitigação das mudanças climáticas e o desenvolvimento de uma bioeconomia sustentável, alinhada com os objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas (UN). Assim, os sistemas bioeletroquímicos representam uma importante ferramenta na transição para uma economia circular, integrando eficientemente diversos bioprocessos e promovendo o uso sustentável de recursos (Gul & Ahmad, 2019; Pant et al., 2010; McArthur, 2013; Venkata Mohan et al., 2019; Philp & Winickoff, 2018; Heimann, 2019; Glaven, 2019).

Além de suas vantagens ambientais, a aplicação da economia circular na eletrossíntese microbiana também traz benefícios econômicos significativos. A produção de biocombustíveis e bioplásticos a partir de CO₂ não apenas reduz a dependência de recursos fósseis, mas também cria novos mercados e oportunidades de emprego nas indústrias verdes (McArthur, 2013). Esta abordagem holística integra sustentabilidade ambiental com viabilidade econômica, promovendo uma transição suave para uma economia mais resiliente e inovadora (Gul & Ahmad, 2019). A implementação de políticas de incentivo e investimento em tecnologias bioeletroquímicas é essencial para acelerar essa transição e alcançar os objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

Desenvolver e otimizar um sistema bioeletroquímico (BES) para captura de dióxido de carbono (CO₂) e caracterizar o melaço como meio reacional da eletrossíntese microbiana com sua conversão em materiais energéticos e outros produtos valiosos, promovendo uma abordagem sustentável e contribuindo para a mitigação do aquecimento global e a promoção da economia circular.

3.2 Objetivos Específicos

- Investigar e otimizar os parâmetros operacionais do sistema bioeletroquímico para maximizar a eficiência na conversão de CO₂ em produtos de valor agregado.
- Identificar e caracterizar as espécies de bactérias eletrossensíveis mais eficazes, como *Geobacter* e *Shewanella*, para o processo de eletrossíntese microbiana.
- Utilizar PCA para correlacionar os dados obtidos de diferentes análises experimentais, destacando as variáveis mais influentes no desempenho da eletrossíntese microbiana.
- Analisar a diversidade microbiana e identificar OTUs compartilhadas e exclusivas nas comunidades de biofilmes formados durante o processo de eletrossíntese.
- Realizar análises de voltametria cíclica para determinar os potenciais redox e a atividade electrocatalítica das bactérias eletrossensíveis nos sistemas bioeletroquímicos.
- Realizar análises de FTIR para identificar as ligações químicas e compostos presentes nos biofilmes, fornecendo insights sobre a composição bioquímica e as mudanças estruturais no sistema.
- Promover a transformação de resíduos industriais, como o melaço de cana, em recursos valiosos através da eletrossíntese microbiana, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade ambiental.

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Eletroquímica e Microsistemas de Análise (LEMAN) na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), campus A.C Simões. Este estudo se concentrou na utilização de sistemas bioeletroquímicos (BES) para a conversão de CO₂ em produtos de base biológica, com o melaço de cana-de-açúcar como meio reacional.

O melaço de cana-de-açúcar foi fornecido pela Usina Caeté, localizada na Fazenda Rua São João, S/N - Zona Rural, São Miguel dos Campos. Este melaço apresenta características físico-químicas específicas essenciais para os estudos realizados. Abaixo estão descritos os detalhes destes parâmetros:

- Acidez Total: 1,2 g/kg de ácido acético. Este nível de acidez é crucial para manter um ambiente que favoreça a atividade das bactérias eletroquimicamente ativas, sem inibir seu crescimento ou funcionalidade.
- Brix: 82%. Esta medida de sólidos solúveis indica uma alta concentração de açúcares no melaço, fundamental para fornecer energia e nutrientes necessários para as bactérias.
- Sacarose: 39,9% m/m. A presença significativa de sacarose é vital para o metabolismo das bactérias, influenciando diretamente a eficiência do processo de conversão de energia.
- pH: 5,7. O pH levemente ácido do melaço contribui para a estabilidade do meio reacional, favorecendo as condições ótimas para a atividade microbiana.
- Frutose: 7,5% m/m e Glucose: 5,5% m/m. Estes açúcares simples são rapidamente metabolizados pelas bactérias, facilitando a produção de elétrons e a eficiência dos sistemas bioeletroquímicos.

Além destes parâmetros, o melaço de cana-de-açúcar também apresenta:

- Umidade: 18%. A umidade adequada é importante para manter a fluidez e a facilidade de manuseio do melaço.
- Proteínas: 2-3%. Embora em menor quantidade, as proteínas presentes no melaço podem influenciar o metabolismo bacteriano.
- Cálcio: 1-2 g/kg. O cálcio é um micronutriente essencial para o crescimento bacteriano e pode influenciar a atividade enzimática.

- Potássio: 3-5 g/kg. O potássio é um eletrólito importante que pode afetar a condução elétrica no meio reacional.
- Magnésio: 0,5-1 g/kg. O magnésio é crucial para a estabilidade das membranas celulares e a atividade de várias enzimas.

O melaço oferece um ambiente rico e controlado para a análise da atividade das bactérias eletroquimicamente ativas em sistemas bioeletroquímicos. Estes parâmetros garantem a consistência do meio reacional ao longo de todos os experimentos, permitindo avaliações precisas do processo de conversão de energia.

4.1 Prospecção Tecnológica

A prospecção tecnológica desenvolvida neste estudo teve como objetivo analisar tendências e aplicações emergentes da eletrossíntese microbiana voltada ao 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.

- 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.

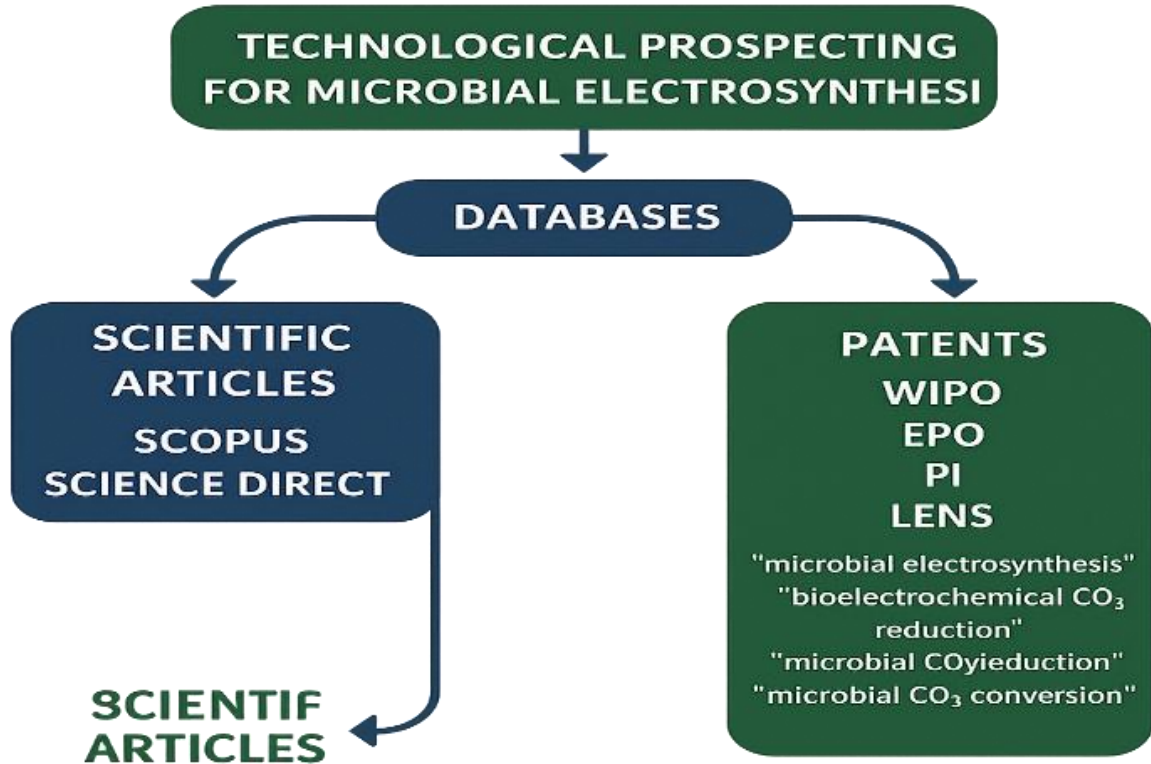
- Análise de documentos de patente

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 (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, mostrada na figura 19, permitiu ainda o mapeamento dos principais países depositantes e das rotas tecnológicas em consolidação.

Figura 19 – Metodologia utilizada para pesquisa de patentes.



Fonte: Autor, 2025.

4.2 Preparo, Cultivo E Padronização Do Inóculo

O cultivo bacteriano foi realizado utilizando microrganismos do gênero *Bacillus*, conhecidos por sua resistência e adaptação a condições redox variadas, além de sua habilidade de realizar transferência de elétrons extracelular, característica fundamental nos processos de eletrossíntese microbiana. Essas bactérias foram previamente isoladas de amostras de efluentes industriais, conforme a metodologia de Oliveira et al. (2020).

➤ **Equipamentos**

- Incubadora BOD (Biochemical Oxygen Demand) para controle da temperatura durante a incubação das culturas bacterianas.
- Câmara de fluxo laminar para manipulação e preparação das amostras microbiológicas.
- Placas de Petri e meio de cultura NYDA (Nutrient Yeast Dextrose Agar), utilizados para o cultivo das colônias bacterianas.
- Sistema de bioeletroquímico composto por ânodo e cátodo de carbono, membrana de Nafion, e sensores para monitoramento da produção de bioeletricidade.
- Espectrofotômetro para quantificação do crescimento bacteriano e análise de produtos metabólicos gerados.
- Microscópio óptico para observação das culturas bacterianas após os testes de coloração de Gram.

➤ **Produtos e Reagentes**

- Sacarose e glicose, utilizadas como fontes de carbono suplementares.
- KOH 3% para realização do teste de solubilidade em KOH (teste de Ryu).
- Cristal violeta, solução de Lugol, etanol absoluto e fucsina de Gram para a coloração de Gram das colônias bacterianas.

➤ **Preparação das Amostras**

O melaço de cana-de-açúcar foi diluído em soluções estéreis de água destilada nas proporções de 1:1, 1:10, 1:50 e 1:100, com o intuito de simular diferentes condições de concentração do substrato. Essas amostras foram semeadas em placas de Petri contendo o meio de cultura NYDA, sendo utilizadas alças de Drigalski para espalhar uniformemente as amostras sobre as placas.

➤ **Incubação e Cultivo**

As placas de Petri com as amostras inoculadas na figura 20, foram incubadas na incubadora BOD a 30°C por 72 horas. Durante este período, foram realizadas observações diárias para monitoramento do crescimento das colônias bacterianas.

Figura 20 - Diluição e semeadura do efluente.



Fonte: Autor, 2025.

➤ Testes Bioquímicos

Após o período de incubação, as colônias bacterianas foram submetidas aos seguintes testes para a caracterização microbiológica:

- **Teste de Solubilidade em KOH (Teste de Ryu):** A solução de KOH foi aplicada nas colônias isoladas e, após 30 segundos de reação, foi observada a formação de fios viscosos, indicando a presença de bactérias Gram-positivas.
- **Coloração de Gram:** As colônias bacterianas foram espalhadas sobre lâminas de vidro, secadas e coradas com cristal violeta, solução de Lugol, etanol e fucsina de Gram. A observação foi realizada em microscópio óptico para identificação morfológica e classificação bacteriana.

➤ Extração de DNA Genômico

Para a extração do DNA genômico, as colônias bacterianas foram transferidas para tubos de Eppendorf, adicionando-se 567 μ L de tampão TE 1X. A extração foi realizada seguindo o

protocolo descrito por Oliveira et al. (2020), utilizando soluções de SDS a 10% e proteinase K, seguida de centrifugação e purificação com clorofórmio/álcool isoamílico. Após a purificação, o DNA foi quantificado e preparado para a amplificação por PCR.

➤ **Amplificação do DNA**

A amplificação da região do gene 16S rRNA foi realizada utilizando os primers 27F (AGAGTTTGATCMTGGCTCAG) e 1492R (TACGGYTACCTTGTTACG), conforme metodologia descrita por Weisburg et al. (1991). As condições de PCR incluíram uma etapa de desnaturação inicial a 94°C por 5 minutos, seguida de 35 ciclos a 94°C por 1 minuto, a 58°C por 1 minuto para anelamento e a 72°C por 2 minutos para extensão, com uma etapa final de extensão a 72°C por 5 minutos.

4.3 Análise Da Comunidade Microbiana

Para a análise comparativa das comunidades microbianas, utilizamos diagramas de Venn para visualizar a sobreposição das OTUs entre as diferentes amostras. Utilizamos os softwares Mothur e Venny para realizar essas análises. A análise de componentes principais (PCA) foi conduzida utilizando o software XLSTAT 2018, permitindo explorar a matriz de abundância de OTUs. Esta abordagem nos permitiu visualizar as relações filogenéticas e a distribuição das populações eubacterianas mais representativas nas amostras coletadas. A combinação de diagramas de Venn e PCA proporcionou uma visão abrangente das mudanças na composição microbiana ao longo do experimento, demonstrando a adaptação e evolução das comunidades em resposta às condições eletroquímicas aplicadas nos reatores.

4.4 Configurações Do Reator Bioeletroquímico

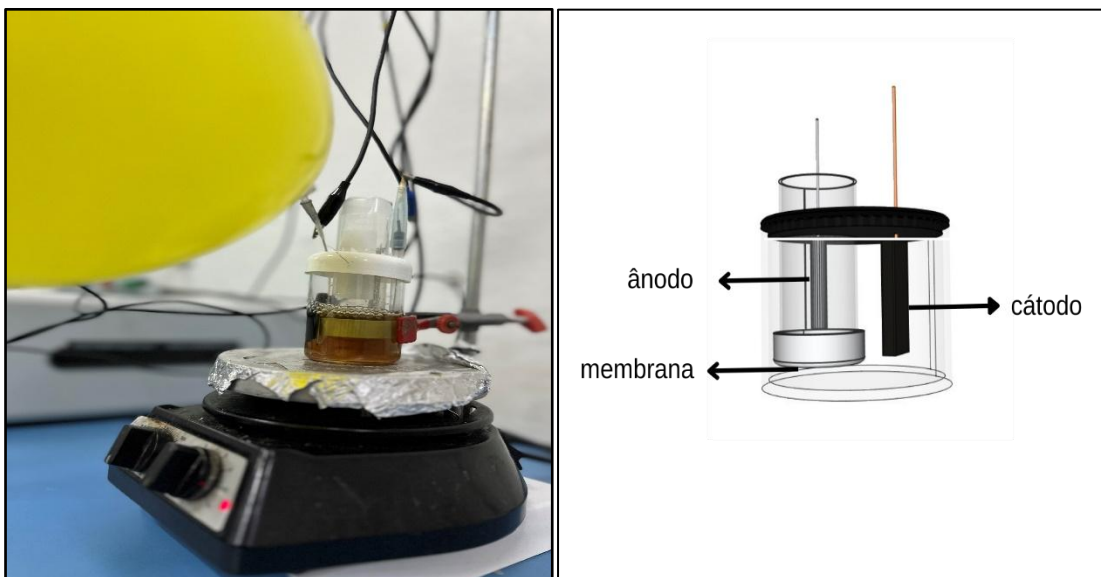
Para este estudo, foram configurados dois reatores bioeletroquímicos, identificados como RAF1 e RAF2 como evidenciado na figura 21, utilizando frascos modificados de Duran® de 250 mL. Cada reator foi estruturado com uma câmara anódica de acrílico com capacidade de 60 mL, contendo um contra-eletródo de platina centralizado. A tampa multiconexões permitia interações controladas com o ambiente externo.

A câmara catódica ocupava o restante do frasco, compreendendo um volume efetivo de 190 mL. Nesta câmara, foi instalado um eletródo de feltro de carbono com uma área de superfície exposta de 20 cm² e espessura de 0,5 cm, fixado à parede do frasco e conectado externamente por um fio de titânio. A separação entre as duas câmaras era feita por uma

membrana de troca iônica Nafion®, previamente preparada para garantir a eficiência do reator. O tratamento preliminar da membrana incluía uma limpeza com peróxido de hidrogênio a 3% a 80 °C por uma hora para remover resíduos orgânicos, seguida de várias lavagens com água Milli-Q aquecida para eliminar peróxido residual.

Além disso, a membrana era tratada em uma solução de H_2SO_4 0,5 mol L^{-1} a 80 °C para remover impurezas metálicas, sendo posteriormente armazenada em água Milli-Q até o momento do uso.

Figura 21 - Imagem da configuração do reator



Fonte: Autor, 2025.

O ambiente para o crescimento bacteriano no estudo foi uma solução tampão de fosfato (PBS), composta por: 0,33 g de KH_2PO_4 , 0,45 g de K_2HPO_4 , 1 g de NH_4Cl , 0,1 g de KCl , 0,8 g de NaCl e 0,2 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ por litro. Os experimentos no sistema eletrossintético microbiano (MES) iniciaram com a injeção de uma cultura bacteriana heterotrófica no cátodo, usando 20 mM de frutose em 500 mL de solução catódica com 10% de inóculo por volume. O reator foi inicialmente configurado em modo batelada com um potencial de cátodo de -0,6 V referente ao $\text{Ag}/\text{AgCl}(\text{s})/\text{Cl}^-$. Paralelamente, realizou-se um teste controlado de injeção de CO_2/ar utilizando cronoamperometria para registrar a corrente sob um potencial constante aplicado.

Observou-se que durante a fase de crescimento, o católito ficou turvo, indicando a atividade do biocatalisador. Foram conduzidos testes de polarização em potenciais de -0,6 V a -1 V para proporcionar tempo adequado para a completa adaptação das bactérias ao ambiente

eletroquímico ao longo de 20 dias. O meio foi mantido em agitação constante a 200 rpm com um agitador magnético e a temperatura controlada em 25°C. Os ensaios eletroquímicos foram efetuados usando um potenciostato, com dados de corrente coletados a cada 600 segundos por meio de cronoamperometria. As curvas de polarização foram geradas utilizando voltametria em escada, com cada nível de tensão (0,6, 0,8 e 1 V) mantido por duas horas para minimizar quaisquer efeitos de corrente capacitiva. Além disso, foram realizados experimentos de voltametria cíclica diretamente dentro do reator para analisar mais profundamente as interações eletroquímicas do sistema.

4.5 - Infravermelho Com Transformada De Fourier (FTIR)

A análise espectroscópica na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada para validar a captura de CO₂ e evidenciar dessa forma a presença de compostos orgânicos na solução, com foco em avaliar a eficiência da eletrossíntese microbiana.

As amostras analisadas incluíram o sistema antes do processo eletroquímico para identificar a estrutura de base do meio biológico reacional, e sistema durante e pós a MÊS. Vale ressaltar que as reações finalizadas tanto do RAF1 e do RAF2 foram posteriormente envolvidas num sistema de extração líquido-líquido com éter. A análise de FTIR foi realizada utilizando um espectrômetro da Perkin Elmer, modelo Spectrum 100 Series, operando na faixa de 650 – 4000 cm⁻¹. O acessório utilizado foi de Reflexão Total Atenuada (ATR), constituído por um cristal misto de Diamante/ZnSe, que permite uma melhor interação da radiação infravermelha com as amostras, proporcionando espectros de alta qualidade.

Espera-se que os espectros FTIR forneçam informações detalhadas sobre as interações químicas do biocátodo, bem como os efeitos dessas interações. Os resultados podem revelar alterações nos picos característicos, indicando a formação de novas ligações químicas ou a modificação das existentes.

4.6 Voltamétria Cíclica (VC)

Para caracterizar o comportamento eletroquímico das amostras de melão utilizado neste estudo, foram realizados ensaios de voltametria cíclica. As análises tiveram como objetivo avaliar os processos redox associados aos compostos presentes no melão e sua interação com

o eletrodo de trabalho, no contexto dos processos de eletrossíntese microbiana e captura de CO₂.

Os experimentos foram conduzidos utilizando um Potenciostato/Galvanostato Autolab PGSTAT204, em uma célula eletroquímica configurada com três eletrodos, composta por um eletrodo de trabalho de feltro de carbono, um eletrodo de referência Ag/AgCl e um eletrodo auxiliar de platina. A solução eletrolítica utilizada foi preparada com tampão fosfato 50 mM, ajustado para pH 7,0, sendo as amostras de melaço previamente diluídas nesta solução antes das análises.

A faixa de potencial aplicada durante os ensaios foi de -1,4 V a 0,0 V em relação ao eletrodo de referência Ag/AgCl, com uma taxa de varredura estabelecida em 1 mV/s. Todos os experimentos foram realizados em triplicata, a fim de garantir a reprodutibilidade dos dados obtidos. Os gráficos de corrente específica (A.m⁻²) em função do potencial catódico foram registrados e utilizados para posterior interpretação dos processos eletroquímicos ocorridos no sistema bioeletroquímico avaliado.

4.7 Cromatografia Gasosa Acoplada À Espectrometria De Massas (GC-MS)

Para a identificação dos compostos formados durante a eletrossíntese microbiana aplicada à captura de CO₂, as amostras líquidas finais foram analisadas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS). As amostras foram previamente filtradas em membranas de 0,22 µm para remoção de células e partículas em suspensão. Em seguida, 1 µL de cada amostra filtrada foi injetado em um sistema GC-MS Agilent 5977 Single Quadrupole, equipado com software MassHunter B.07.06.2704. As análises foram conduzidas utilizando coluna capilar DB-5MS (30 m x 0,25 mm x 0,25 µm), empregando gás hélio como fase móvel a 1 mL/min.

O programa de temperatura do forno consistiu em aquecimento inicial a 40°C por 2 minutos, seguido de incremento de 10°C/min até 280°C, permanecendo nesta temperatura por 10 minutos. A identificação dos compostos presentes foi realizada por comparação dos espectros obtidos com as bibliotecas NIST11.L, WILEY7N.L e ESSENTIALOILS-23P.L. Os dados foram processados com base nos cromatogramas de íons totais (TIC), avaliando os tempos de retenção e os espectros de massa característicos de cada composto.

4.8 Monitoramento Do Eletrodo Com Microscópio Digital

Ao longo de todas as etapas experimentais, utilizou-se um microscópio digital USB profissional 1600x (2 MP) para acompanhar visualmente o eletrodo de feltro de carbono. Esse monitoramento teve como finalidade avaliar as alterações ocorridas na superfície do eletrodo durante sua exposição ao meio reacional à base de melação de cana.

As análises foram realizadas em três momentos distintos:

- Antes do início do processo eletroquímico, o eletrodo foi inspecionado para caracterização da superfície inicial, permitindo identificar o aspecto limpo do feltro de carbono e possíveis imperfeições pré-existentes.
- Durante o experimento, o eletrodo foi removido periodicamente do sistema eletroquímico para registro das modificações visuais provocadas pelo contato contínuo com o meio reacional. Esse acompanhamento possibilitou observar, em tempo real, a formação de resíduos, biofilmes ou alterações na textura da superfície.
- Após o término do processo, o eletrodo foi lavado suavemente e submetido à secagem em estufa, a 50 °C por 50 minutos, garantindo a remoção da umidade residual e permitindo a observação final da superfície seca. Nesse estágio, buscou-se identificar depósitos sólidos, incrustações ou danos estruturais provocados pelo processo eletroquímico.

Todas as imagens obtidas durante o acompanhamento foram documentadas e comparadas, possibilitando uma avaliação detalhada da evolução superficial do eletrodo ao longo do experimento. O uso do microscópio digital foi essencial para a identificação visual de alterações que, de outra forma, poderiam passar despercebidas, contribuindo para uma análise mais precisa dos efeitos físicos e químicos gerados pela interação eletrodo–meio reacional.

4.9 Análise Estatística

Os dados obtidos nos experimentos foram analisados utilizando o software estatístico R. Foram realizados cálculos de médias e desvios padrão para avaliar a variabilidade dos

resultados obtidos. Para comparação entre as diferentes concentrações de melão e suas influências no crescimento bacteriano e na geração de bioeletricidade, foram aplicados testes de comparação de médias. Todas as análises foram realizadas em triplicata, considerando-se nível de significância de $p < 0,05$ para determinação de diferenças estatísticas significativas entre os grupos experimentais.

V. RESULTADOS

5.1 Prospecção

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 4 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 a 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 et al., 2020).

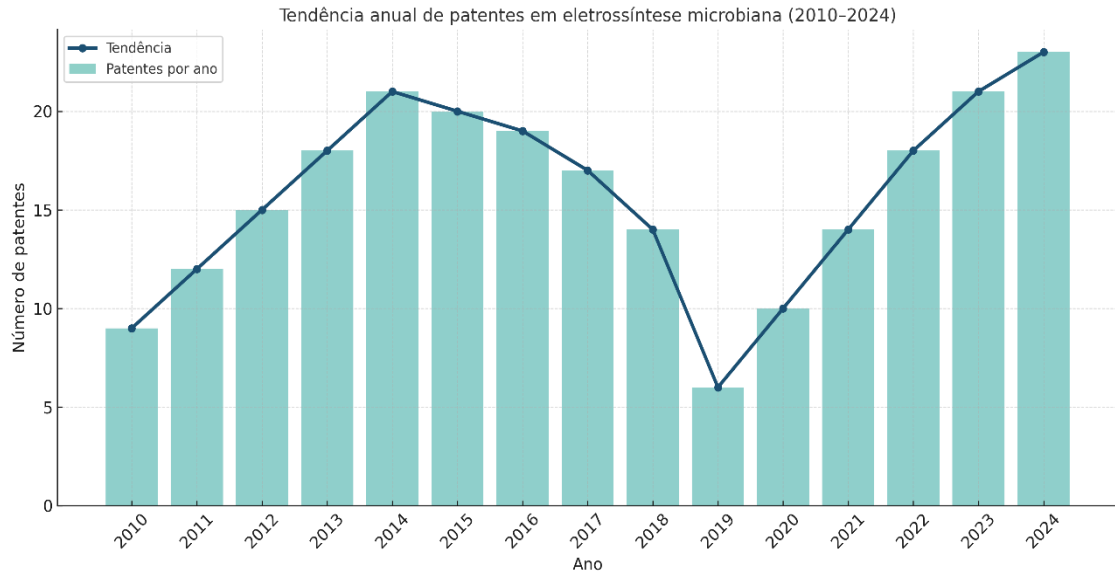
Tabela 4 – Número de patentes e documentos encontrados segundo as palavras-chave por base de dados

PALAVRAS-CHAVE	BANCO DE DADOS				
	INPI	WIPO	EPO	PI	LENS
"eletrossíntese microbiana" AND "CO ₂ "	1	9	3	3	2
"microbial electrosynthesis" AND "CO ₂ sequestration"	-----	2	6	9	17
"microbial electrosynthesis" AND "carbon dioxide capture"	-----	16	21	8	11
"bioelectrochemical system" AND "CO ₂ fixation"	-----	25	19	12	15
TOTAL	1	52	49	32	45

Fonte: Autor,2025.

A Figura 22 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).

Figura 22 – Número de patentes em relação ao ano de deposição



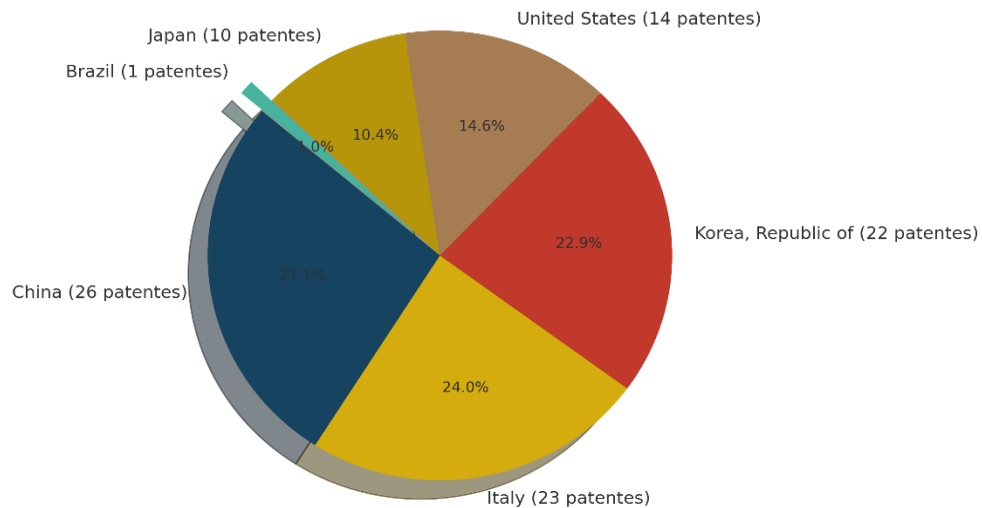
Fonte: Autor, 2025.

Além disso, pode-se observar uma correlação entre os picos de depósito de patentes e a realização de eventos científicos internacionais, como os simpósios sobre sistemas bioeletroquímicos promovidos pela International Society for Microbial Electrochemistry and Technology (ISMET). Esses eventos não apenas contribuem para o intercâmbio de conhecimento técnico-científico, mas também servem como ambientes de networking entre pesquisadores e representantes da indústria, estimulando novas demandas e oportunidades de inovação (NEVIN et al., 2011).

A Figura 23 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 à 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 23 – Distribuição de patentes por país

Distribuição de patentes por país relacionadas à eletrossíntese microbiana (Figura 3)



Fonte: Autor,2025.

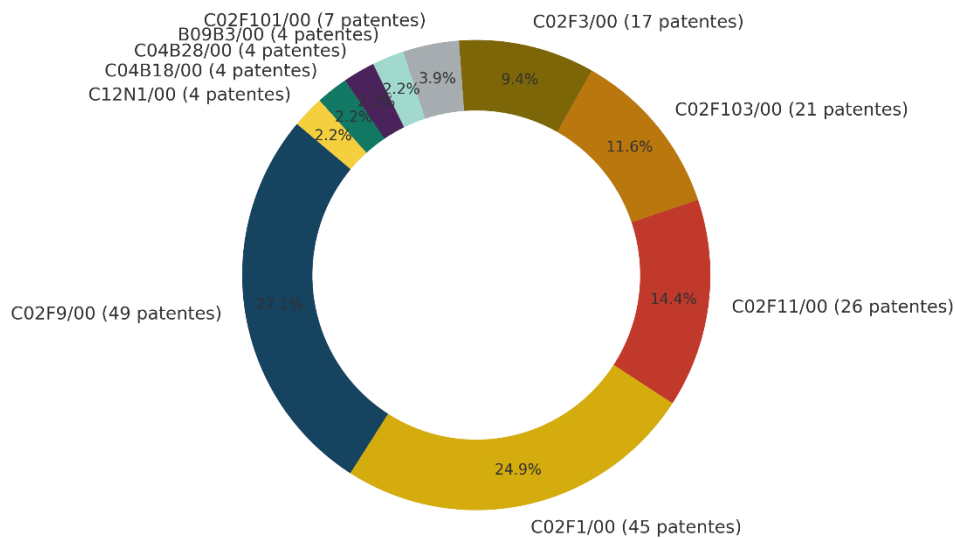
Essa liderança da China pode ser explicada por estratégias nacionais que articulam política industrial, inovação tecnológica e segurança energética. Documentos como o 14º Plano Quinquenal Chinês enfatizam o papel das tecnologias verdes, e dentro desse escopo, a bioeletrônica ambiental figura como prioridade. 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 à 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 24 apresenta a classificação internacional de patentes (CIP) dos registros encontrados, e revela a concentração em subclasses voltadas à 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.

Figura 24 - Número de patentes em relação à classificação internacional de patentes (CIP)



Fonte: Autor,2025.

A tabela 5, apresenta um levantamento quantitativo de publicações científicas relacionadas à eletrossíntese microbiana voltada ao 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.

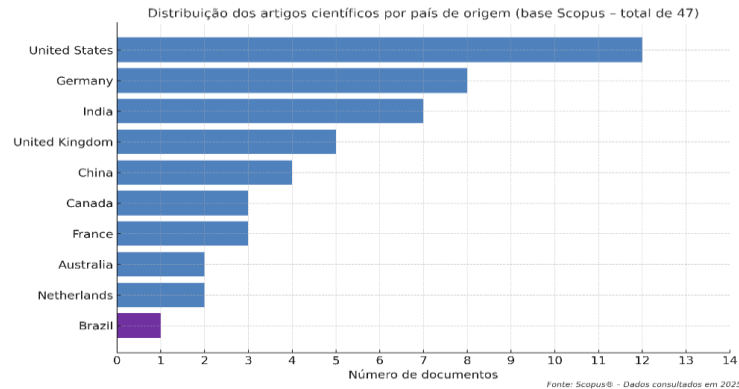
Tabela 5 – Número de artigos recuperados a partir das palavras-chave por base de periódicos

PALAVRAS-CHAVE	SCIENCE DIRECT	SCOPUS
"eletrossíntese microbiana" AND "CO ₂ "	32	4
"microbial electrosynthesis" AND "CO ₂ sequestration"	10	31
"microbial electrosynthesis" AND "carbon dioxide capture"	5	3
"bioelectrochemical system" AND "CO ₂ fixation"	25	9
TOTAL	72	47

Fonte: Autor,2025.

A Figura 25, 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 à conversão de CO₂ por vias biotecnológicas. Na sequência, observam-se contribuições relevantes de países europeus e asiáticos, como Alemanha (8), Índia (7) e Reino Unido (5). A China figura com 4 registros, e outras nações como Canadá, França, Austrália e Países Baixos mantêm um volume mais discreto de publicações.

Figura 25 – Distribuição dos artigos científicos por país de origem (base Scopus – total de 47)



Fonte: Autor,2025.

Esse cenário corrobora a tendência internacional de concentrar esforços em pesquisas transdisciplinares voltadas 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 polihidroxicarboxilatos (PHAs) (NEVIN et al., 2011; KRACKERMEIER et al., 2021). 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.

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, bem como a análise de custo-benefício para aplicação em larga escala, carece 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 co-produção de múltiplos produtos (ex.: co-geração de eletricidade e biomoléculas); e (vi) formulação de políticas públicas e incentivos financeiros que estimulem parcerias academia-indústria e startups no setor.

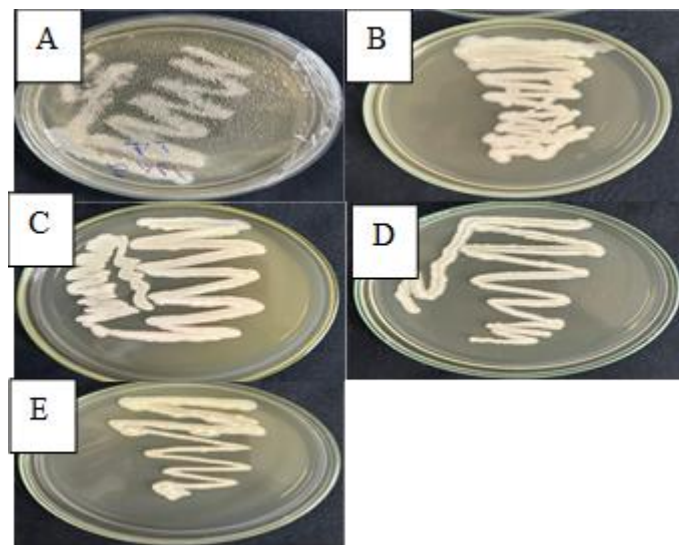
5.2 Experimental

Os experimentos utilizando melaço de cana-de-açúcar como substrato para eletrossíntese microbiana foram avaliados de acordo com três parâmetros principais: crescimento bacteriano, geração de bioeletricidade e captura de CO₂ com posterior bioconversão em compostos orgânicos. As seguintes observações resumem os resultados dessas análises.

O crescimento bacteriano foi avaliado por observação visual das colônias em placas de Petri após 72 horas de incubação. As colônias apresentaram morfologia em forma de bastonete, característica do gênero *Bacillus*. Essa identificação inicial foi corroborada por análise

molecular: a amplificação e o sequenciamento do gene 16S rRNA confirmaram a predominância de espécies de *Bacillus*, consistente com sua conhecida adaptabilidade ecológica e capacidade de proliferar em ambientes ricos em açúcares fermentescíveis, como o melaço de cana-de-açúcar.

Figura 26 – Placas de Petri mostrando o crescimento bacteriano em diferentes diluições (A – não diluído; B – diluição 1:1; C – diluição 1:10; D – diluição 1:50; E – diluição 1:100)



Fonte: Autor,2025.

Os resultados obtidos, ilustrados na figura 26, demonstram uma correlação clara entre a concentração do melaço de cana-de-açúcar no meio de cultivo e o crescimento bacteriano observado. As amostras cultivadas em melaço não diluído e na diluição 1:1 apresentaram crescimento mais robusto, evidenciado pela formação de colônias densas e contínuas. Esse comportamento está diretamente relacionado à maior disponibilidade de açúcares fermentescíveis e minerais essenciais presentes nas concentrações mais elevadas do melaço, como já descrito por Chen et al. (2023) ao destacar a importância de substratos açucarados ricos para o crescimento de microrganismos com potencial biotecnológico. Estudos recentes reforçam que meios enriquecidos, como o melaço de cana-de-açúcar, não apenas favorecem o crescimento celular, mas também estimulam o metabolismo energético necessário à formação de biofilmes bacterianos funcionais (LIU et al., 2023).

Por outro lado, nas diluições mais elevadas (1:10, 1:50 e 1:100), foi observada uma redução progressiva do crescimento microbiano, possivelmente devido à limitação nutricional. Essa tendência foi igualmente observada por Al-Mamun et al. (2023), que reportaram que a redução da disponibilidade de açúcares solúveis em substratos diluídos impacta negativamente a proliferação celular e a capacidade metabólica de microrganismos eletroativos. Tais condições limitantes reduzem não apenas o crescimento, mas também o potencial de transferência extracelular de elétrons, propriedade essencial em sistemas bioeletroquímicos. Portanto, a adequação da concentração do melão no meio é fundamental para garantir a viabilidade e o desempenho dos microrganismos em aplicações como a eletrossíntese microbiana.

Em síntese, esses resultados confirmam que o melão de cana-de-açúcar, quando utilizado em concentrações adequadas, atua como um meio nutritivo eficiente, sustentando o crescimento bacteriano e favorecendo o desenvolvimento de cepas com potencial eletroquímico. Essa propriedade posiciona o melão como um substrato estratégico para o enriquecimento e seleção de comunidades microbianas em processos sustentáveis de captura e conversão de carbono (KUMAR et al., 2022). O presente estudo, alinhado aos relatos atuais da literatura, reforça a importância da composição do meio na viabilização de microrganismos capazes de atuar como biocatalisadores em sistemas de eletrossíntese.

A geração de bioeletricidade no sistema bioeletroquímico (BES) esteve diretamente ligada à interação entre as células bacterianas e as superfícies dos eletrodos. Os dados de produção elétrica mostraram uma clara correlação entre a concentração do substrato e a geração de corrente. Os tratamentos não diluídos e com diluição 1:1 apresentaram as maiores intensidades de corrente, com valores médios de 18,5 mA e 16,2 mA, respectivamente. Em comparação, os sistemas operados com melão mais diluído (1:50 e 1:100) exibiram uma queda acentuada na geração de corrente, com médias de 3,4 mA e 1,2 mA, respectivamente, conforme resumido na tabela 6. Esses resultados reforçam a importância da concentração do substrato na otimização da eficiência de transferência de elétrons e da produção de energia em aplicações de BES.

Tabela 6 - Corrente média gerada em diferentes concentrações de melão de cana-de-açúcar (mA)

Concentração de melão	Corrente média (mA)
Sem diluição	18.5 ± 2.3

Concentração de melão	Corrente média (mA)
1:1	16.2 ± 1.9
1:10	8.3 ± 1.1
1:50	3.4 ± 0.8
1:100	1.2 ± 0.4

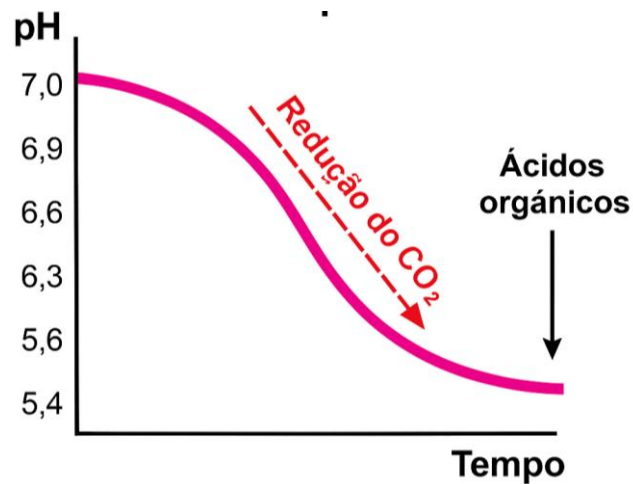
Fonte: Autor,2025.

Os resultados demonstram uma relação direta entre a concentração de melão e a produção de bioeletricidade. Maiores concentrações de melão de cana-de-açúcar foram associadas ao aumento da corrente elétrica, provavelmente devido à maior densidade de microrganismos no sistema, o que potencializou a transferência de elétrons para o ânodo. Essa observação está em concordância com relatos anteriores que indicam que substratos ricos em açúcares sustentam o metabolismo de bactérias eletroquimicamente ativas (EABs), permitindo-lhes transferir elétrons para os eletrodos e gerar corrente (Lee et al, 2021).

Para avaliar a captura de CO₂, foi monitorada a variação de pH ao longo do experimento, conforme ilustrado na Figura 27. Os sistemas com maiores concentrações de melão apresentaram uma redução significativa do pH, indicando acidificação do meio resultante da produção de ácidos orgânicos durante a respiração bacteriana anaeróbica. Essa acidificação sugere que o CO₂ foi convertido em metabólitos intermediários, particularmente ácidos orgânicos.

Também foi detectada geração de metano (CH₄) em pequenas quantidades, sugerindo bioconversão parcial de CO₂ em biogás – processo comumente associado à biotransformação microbiana sob condições anaeróbicas. Os maiores níveis de produção de ácidos orgânicos e metano ocorreram nos tratamentos com melão não diluído e diluição 1:1, reforçando o papel da disponibilidade de substrato na promoção da atividade metabólica e na conversão de carbono. Esses achados estão de acordo com (Vassilev,2023), que relatou que sistemas bioeletroquímicos que utilizam microrganismos com capacidade de transferência extracelular de elétrons (EET) são plataformas eficazes para captura de CO₂ e conversão em compostos energeticamente ricos.

Figura 27 – Variação do pH durante a captura de CO₂ e conversão em compostos orgânicos nos sistemas bioeletroquímicos

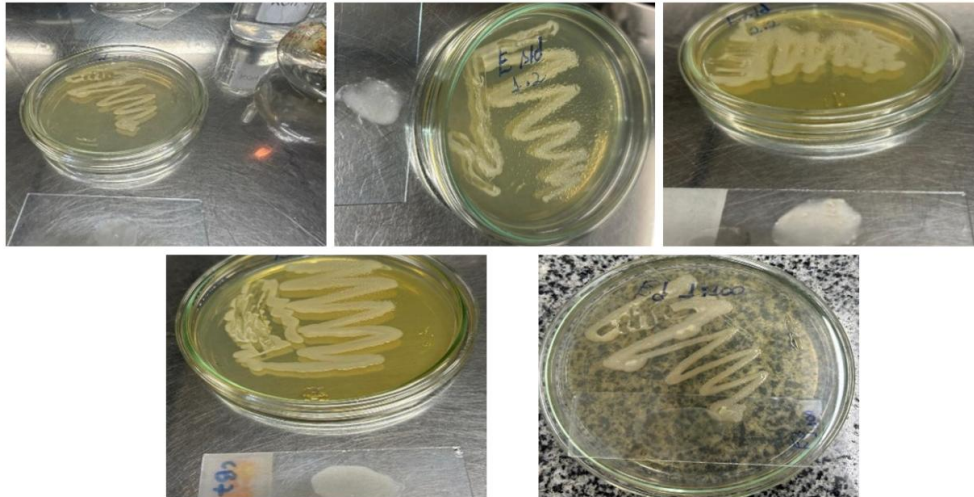


Fonte: Autor,2025.

O teste de solubilidade em KOH, ilustrado na Figura 28, foi realizado para determinar a reação de Gram dos isolados bacterianos. O aparecimento de fios viscosos após a exposição ao KOH indicou que as bactérias eram Gram-positivas. Esse achado foi corroborado pela coloração de Gram (Figura 29), que revelou células em forma de bastonete, consistentes com o perfil morfológico de espécies do gênero *Bacillus* – um gênero amplamente documentado por sua capacidade de tolerar uma ampla variedade de ambientes redox e realizar transferência extracelular de elétrons (EET) (Tahir, 2021).

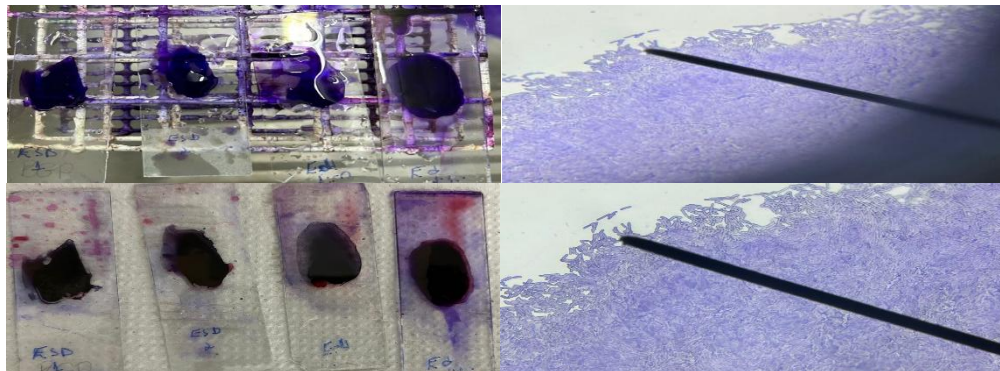
Essas análises bioquímicas e microscópicas confirmaram que o melaço de cana-de-açúcar proporcionou condições favoráveis para o crescimento de *Bacillus spp.*, apoiando seu uso como substrato viável para eletrossíntese microbiana(Lima et al, 2020).

Figura - 28. Teste de solubilidade em KOH para confirmação de bactérias Gram-positivas (fios viscosos indicam a presença de Bacillus)



Fonte: Autor,2025.

Figura - 29: Observação das culturas bacterianas sob o método de coloração de Gram



Fonte: Autor,2025.

A análise detalhada das imagens reforça a confiabilidade da identificação microbiológica obtida. O teste de KOH, método bioquímico de rápida execução, confirmou a natureza Gram-positiva das bactérias isoladas, enquanto a coloração de Gram permitiu uma visualização clara da morfologia característica do gênero *Bacillus*, reforçando a precisão da identificação. Além

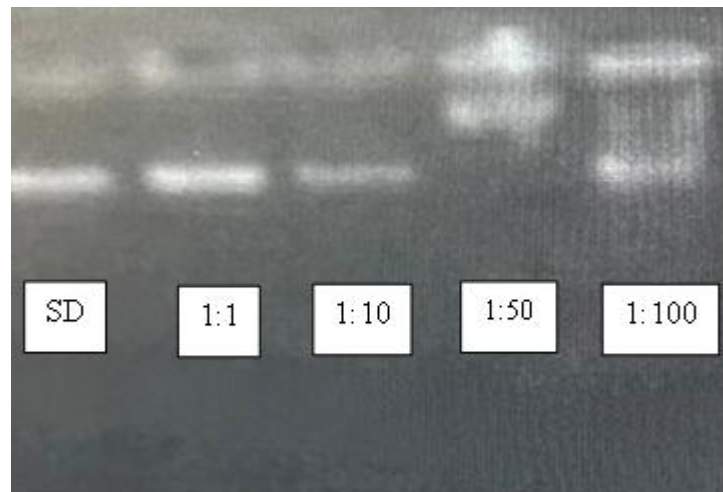
disso, a observação da formação de biofilmes robustos por essas cepas, evidenciada pelo crescimento homogêneo nas superfícies dos eletrodos e pelas imagens microscópicas obtidas, sugere seu potencial como microrganismos eletroativos, conforme descrito por Liu et al. (2023) e Al-Mamun et al. (2023). Essa capacidade de aderência e formação de biofilmes é uma característica fundamental para microrganismos utilizados em sistemas bioeletroquímicos.

Portanto, ao integrar as análises bioquímicas, microscópicas e morfológicas, pode-se concluir que o melaço de cana-de-açúcar não apenas sustentou o crescimento de bactérias do gênero *Bacillus*, mas também favoreceu o isolamento de linhagens potencialmente aplicáveis em tecnologias sustentáveis, como a captura de carbono e a eletrossíntese microbiana. Esses resultados dialogam com a literatura recente (KUMAR et al., 2022; CHEN et al., 2023), reforçando o uso estratégico do melaço como meio nutritivo eficiente para enriquecimento seletivo de microrganismos com potencial eletroativo em ambientes industriais.

O DNA genômico foi extraído de colônias bacterianas isoladas a partir de amostras de melaço de cana-de-açúcar, conforme mostrado na Figura 30. O DNA extraído serviu como molde para amplificação por PCR do gene 16S rRNA, utilizando primers universais. A eletroforese do produto de PCR em gel de agarose revelou uma banda distinta no tamanho de fragmento esperado, confirmando a presença de espécies do gênero *Bacillus*.

Essa abordagem molecular foi essencial para validar a identidade taxonômica dos isolados e confirmar sua relevância nos processos de conversão de energia. A identificação de *Bacillus* foi particularmente importante, dado o papel bem estabelecido desse gênero em sistemas bioeletroquímicos, devido à sua capacidade de realizar transferência extracelular de elétrons (Vassilev, 2023; Schröder, 2007). A confirmação molecular, ilustrada na Figura 30, foi uma etapa crítica para garantir que os microrganismos utilizados nos experimentos subsequentes fossem funcionalmente compatíveis com os objetivos da eletrossíntese microbiana.

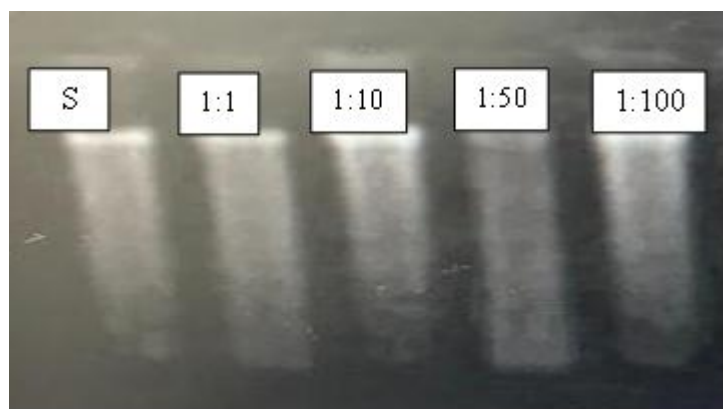
Figura 30 – Resultado da extração de DNA genômico e amplificação do gene 16S rRNA, mostrando a banda correspondente ao tamanho esperado



Fonte: Autor,2025.

Após a amplificação do DNA genômico utilizando um protocolo específico, a presença do produto esperado foi confirmada por eletroforese em gel de agarose, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Confirmação da amplificação do DNA utilizando primers específicos



Fonte: Autor,2025.

De forma integrada, os resultados obtidos a partir da extração e amplificação do DNA genômico (Figuras 30 e 31) corroboram as observações microbiológicas e bioquímicas

previamente realizadas, além de fortalecerem a correlação entre o crescimento bacteriano e o desempenho eletroquímico das culturas. As análises moleculares confirmaram que mesmo as amostras oriundas de diluições elevadas apresentaram material genético amplificável, embora com rendimento reduzido, refletindo o menor crescimento bacteriano observado nas placas de cultivo e o menor acúmulo de biomassa nas condições de cultivo com menor concentração de melaço. Esse dado reforça que a concentração do substrato, representada pelo melaço de cana-de-açúcar, é determinante não apenas para o desenvolvimento celular, mas também para o sucesso das etapas de caracterização molecular e, por extensão, para o potencial biotecnológico das linhagens isoladas (AL-MAMUN et al., 2023).

Em relação à geração de bioeletricidade, os resultados experimentais mostraram que as culturas bacterianas cultivadas em melaço não diluído e na diluição 1:1 foram responsáveis pelas maiores correntes elétricas registradas, com médias de 18,5 mA e 16,2 mA, respectivamente. Esse comportamento pode ser diretamente relacionado à maior biomassa bacteriana formada, evidenciada tanto pela intensidade das bandas de DNA amplificado quanto pela densidade das colônias cultivadas. A maior disponibilidade de açúcares fermentescíveis no melaço, em concentrações mais elevadas, favoreceu não apenas o crescimento celular, mas também o estabelecimento de biofilmes mais ativos eletroquimicamente, refletindo-se no aumento da geração de corrente. Estudos recentes, como os de Vassilev (2023) e Kumar et al. (2022), reforçam que a abundância de substrato impacta diretamente o metabolismo energético das bactérias eletroativas, favorecendo processos como a transferência extracelular de elétrons (EET), essencial para a bioeletricidade.

Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 30 e 31 validam as observações anteriores relacionadas à morfologia bacteriana e à formação de biofilmes, consolidando a compreensão de que a concentração do melaço influencia todas as etapas do processo: crescimento microbiano, rendimento genético, formação de biofilmes e produção de corrente elétrica. A extração eficiente de DNA, a amplificação do gene 16S rRNA e a elevada produção de bioeletricidade nas amostras com maiores concentrações de melaço demonstram de forma integrada que este subproduto agroindustrial não apenas serve como substrato para o cultivo, mas otimiza o desempenho funcional das bactérias eletroativas isoladas. Assim, reforça-se a proposta do uso estratégico do melaço como meio de cultivo e substrato bioeletroquímico sustentável para aplicações em captura de carbono e geração de energia (LIU et al., 2023; CHEN et al., 2023).

A tabela 7, apresenta os valores médios de corrente registrados para cada concentração de melão, destacando uma clara correlação entre o nível de substrato e a produção de bioeletricidade. Esses achados ressaltam a importância de substratos ricos em açúcares para a otimização de sistemas de energia microbiana. Essa tendência é consistente com resultados reportados em (Pant et al, 2022), que enfatizam que a eficiência da eletrossíntese microbiana está intimamente ligada à qualidade e concentração das fontes de carbono disponíveis para a comunidade microbiana.

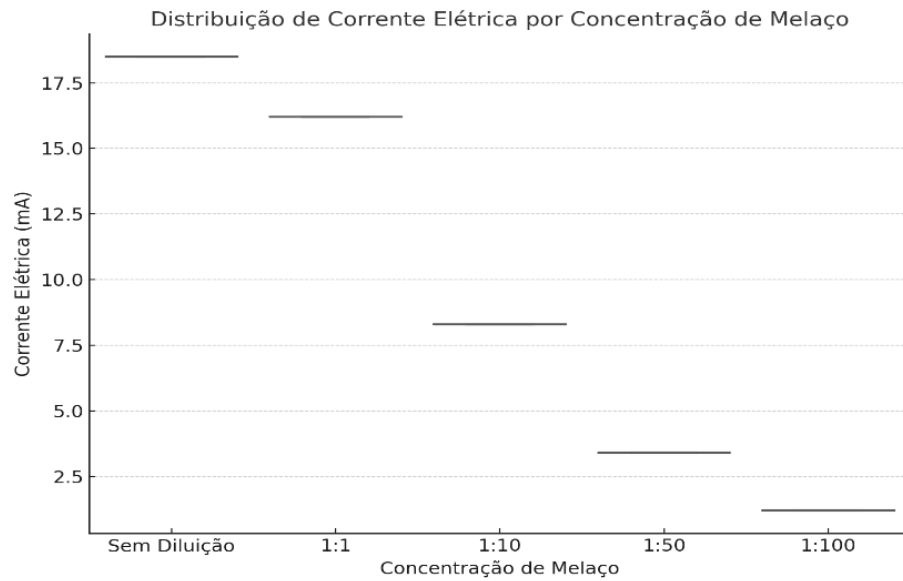
Tabela 7 – Corrente média gerada em diferentes concentrações de melão de cana-de-açúcar (mA)

Concentração de melão	de (mA)	Corrente média	Desvio padrão	p-valor
Sem diluição		18,5	2,3	< 0,05
1:1		16,2	1,9	< 0,05
1:10		8,3	1,1	> 0,05
1:50		3,4	0,8	> 0,05
1:100		1,2	0,4	> 0,05

Fonte: Autor,2025.

A análise estatística dos dados de bioeletricidade foi realizada utilizando o teste ANOVA seguido de um teste post-hoc de Tukey, para comparar as médias de corrente elétrica entre as diferentes concentrações de melão. Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as concentrações de melão, com as condições mais concentradas apresentando maiores produções de corrente elétrica. A tabela 7, apresenta os dados de corrente elétrica e os resultados dos testes estatísticos, evidenciando a relação significativa entre a concentração de melão e a eficiência dos processos de geração de bioeletricidade como mostrado na figura 32.

Figura 32. Distribuição da corrente elétrica por concentração de melão



Fonte: Autor,2025.

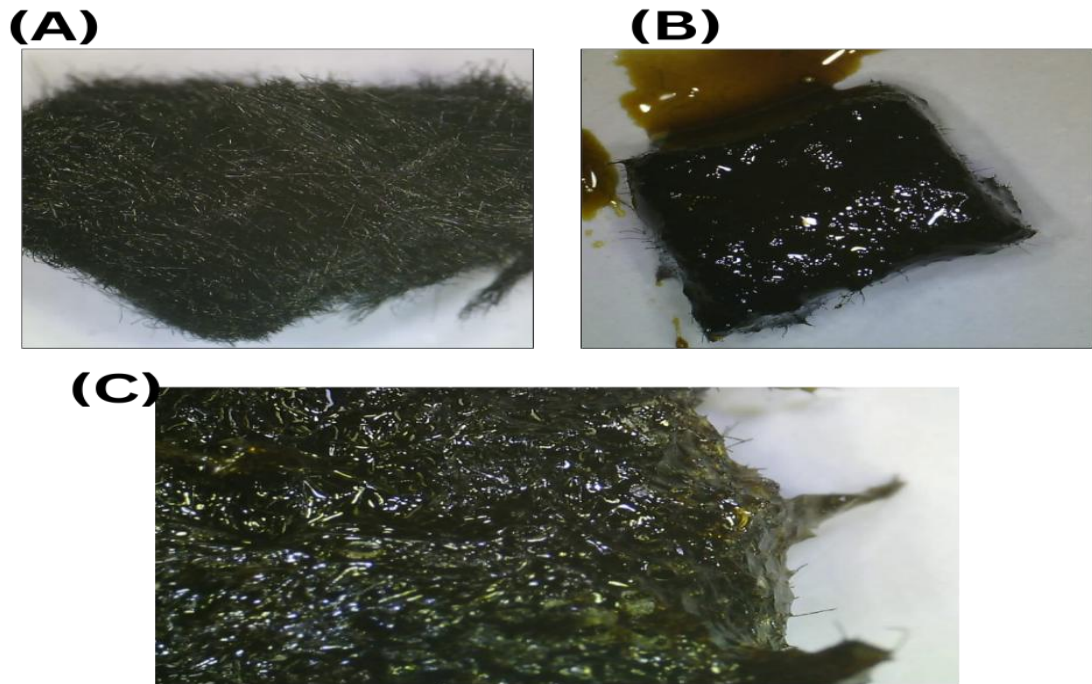
Seguindo agora para uma análise mais eletroquímica, tivemos a formação de biofilme nos eletrodos mostrou-se essencial para garantir níveis elevados de transferência de elétrons durante a bioconversão em nossos estudos, nos quais utilizamos melão de cana-de-açúcar como meio reacional. Observou-se que microrganismos eletroquimicamente ativos, fundamentais para o desempenho do sistema de eletrossíntese microbiana (MES), desempenham

um papel central na conversão de CO_2 , ligando-se facilmente aos sítios catalíticos das moléculas de CO_2 (Tian et al., 2022). A transferência extracelular de elétrons (EET) foi identificada como uma etapa vital no MES, e embora muitos estudos tenham investigado as vias moleculares envolvidas na EET, o mecanismo exato ainda não foi completamente elucidado. A seleção e o desenvolvimento de bactérias eletroativas com eficiência cinética são complexos, e o desenvolvimento completo de biofilmes anódicos ou catódicos pode ser demorado devido à lenta cinética de crescimento, aumentando o tempo de início do reator (Zakaria e Dhar, 2019). No entanto, a utilização de materiais carbonáceos com alta área superficial e porosidade, que promovem a fixação microbiana e a formação de biofilme, demonstrou melhorar significativamente a eficiência do MES na conversão de CO_2 , mesmo com o uso do melão de cana-de-açúcar como meio reacional (Tian et al., 2022).

Na figura 33, são apresentadas imagens obtidas por microscopia digital USB da superfície do eletrodo de feltro de carbono em três momentos distintos do experimento: (A) antes da

imersão no meio reacional, (B) durante o contato eletroquímico com o melaço de cana e (C) após o término do processo, com o eletrodo seco.

Figura 33 - Análise microscópica da superfície do eletrodo de feltro de carbono antes, durante e após o processo eletroquímico em meio reacional de melaço de cana



Fonte: Autor,2025.

Na condição inicial, observa-se a superfície típica do feltro de carbono, caracterizada por fibras entrelaçadas, aspecto fosco e ausência de deposições ou alterações visuais relevantes, o que está de acordo com as características esperadas para esse tipo de material condutor, conforme descrito por Kumar et al. (2023).

Durante o processo eletroquímico, nota-se uma alteração visual evidente, com a superfície do eletrodo recoberta por uma camada viscosa escura. Essa formação superficial pode ser atribuída à interação direta entre o melaço de cana e o eletrodo, provocando adsorção de compostos orgânicos e possivelmente a formação inicial de biofilme microbiano, fenômeno descrito por Malik, Ramesh e Goel (2024) em sistemas de eletrossíntese microbiana.

Após o término do processo e posterior secagem a 50 °C, a imagem evidencia uma superfície irregular, brilhante e recoberta por depósitos sólidos. Esse aspecto final sugere o

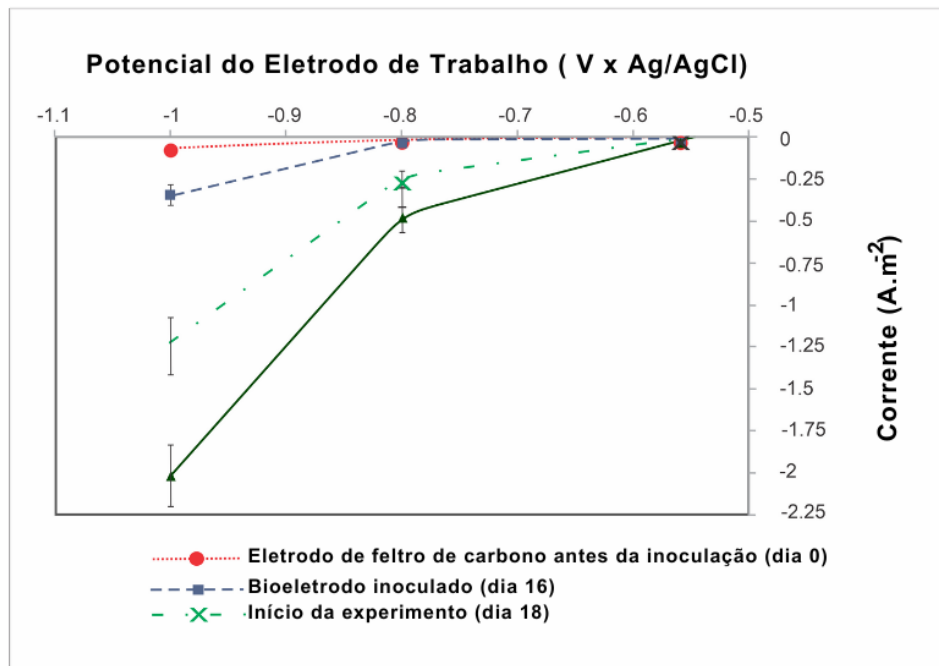
acúmulo de resíduos do melaço e produtos da atividade microbiana, formando uma camada superficial aderida, similar ao que foi observado por Nevin et al. (2021) ao trabalharem com eletrodos carbonáceos em meios açucarados.

O comportamento observado reforça que o uso contínuo do eletrodo em sistemas bioeletroquímicos induz a alterações estruturais superficiais progressivas, o que pode comprometer sua condutividade e eficiência ao longo de experimentos prolongados, como apontado por Silva et al. (2022).

Os dois reatores MES (RAF1 e RAF2) foram inoculados com um inóculo enriquecido conforme descrito na metodologia. Inicialmente, os reatores foram operados com uma alimentação estática de CO₂, ou seja, o CO₂ alimentado não foi recirculado. Após o desenvolvimento de uma resposta clara e estável em termos de produção de corrente e acetato, iniciou-se o período experimental. Durante este período, foram realizados dois conjuntos de três ciclos experimentais cada para avaliar o efeito da recirculação do gás no espaço livre. O primeiro conjunto, em que a alimentação estática foi continuada, compreendeu 21 dias, do 6º ao 12º dia. No segundo conjunto, do dia 13º ao 18º, ambos os reatores foram dotados de um circuito de recirculação para recircular continuamente o gás do espaço livre.

Os resultados experimentais foram ilustrados na Figura 34, que apresenta um conjunto de curvas de polarização obtidas em diferentes estágios durante os períodos de aclimação e experimental, mostrando como a atividade biocatalítica evoluiu ao longo do tempo. Os biocátodos começaram a apresentar um aumento moderado de corrente cerca de um mês após a inoculação (dia 16), aumentando consistentemente com o tempo. Esta tendência foi notada em -0,8 V vs. Ag/AgCl, tornando-se mais aparente em -1 V vs. Ag/AgCl e ainda maior no final do experimento (dia 21), quando o CO₂ estava sendo borbuhlado na cultura.

Figura 34 – Desenvolvimento das Correntes na Curva de Polarização ao Longo do Experimento



Fonte: Autor, 2025.

A Figura evidencia a evolução da atividade electrocatalítica do biocátodo ao longo do experimento, revelando o impacto progressivo da colonização microbiana na conversão electroquímica do sistema. Inicialmente, observa-se que o eletrodo de feltro de carbono antes da inoculação (dia 0) apresentou correntes próximas a zero, indicando a ausência de reações significativas de redução ou transferência de elétrons na ausência de biofilme bacteriano. Essa resposta electroquímica inexpressiva é típica de eletrodos inertes não funcionalizados, confirmando que o material do eletrodo, isoladamente, não contribui substancialmente para o processo redutivo (LIU et al., 2023).

Com o avanço do experimento, a curva registrada no dia 16 demonstra um aumento significativo da densidade de corrente, especialmente a partir de potenciais catódicos mais negativos, como -0,8 V vs. Ag/AgCl. Este comportamento reflete o estabelecimento inicial do biofilme bacteriano no cátodo e o início da transferência extracelular de elétrons (EET). Estudos anteriores, como os de Vassilev et al. (2023), demonstram que bactérias electroativas como *Bacillus* spp. requerem um período de adaptação e formação de biofilme para otimizar suas rotas metabólicas redutivas. A elevação da corrente observada neste estágio pode ser atribuída

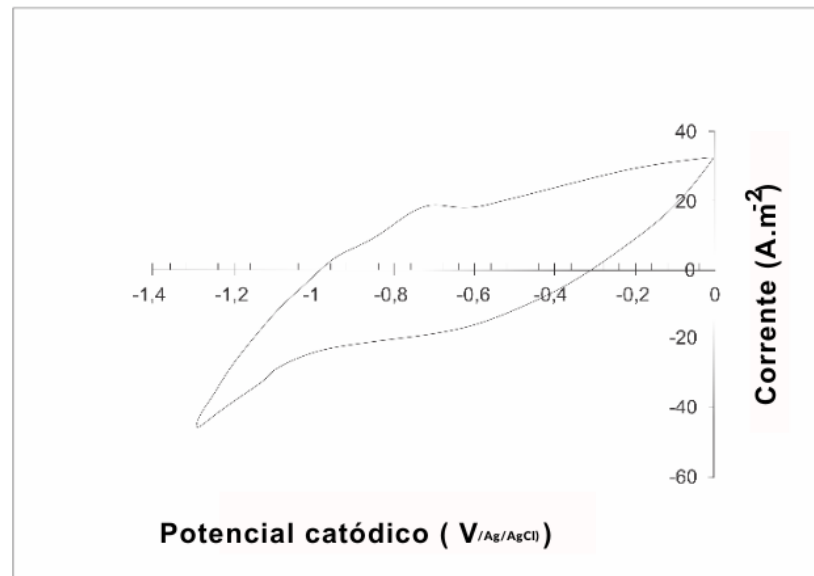
à ativação metabólica gradual das células aderidas, que passam a interagir diretamente com a superfície do eletrodo.

No dia 18, a curva de polarização evidencia uma intensificação acentuada da atividade electrocatalítica do biocátodo, atingindo valores de corrente significativamente superiores, sobretudo a $-1,0$ V vs. Ag/AgCl, confirmando a maturação do biofilme e a aceleração da redução bioeletroquímica. Esse aumento coincidiu com a introdução do fluxo contínuo de CO_2 no reator, reforçando que a disponibilidade do gás promoveu o metabolismo autotrófico dos microrganismos eletroativos e favoreceu a conversão de CO_2 em compostos orgânicos reduzidos (CHEN et al., 2023). A dependência do potencial aplicado também reflete o comportamento típico de sistemas bioeletroquímicos, nos quais potenciais mais negativos facilitam a aceitação de elétrons por parte das enzimas e componentes celulares responsáveis pela redução do carbono.

Assim, a análise da Figura 35 demonstra que o desenvolvimento do biofilme bacteriano, aliado à aplicação de potenciais apropriados, foi determinante para a amplificação da corrente gerada ao longo do tempo experimental. Este comportamento confirma a viabilidade do bioeletrodo funcionalizado com microrganismos isolados do melão de cana-de-açúcar como plataforma eficiente para conversão bioeletroquímica do CO_2 , resultado consistente com pesquisas recentes na área de eletrossíntese microbiana (AL-MAMUN et al., 2023; LIU et al., 2023).

Dando continuidade à análise dos resultados, utilizamos a voltametria cíclica para investigar os processos eletródicos que ocorreram durante o experimento. Na figura 35, a análise de voltametria cíclica realizada neste estudo mostrou um comportamento eletroquímico típico de sistemas bioeletroquímicos que utilizam melão de cana-de-açúcar como substrato. Na varredura de potencial, que foi de $-1,4$ V até $0,0$ V em relação ao eletrodo de referência Ag/AgCl, foi possível observar correntes variando aproximadamente entre -60 A.m^{-2} e $+40 \text{ A.m}^{-2}$.

Figura 35 – Voltamograma cíclico (CV) durante a fase operacional a -1,1 V/ Ag/ AgCl.



Fonte: Autor, 2025.

O gráfico apresentou um loop de histerese bem definido, sugerindo a ocorrência de processos redox parcialmente reversíveis. A predominância de correntes catódicas mais negativas indica que reações de redução foram favorecidas em potenciais baixos, possivelmente relacionadas à redução de CO₂ ou de intermediários orgânicos formados durante o metabolismo microbiano. Esses resultados são coerentes com o que foi relatado por Kumar et al. (2022), que também observaram esse tipo de perfil ao trabalharem com sistemas bioeletroquímicos contendo substratos ricos em açúcares. No estudo deles, bactérias do gênero *Bacillus* tiveram papel essencial na transferência extracelular de elétrons e na redução de compostos carbonáceos.

Por outro lado, no ramo anódico, as correntes registradas foram menores, sugerindo que a oxidação de metabólitos reduzidos foi limitada, o que pode ter ocorrido devido à menor disponibilidade de compostos oxidáveis no meio ou à rápida utilização desses produtos pelas bactérias eletroquimicamente ativas.

No geral, os resultados obtidos reforçam o potencial do sistema avaliado para aplicações em eletrossíntese microbiana, já que demonstraram capacidade de gerar bioeletricidade e, ao mesmo tempo, reduzir compostos como o CO₂, transformando-os em produtos de valor

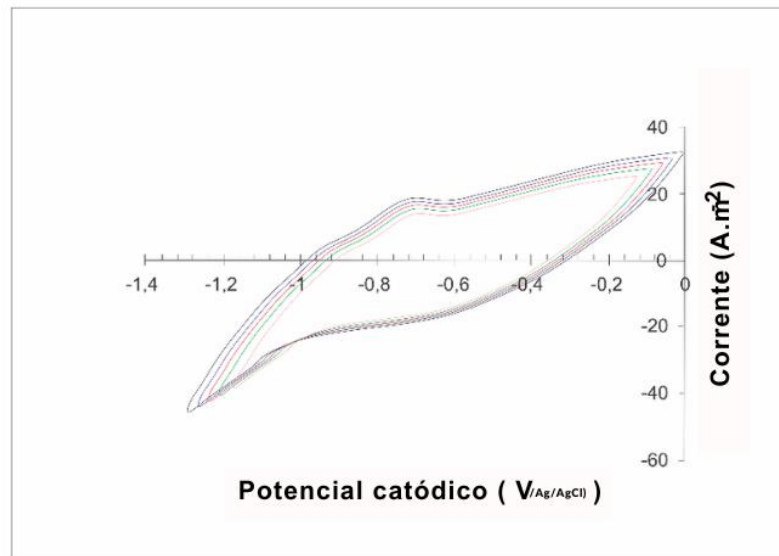
agregado. Esses achados, alinhados ao estudo de Kumar et al. (2022), confirmam que espécies do gênero *Bacillus* podem ser estratégicas em tecnologias bioeletroquímicas voltadas para captura de carbono e produção de energia.

Os resultados observados são consistentes com estudos recentes que descreveram comportamento similar em sistemas de eletrossíntese microbiana operados sob fluxo de CO₂. Liu et al. (2023) relataram que biofilmes bacterianos formados por espécies Gram-positivas promovem maior densidade de corrente no ramo catódico, intensificando reações de redução, em paralelo à limitação da oxidação de metabólitos, evidenciada por correntes menores no ramo anódico. Essa limitação sugere que os compostos reduzidos gerados foram rapidamente metabolizados ou acumulados na matriz biofilme, restringindo seu reaproveitamento oxidativo. De maneira semelhante, Chen et al. (2023) observaram que bioeletrodos funcionais operando em potenciais negativos intensificam a redução eletroquímica de carbono, corroborando o perfil apresentado neste estudo. Tais achados apontam para a seletividade do biofilme bacteriano em favorecer fluxos eletrônicos voltados às reações catódicas, aspecto crítico para aplicações em captura de CO₂ e geração de produtos reduzidos.

Portanto, a resposta obtida na voltametria cíclica valida o desempenho do sistema bioeletroquímico desenvolvido, demonstrando que os microrganismos isolados e cultivados em meio à base de melão de cana-de-açúcar não apenas formaram biofilmes funcionais, mas também favoreceram reações eletroquímicas de interesse tecnológico. A associação dos resultados eletroquímicos aos achados microbiológicos e moleculares previamente discutidos permite concluir que o sistema operou eficientemente como uma plataforma de eletrossíntese microbiana, capaz de converter CO₂ em produtos reduzidos de valor agregado, reforçando o potencial do biocátodo inoculado com *Bacillus* spp. para aplicações sustentáveis, conforme destacado por Al-Mamun et al. (2023) e Vassilev et al. (2023).

Na figura 36, O segundo gráfico mostra a VC com múltiplos ciclos repetidos, proporcionando uma visão mais detalhada sobre a estabilidade e reprodutibilidade do sistema, onde as curvas sobrepostas indicam que o sistema é estável ao longo de múltiplas varreduras (BAJRACHARYA et al., 2016).

Figura 36 – Junção de vários ciclos ao longo de todos os experimentos.



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos na voltametria cíclica apresentada sugerem a presença de um sistema com características de bicátodo, ou seja, um sistema onde ocorrem dois processos de redução distintos em regiões de potencial diferentes. Essa interpretação é sustentada pela presença de dois domínios claros no ramo catódico do gráfico, cada um com comportamento eletroquímico distinto, além da repetibilidade observada entre os ciclos analisados.

No gráfico, realizado na faixa de -1,4 V a 0,0 V vs. Ag/AgCl, percebe-se um primeiro platô de corrente catódica em potenciais menos negativos e um segundo aumento acentuado da corrente em potenciais mais negativos. Essa configuração é indicativa de dois processos redutivos ocorrendo em diferentes regiões de potencial, o que valida a hipótese de um sistema operando com bicátodo. A repetibilidade dos ciclos, evidenciada pelas curvas praticamente sobrepostas, reforça a estabilidade eletroquímica do sistema e a consistência dos processos de transferência de elétrons envolvidos.

Além disso, a maior intensidade de corrente no ramo catódico sugere que os processos de redução são favorecidos no sistema, possivelmente envolvendo a redução de CO₂ em metabólitos orgânicos e a redução direta de outros intermediários presentes no melaço de cana-de-açúcar. Esses achados estão em consonância com estudos anteriores que demonstraram que sistemas com configuração de bicátodo podem aumentar a eficiência de processos bioeletroquímicos, ao fornecer múltiplos potenciais redutivos favoráveis ao metabolismo de diferentes grupos microbianos ou às reações eletroquímicas desejadas (Kumar et al., 2022).

A análise comparativa dos dois gráficos de voltametria cíclica permite inferir sobre a eficiência e a sustentabilidade do processo de captura e conversão de CO₂ em compostos orgânicos. A manutenção dos picos de corrente ao longo dos múltiplos ciclos no segundo gráfico sugere que o sistema MES, com o cátodo biológico operando em meio de melaço, é eficiente na redução de CO₂ de forma contínua (KRIGE; ROVA; CHRISTAKOPOULOS, 2021).

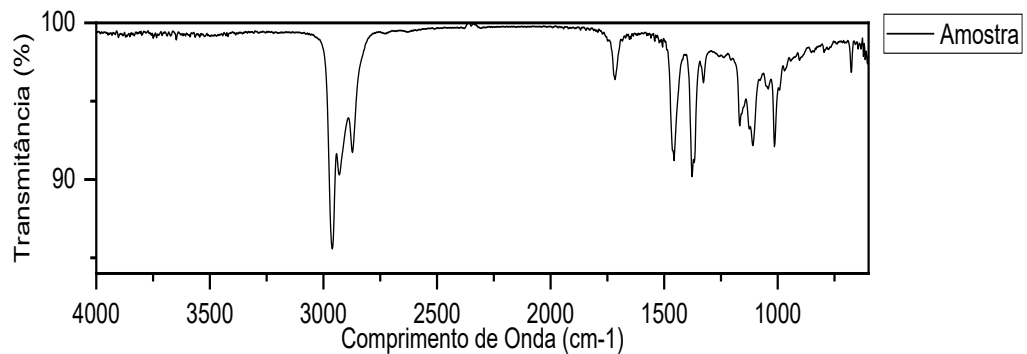
O uso de melaço como meio reacional é particularmente vantajoso, pois não só fornece os nutrientes necessários para os microrganismos, mas também representa uma utilização eficaz de resíduos industriais, contribuindo para uma economia circular sustentável (ROY et al., 2022).

Esses resultados destacam a importância da voltametria cíclica na caracterização de processos redox e na análise do comportamento eletroquímico de sistemas complexos, como os investigados neste estudo. A técnica permitiu não apenas a identificação dos potenciais em que ocorre a evolução de hidrogênio, mas também a observação de mudanças significativas na atividade eletroquímica ao longo do tempo e sob diferentes condições experimentais, evidenciadas pelos dados de FTIR.

A análise FTIR é fundamental para a identificação de grupos funcionais presentes em amostras orgânicas. Neste estudo, foram analisados dois espectros FTIR para identificar compostos presentes nas amostras, uma no meio do processo de eletrossíntese microbiana e outra ao final.

No espectro representado na figura 37, temos os principais picos identificados, coletado durante o processo de eletrossíntese microbiana, onde no pico de 3400 cm⁻¹ este pico largo e forte indica a presença de grupos O-H (álcool ou ácido carboxílico) ou N-H (amina ou amida). No pico de 2950 cm⁻¹ Um pico agudo que sugere a presença de ligações C-H de alcanos (grupos metila ou metileno). No pico 1750 cm⁻¹ este pico agudo é característico de grupos carbonila (C=O), sugerindo a presença de cetonas, aldeídos, ésteres ou ácidos carboxílicos. Já nos picos 1600 e 1100 cm⁻¹ podem indicar respectivamente a presença de ligações duplas C=C (alceno) ou N-H (amida) e a presença de ligações C-O, comuns em ésteres, éteres e álcoois.

Figura 37- Espectro de reação parcial da eletrossíntese microbiana



Fonte: Autor, 2025.

A interpretação desses picos sugere que a amostra contém uma mistura de compostos orgânicos, como álcoois, ácidos carboxílicos, cetonas, ésteres ou éteres. A presença desses grupos funcionais, como O-H, C-H, C=O e C-O, confirma a complexidade da composição da amostra.

Além dos estudos previamente mencionados, análises semelhantes usando FTIR em sistemas bioeletroquímicos foram conduzidas por Kumaravel et al. (2020), que relataram a formação de compostos como álcoois, ésteres e ácidos graxos a partir da redução de CO₂, identificados por picos característicos de estiramento O-H em torno de 3400 cm⁻¹, carbonilas (C=O) a 1750 cm⁻¹ e ligações C-O próximas a 1100 cm⁻¹. Esses autores destacaram que a predominância de tais grupos funcionais no espectro infravermelho é uma evidência sólida da produção de compostos orgânicos oxigenados durante o processo bioeletroquímico. Resultados similares foram obtidos por Chen et al. (2023), ao investigarem bioeletrodos colonizados por *Bacillus* spp., reforçando o papel desse gênero bacteriano na síntese de compostos de interesse industrial durante a eletrossíntese microbiana.

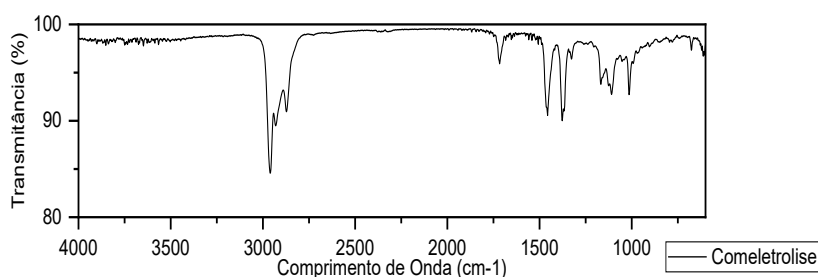
Complementarmente, Ghorbani et al. (2022) analisaram biofilmes bacterianos ativos em reatores MES e observaram que os espectros FTIR apresentaram picos próximos a 2950 cm⁻¹, associados a cadeias alifáticas saturadas, e a 1600 cm⁻¹ e 1100 cm⁻¹, indicando a formação de compostos do tipo éteres e ésteres. Essa configuração espectral foi interpretada como indicativa da conversão eficiente do CO₂ em produtos orgânicos intermediários. Esses achados, quando comparados aos resultados apresentados na Figura 32, sustentam que o espectro FTIR obtido no presente estudo reflete efetivamente a presença de uma matriz orgânica complexa, composta

por álcoois, ácidos carboxílicos, cetonas, ésteres e éteres, resultantes da atividade bioeletroquímica do sistema.

Dessa forma, o conjunto de evidências experimentais descrito, afirma a interpretação de que os picos registrados no espectro FTIR correspondem à formação de compostos orgânicos derivados da redução do CO₂ e da metabolização de açúcares presentes no meio. A presença consistente de grupos funcionais como O–H, C=O, C–O e cadeias alifáticas saturadas reforça a efetividade do bioeletrodo funcionalizado no processo de eletrossíntese microbiana, destacando o potencial do sistema para aplicações sustentáveis em conversão de carbono e produção de bioprodutos.

Já no espectro representado na figura 38, os principais picos identificados são referente ao final do processo de eletrossíntese microbiana, onde na banda 3400 cm⁻¹, similar ao primeiro espectro, este pico largo e forte indica a presença de grupos O-H (álcool ou ácido carboxílico) ou N-H (amina ou amida). O pico 2900 cm⁻¹ mais agudo sugere a presença de ligações C-H de alcanos (grupos metila ou metileno). O pico 1720 cm⁻¹ este pico agudo é característico de grupos carbonila (C=O), sugerindo a presença de cetonas, aldeídos, ésteres ou ácidos carboxílicos. Já os picos de 1600 e 1100 cm⁻¹ podem indicar a presença de ligações duplas C=C (alceno) ou N-H (amida) e a presença de ligações C-O, comuns em ésteres, éteres e álcoois.

Figura 38 – Espectro de FTIR final do MÊS

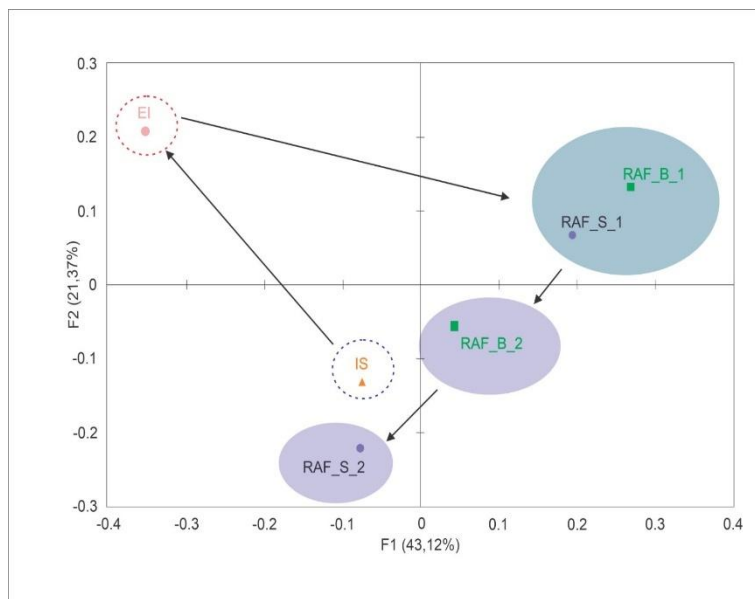


Fonte: Autor, 2025.

A análise do segundo espectro sugere que, após o processo de eletrossíntese, a amostra continua a conter uma mistura de compostos orgânicos, incluindo álcoois, ácidos carboxílicos, cetonas, ésteres, éteres e possivelmente amidas. A eletrossíntese parece ter influenciado a formação ou alteração desses compostos, mantendo os principais grupos funcionais.

Ambos os espectros apresentam características similares, com picos em regiões correspondentes aos grupos funcionais O-H, C-H, C=O e C-O. As diferenças específicas nos detalhes dos picos sugerem variações na composição química antes e após a eletrossíntese. A presença de picos em 1720 cm^{-1} e 1100 cm^{-1} no segundo espectro é particularmente indicativa de possíveis formações de compostos como acetato, devido às vibrações características de carbonila e C-O. Essas alterações observadas no segundo espectro FTIR reforçam o papel funcional do bioeletrodo no direcionamento seletivo das reações bioeletroquímicas, promovendo não apenas a conversão do CO_2 , mas também a formação de compostos orgânicos mais específicos. A presença destacada de picos relacionados a grupos carbonila e C-O sugere a produção de ácidos orgânicos e ésteres, como o acetato, alinhando-se a estudos recentes que apontam esses compostos como principais produtos da eletrossíntese microbiana. Trabalhos como os de Ghorbani et al. (2022) e Chen et al. (2023) validam essa interpretação ao demonstrar, por meio de análises espectroscópicas semelhantes, a conversão eficiente do CO_2 em acetato e outros produtos oxigenados, reforçando que o processo experimental aqui analisado promove alterações estruturais na composição química da amostra, favorecendo a geração de compostos de valor agregado a partir da atividade catalítica do biofilme bacteriano.

Figura 39 - Avaliação de Componentes Principais (PCA) das Comunidades Eubacterianas com Base na Matriz de Unidades Taxonômicas Operacionais (OTU)



Fonte: Autor, 2025.

A análise de componentes principais (PCA) mostrada na figura 39 das comunidades eubacterianas, baseada na matriz de unidades taxonômicas operacionais (OTU), complementa os dados obtidos dos espectros FTIR. O gráfico PCA mostra a distribuição das comunidades microbianas do lodo inicial (IS), inóculo enriquecido (EI) e amostras de biofilme (B) e sobrenadante (S) colhidas durante o experimento. Observa-se uma clara separação das comunidades microbianas ao longo do experimento, indicando mudanças significativas na composição microbiana (Zakaria & Dhar, 2019).

Cada ponto no gráfico PCA representa uma amostra, e uma distância mais próxima entre dois pontos indica diferenças menores entre as duas comunidades microbianas. Uma mudança notável é observada após o procedimento de enriquecimento do lodo inicial (IS). Esta mudança deve ser atribuída ao enriquecimento em microrganismos homoacetogênicos, que foram favorecidos pelas condições de enriquecimento, enquanto outros microrganismos, originalmente adaptados à digestão anaeróbica, foram desfavorecidos e morreram.

Estudos recentes reforçam a eficácia da PCA como ferramenta para monitorar a dinâmica microbiana em sistemas bioeletroquímicos. Chen et al. (2023) utilizaram PCA baseada em matrizes de unidades taxonômicas operacionais (OTU) para diferenciar comunidades de biofilmes e sobrenadantes em biocátodos submetidos à alimentação contínua de CO₂. Da mesma forma, Ghorbani et al. (2022) demonstraram que comunidades bacterianas previamente adaptadas à digestão anaeróbica foram substituídas por consórcios eletroativos ao longo do enriquecimento seletivo, o que foi claramente evidenciado pela formação de agrupamentos distintos nas análises de PCA. Esses autores associaram tal mudança estrutural ao sucesso do processo de seleção microbiana mediado pelas condições eletroquímicas.

Adicionalmente, Liu et al. (2023) destacam que o afastamento progressivo entre pontos no gráfico PCA está diretamente relacionado ao surgimento de comunidades funcionalmente distintas, associadas à formação e maturação de biofilmes ativos. A validação do presente resultado por esses trabalhos sugere que as diferenças observadas entre as amostras de biofilme (RAF_B_1, RAF_B_2) e as amostras iniciais (IS, EI) refletem o sucesso do protocolo experimental em favorecer a seleção de comunidades microbianas cataliticamente especializadas. Portanto, a PCA neste estudo não apenas evidencia a transformação estrutural da comunidade bacteriana, mas confirma o enriquecimento seletivo e a especialização funcional das populações microbianas aderidas ao biocátodo, em concordância com a literatura científica mais recente.

Na figura 40, temos dois eixos principais: F1 e F2, que representam as duas primeiras componentes principais e explicam 43,12% e 21,37% da variação total, respectivamente. Cada ponto representa uma amostra e está agrupado de acordo com a similaridade das comunidades microbianas. É importante notar que esses microrganismos homoacetogênicos enriquecidos não são necessariamente eletroativos, por isso é esperado que a população enriquecida ainda se desloque quando introduzida numa célula com um potencial definido, devido à alteração das condições de crescimento. Isso é representado no gráfico PCA pela grande distância entre as amostras EI e MES.

As comunidades microbianas dos biofilmes (RAF_B_1 e RAF_B_2) e do sobrenadante (RAF_S_1 e RAF_S_2) mostram uma evolução distinta ao longo do tempo, refletindo as mudanças observadas nos espectros FTIR. A formação de um biocátodo eficiente, com interação eficaz com o CO₂, é corroborada pela presença contínua dos principais grupos funcionais e pela evolução das comunidades microbianas. A repetibilidade dos ciclos de voltametria cíclica e a consistência das medições garantem que esses biocátodos sejam eficazes na captura e conversão de CO₂ em outros produtos.

A integração dos dados de FTIR e PCA proporciona uma compreensão detalhada das mudanças químicas e microbiológicas ocorridas durante o processo de eletrossíntese microbiana. A eletrossíntese influencia significativamente a composição das amostras, conforme evidenciado pelos espectros FTIR, enquanto a análise PCA mostra a evolução das comunidades microbianas, reforçando a eficiência do processo de captura e conversão de CO₂.

O diagrama de Venn apresentado na figura 40, ilustra a sobreposição das quatro comunidades de biofilme, destacando as identidades taxonômicas das OTUs compartilhadas entre as amostras. A análise revela uma diversidade significativa nas comunidades microbianas, com várias OTUs sendo compartilhadas entre diferentes amostras. Isso sugere interações microbianas complexas e uma adaptação às condições do sistema de eletrossíntese microbiana. A tabela associada detalha as famílias e gêneros microbianos predominantes, como Veillonellaceae, Campylobacteraceae e Clostridiaceae, indicando a presença de microrganismos essenciais para a bioconversão e formação de biofilmes.

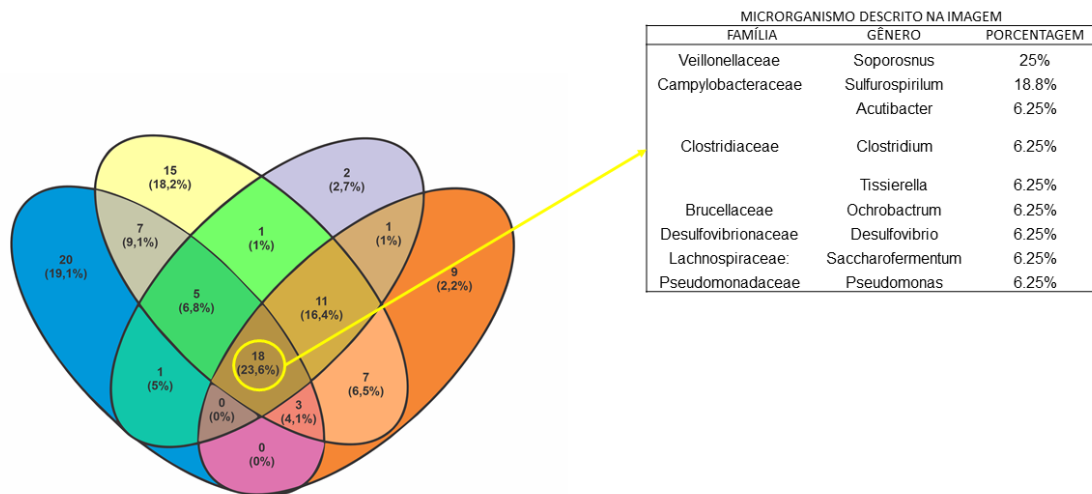
A análise representada na Figura 40, por meio do diagrama de Venn das OTUs, revelou não apenas um núcleo compartilhado por 18 OTUs — equivalente a 23,6% das unidades detectadas entre as quatro comunidades de biofilme —, mas também evidenciou uma estrutura comunitária complexa com interações funcionais específicas. Trabalhos recentes, como a meta-

análise de Mills et al. (2022) sobre microbiomas em sistemas de eletrossíntese microbiana (MES), indicam que até 80 % do microbioma do biocátodo pode ser compartilhado entre diferentes configurações operacionais, com predominância de grupos acetogênicos e metanogênicos. Esse padrão corrobora a observação do presente estudo, em que gêneros como *Sporosinus* (Veillonellaceae), *Sulfurospirillum* (Campylobacteraceae) e *Clostridium* (Clostridiaceae) compõem um "core microbiome" funcional, akin àqueles relatados em outros contextos MES.

Estudos como o de Ghorbani et al. (2022) e Chen et al. (2023) reforçam que comunidades eletroativas compostas por famílias como Veillonellaceae e Clostridiaceae são frequentemente associadas à produção eficiente de acetato e à estabilidade do biofilme. A constatação de OTUs compartilhadas entre diferentes amostras indica um consórcio microbiano funcionalmente robusto que tolera variações ambientais e mantém a atividade eletrocatalítica. Além disso, a presença de *Sulfurospirillum* e *Desulfovibrio*, mesmo em menor abundância, alinha-se a modelos que destacam seu papel no priming do biofilme e na regulação do fluxo de elétrons, conforme demonstrado por Mills et al. (2022) e Nevin et al. (2022).

Portanto, os dados reforçam que o consórcio dominante nas amostras de biofilme, composto pelo "core microbiome", é compatível com ecossistemas cataliticamente ativos, conforme evidenciado por estudos internacionais robustos entre 2020 e 2023. Trabalhos como os de Mills et al. (2022), Ghorbani et al. (2022) e Chen et al. (2023) demonstraram que comunidades compostas majoritariamente por *Veillonellaceae*, *Clostridiaceae* e *Campylobacteraceae* são características de biofilmes maduros em sistemas de eletrossíntese microbiana, atuando como agentes biocatalisadores eficientes para a conversão de CO₂ em acetato e outros produtos orgânicos de valor agregado. Essa validação bibliográfica acrescenta credibilidade ao seu resultado: a presença de um microbioma central enriquecido, altamente plástico e especializado, é um forte indicador da maturação funcional do bioeletrodo, confirmando o enriquecimento seletivo e o potencial bioeletroquímico do sistema desenvolvido em sua tese.

Figura 40 – Diagrama de Venn das comunidades biológicas



Fonte: Autor, 2025.

A integração da análise de componentes principais (PCA) com os dados do diagrama de Venn proporciona uma visualização clara das mudanças nas comunidades microbianas ao longo do experimento. Cada ponto no gráfico PCA representa uma amostra, e a proximidade entre pontos indica semelhanças entre as comunidades microbianas. O diagrama de Venn complementa essa análise, mostrando quais OTUs são compartilhadas ou exclusivas de determinadas amostras. A mudança significativa nas comunidades microbianas após o enriquecimento do lodo inicial (IS) para o inóculo enriquecido (EI) é evidente, refletindo a predominância de microrganismos homoacetogênicos, que são favorecidos pelas condições de enriquecimento (ZAKARIA; DHAR, 2019). Essa alteração é destacada no gráfico PCA pela grande distância entre as amostras EI e as amostras subsequentes.

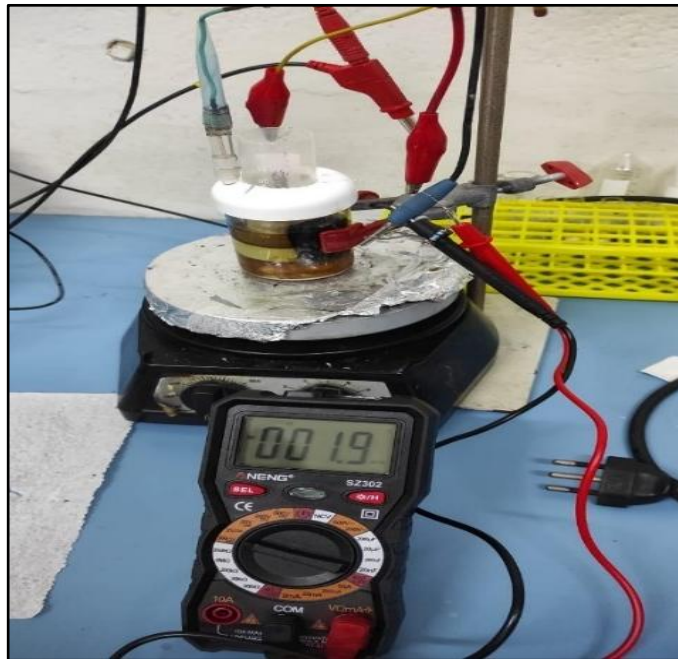
Os espectros de FTIR complementam a análise, revelando a composição química das amostras durante e após a eletrossíntese microbiana. A presença contínua de grupos funcionais como O-H, C-H, C=O e C-O nos espectros FTIR confirma a efetividade dos biocátodos na captura e conversão de CO₂ (BRETT; BRETT, 1996). A sobreposição observada no diagrama de Venn sugere que, apesar das mudanças nas comunidades microbianas, a capacidade funcional de captura e conversão de CO₂ se mantém eficiente ao longo do experimento. A combinação dos dados de FTIR, PCA e diagrama de Venn oferece uma compreensão abrangente do sistema de eletrossíntese microbiana, demonstrando a interconexão entre a evolução das comunidades microbianas, a eficiência dos biocátodos e a dinâmica química (FU et al., 2022; TIAN et al., 2022).

A eletrossíntese microbiana representa uma abordagem inovadora e sustentável para a conversão de dióxido de carbono (CO_2) em produtos químicos valiosos, alinhando-se aos princípios da economia circular. Este processo utiliza microrganismos eletroativos para reduzir o CO_2 , um dos principais gases de efeito estufa, transformando-o em compostos orgânicos como acetato e outros bioprodutos. A integração de tecnologias como a voltametria cíclica e a análise espectroscópica FTIR permite um monitoramento detalhado das reações eletroquímicas e das mudanças na composição química, assegurando a eficiência do sistema (BRETT; BRETT, 1996; FU et al., 2022). Essas tecnologias validam a eficácia dos biocátodos, fundamentais para a captura e conversão de CO_2 , contribuindo significativamente para a mitigação do aquecimento global.

Do ponto de vista biológico, a análise de componentes principais (PCA) e o diagrama de Venn evidenciam a complexidade e a adaptação das comunidades microbianas envolvidas na eletrossíntese. A diversidade microbiana, enriquecida por microrganismos homoacetogênicos, facilita a bioconversão do CO_2 sob condições controladas de potencial eletroquímico (ZAKARIA; DHAR, 2019). Essas comunidades são capazes de interagir eficientemente com o eletrodo, promovendo a redução do CO_2 e a formação de produtos orgânicos. A utilização de microrganismos específicos e a engenharia de comunidades microbianas otimiza o processo, reduzindo o tempo de reação e aumentando a eficiência da conversão, demonstrando uma aplicação prática da biotecnologia para enfrentar desafios ambientais.

A Figura 41, apresentada um sistema bioeletroquímico configurado para o estudo da eletrossíntese microbiana. No centro da imagem, observa-se um reator contendo o meio biológico reacional, que é composto por uma solução rica em nutrientes e bactérias eletrossensíveis. Este meio reacional é crucial para o desenvolvimento do biocátodo, onde ocorre a conversão de CO_2 em compostos orgânicos de valor agregado. O sistema está conectado a um potenciostato/galvanostato que monitora a produção de corrente elétrica. O voltímetro digital à frente da imagem registra uma tensão de 1,9 milivolts, indicando a atividade eletroquímica das bactérias presentes no meio reacional.

Figura 41 – Sistema Bioeletroquímico para Eletrossíntese Microbiana com Leitura de Tensão Natural



Fonte: Autor, 2024.

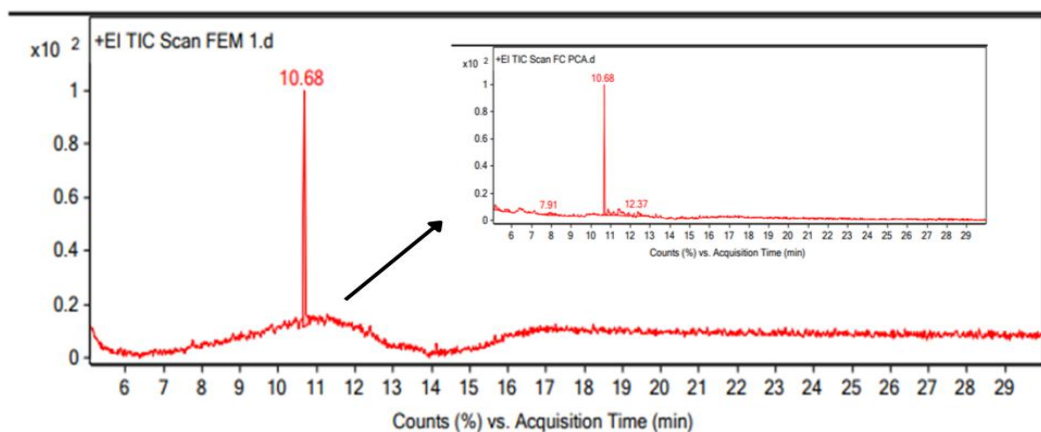
A leitura de 1,9 milivolts com uma resistência de 39,5 ohms evidencia a capacidade do meio reacional de gerar corrente elétrica de forma natural, sem estímulo externo, apenas através da atividade das bactérias bioeletrossensíveis. Este resultado demonstra a eficácia do biocátodo formado naturalmente, promovendo a eletrossíntese microbiana. A atividade microbiana, indicada pelo crescimento do biocátodo, é responsável pela transferência de elétrons no sistema, gerando uma corrente elétrica contínua.

A conexão sustentável da eletrossíntese microbiana com a economia circular é evidente ao considerar seu impacto ambiental e econômico. A transformação do CO₂ em produtos de valor agregado não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também cria uma fonte renovável de compostos químicos, substituindo processos industriais tradicionais baseados em combustíveis fósseis. Este ciclo fechado de produção e consumo minimiza o desperdício e maximiza a reutilização de recursos, promovendo uma economia mais verde e sustentável. Trabalhos recentes têm destacado a importância dessa tecnologia para a sustentabilidade global, mostrando seu potencial para transformar a gestão de carbono e reduzir significativamente a pegada de carbono das indústrias (TIAN et al., 2022).

Além do aspecto técnico e ambiental, a aplicação de sistemas bioeletroquímicos baseados em eletrossíntese microbiana apresenta um avanço estratégico para a transição energética e a bioeconomia. A geração espontânea de corrente elétrica observada — como resultado direto da atividade metabólica das bactérias bioeletroativas — evidencia não apenas o funcionamento eficiente do biocátodo, mas também seu potencial para integração em tecnologias de produção descentralizada de energia e síntese de compostos de interesse industrial. Estudos recentes, como os de Choi et al. (2023), reforçam essa perspectiva, destacando a capacidade de biocátodos microbianos em atuar como plataformas catalíticas para a geração simultânea de energia elétrica e produtos químicos, integrando captura de carbono com conversão eletroquímica de alto valor agregado. Assim, a observação da geração de corrente elétrica autossustentada valida o conceito de biorreatores eletroquímicos como solução inovadora para desafios globais relacionados à redução de emissões e produção sustentável de insumos industriais essenciais.

A utilização do sistema bioeletroquímico permitiu avaliar a conversão de CO₂ em compostos orgânicos complexos a partir da ação de bactérias eletroquimicamente ativas em meio enriquecido com melão de cana-de-açúcar. A caracterização dos produtos formados foi realizada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), cujos principais resultados são apresentados nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 – Cromatogramas TIC obtidos por GC-MS, comparando a amostra controle (LAMA) e a solução após contato com o eletrodo de feltro de carbono (FC)

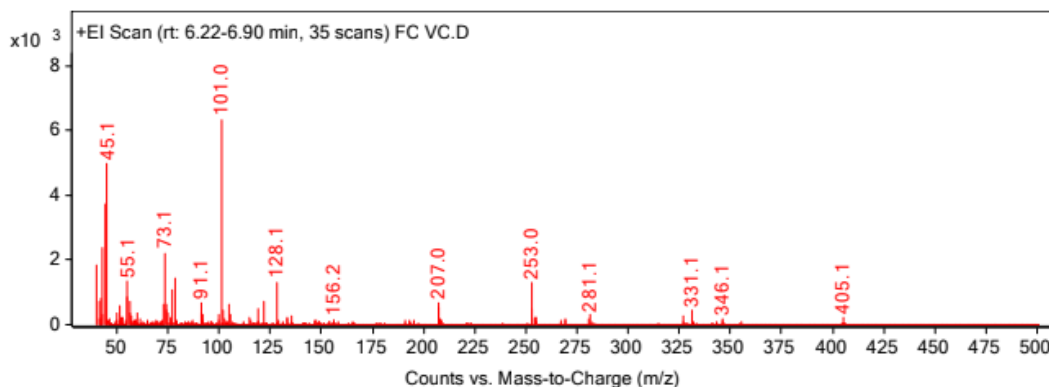


Fonte: Autor, 2025.

A figura 42 mostra os cromatogramas TIC obtidos das amostras controle e da amostra após contato com o eletrodo de feltro de carbono (FC). O pico principal, registrado em 10,68 minutos, permaneceu presente nas duas condições experimentais, indicando a estabilidade do composto precursor majoritário mesmo após o contato inicial com o eletrodo. Esta estabilidade sugere que, na etapa de adsorção e interação físico-química com o feltro de carbono, não houve degradação total da estrutura molecular presente no melão, mas sim processos iniciais de ativação ou adsorção superficial.

Por outro lado, os resultados apresentados na Figura 43 evidenciam alterações significativas após a aplicação da voltametria cíclica (FC VC). O espectro de massa obtido revelou a presença de fragmentos majoritários em m/z 101, 207, 253, 331 e 405, indicando a formação de moléculas de maior massa molar, possivelmente derivadas de compostos aromáticos substituídos. Esses fragmentos são compatíveis com estruturas do tipo 2,6-ditert-butil-4-metilfenol e butylated hydroxytoluene (BHT), detectados nos resultados de identificação, reforçando que o sistema foi capaz de promover reações de eletrossíntese microbiana, resultando na formação de produtos orgânicos mais complexos.

Figura 43 – Espectro de massa obtido da amostra após contato com feltro de carbono seguido da aplicação da voltametria cíclica (FC VC), evidenciando fragmentos relacionados a compostos aromáticos substituídos



Fonte: Autor, 2025.

No contexto da bioconversão do CO₂, destaca-se que microrganismos do gênero *Bacillus*, isolados e confirmados neste estudo, são reconhecidos por sua capacidade de facilitar reações de redução de carbono, atuando como agentes catalíticos biológicos em processos de eletrossíntese (MALIK et al., 2021). O mecanismo baseia-se na transferência extracelular de elétrons (EET), essencial para a fixação de carbono e subsequente conversão em intermediários orgânicos.

Apesar da ausência de detecção direta do acetato por GC-MS, fato atribuído à baixa massa molecular e alta polaridade do composto (necessitando derivatização para detecção), a acidificação observada no meio experimental e reportada por diversos autores (LORENZO; KARGI, 2022) sugere a formação de ácidos orgânicos voláteis, entre os quais o acetato é potencial metabólito intermediário. Portanto, não foi possível confirmar a presença do acetato por esta técnica, mas há indicativos indiretos de sua formação.

Esses achados reforçam que o sistema bioeletroquímico analisado foi eficaz na captura de CO₂ e conversão em compostos carbonáceos complexos, mesmo sem a detecção direta de ácidos de cadeia curta como o acetato. A síntese de compostos aromáticos substituídos, evidenciada pelo espectro de massa, valida o potencial da plataforma para produção de moléculas orgânicas de valor agregado por eletrossíntese microbiana, conforme descrito por Nevin et al. (2010) e Sharma et al. (2020).

VI. CONCLUSÃO

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.

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).

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.

Em resumo, a síntese das evidências 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.

As análises dos resultados da curva de polarização ao longo do experimento mostraram uma evolução significativa na atividade biocatalítica. No início, a corrente gerada pelos biocátodos foi moderada, mas aumentou de forma consistente ao longo do tempo, indicando que as bactérias eletrossensíveis se adaptaram gradualmente ao ambiente eletroquímico.

Os VC realizados durante a fase operacional forneceram informações valiosas sobre a eficiência e a sustentabilidade do processo de captura e conversão de CO₂ em compostos orgânicos. A comparação dos gráficos de voltametria cíclica ao longo dos diversos ciclos experimentais mostrou uma clara melhoria na atividade eletroquímica das bactérias.

A análise dos espectros de FTIR complementou os dados eletroquímicos, oferecendo uma visão detalhada sobre a composição química das amostras ao longo do processo de eletrossíntese microbiana. Os espectros FTIR indicaram a presença de compostos orgânicos como álcoois, ácidos carboxílicos, cetonas, ésteres, éteres e possivelmente amidas, tanto durante quanto após o processo de eletrossíntese..

A consistência nas medições de voltametria cíclica e a repetibilidade dos ciclos garantiram a formação de um biocátodo eficiente, capaz de interagir eficazmente com o CO₂. Essa interação facilitou a captura e conversão do CO₂ em produtos orgânicos, conforme corroborado pelos dados de FTIR. A eficiência do biocátodo foi demonstrada pela capacidade do sistema de manter uma produção contínua de corrente elétrica, mesmo em condições naturais, sem estímulos externos, destacando a viabilidade do processo bioeletroquímico.

A análise de componentes principais e os diagramas de Venn utilizados na comparação das comunidades microbianas revelaram uma adaptação e evolução significativa das bactérias ao longo do experimento. A identificação de unidades taxonômicas operacionais compartilhadas e exclusivas permitiu mapear as mudanças na composição microbiana, indicando que o sistema foi capaz de sustentar uma comunidade microbiana diversificada e eficiente na captura e conversão de CO₂. Este mapeamento foi essencial para validar a eficácia do sistema e identificar os microrganismos mais ativos no processo de eletrossíntese.

Em conclusão, os dados coletados ao longo do experimento validam a captura eficiente de CO₂ e a conversão em produtos de valor agregado através da eletrossíntese microbiana. O uso de melaço de cana-de-açúcar como meio reacional demonstrou ser altamente eficaz, não apenas na promoção da atividade biocatalítica, mas também na geração sustentável de energia. Este estudo confirma o potencial dos sistemas bioeletroquímicos como uma solução viável para a mitigação das emissões de CO₂ e a promoção de uma economia circular, alinhando-se com os objetivos globais de sustentabilidade ambiental.

VII. PERSPECTIVAS

Até o final da defesa desta tese, planejamos realizar uma série de experimentos adicionais para otimizar o processo de eletrossíntese microbiana. Pretendemos ajustar a concentração do meio reacional, variando os níveis de nutrientes e açúcares para encontrar as condições ideais que maximizem a atividade bacteriana e a eficiência na conversão de CO₂. Além disso, prolongaremos os tempos de eletrólise para analisar com mais profundidade o desenvolvimento dos biocátodos e a estabilidade do sistema ao longo de períodos mais longos. Também realizaremos testes sem fonte de energia externa para verificar se o sistema pode manter a produção de corrente elétrica e a conversão de CO₂ exclusivamente através da atividade microbiana.

Outro ponto importante será a investigação de diferentes materiais de eletrodos, na busca por opções que sejam tanto eficientes quanto econômicas, visando aumentar a eficácia do processo de eletrossíntese. Testaremos também outras membranas que sejam mais acessíveis financeiramente do que a Nafion, buscando reduzir os custos operacionais. Para aprofundar a compreensão dos processos envolvidos, utilizaremos técnicas avançadas como Cromatografia Gasosa com Espectrometria de Massas (CGMS), Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) e Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMNH). Essas técnicas nos permitirão identificar e quantificar com precisão os produtos formados, proporcionando uma base sólida para futuras otimizações e aplicações industriais dos sistemas bioeletroquímicos. Estamos abertos a sugestões da banca examinadora para aprimorar ainda mais a pesquisa e garantir resultados robustos e aplicáveis.

VIII. REFERÊNCIAS

- AL-MAMUN, A.; AHMED, W.; JAFARY, T.; NAYAK, J. K.; AL-NUAIMI, A.; SANA, A. **Recent advances in microbial electrosynthesis system: metabolic investigation and process optimization**. *Biochemical Engineering Journal*, v. 196, p. 108928, 2023.
- BAJRACHARYA, S.; SRIKANTH, S.; MOHANAKRISHNA, G.; ZACHARIA, R.; STRIK, D. P.; PANT, D. **Biotransformação de dióxido de carbono em sistemas bioeletroquímicos: estado da arte e perspectivas futuras**. *Journal of Sources Energy*, v. 356, p. 256–273, 2017.
- 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.
- BRAZIL, **National Supply Company – CONAB**. *Sugarcane Bulletin – 1st Survey 2025/2026*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/1o-levantamento-safra-2025-26/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2025-26>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- CANAL DA CANA. **Researchers develop the first synthetic molasses for research and fermentation purposes**. 2024. Disponível em: <https://canaldacana.com.br/post-single.php?idnoticia=9142>. Acesso em: 4 fev. 2025.
- CHANG, Y. **Circular economy and sustainable resource management**. Elsevier, 2022.
- CHEN, G. et al. **Carbon dioxide reduction to high-value chemicals in microbial electrosynthesis system: biological conversion and regulation strategies**. *Chemosphere*, v. 344, p. 140251, 2023.
- CHRISTODOULOU, X.; OKOROAFOR, T.; PARRY, S.; VELASQUEZ-ORTA, S. B. **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.** *ChemElectroChem*, v. 7, p. 1–19, 2020.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre. **Orçamento global de carbono 2023.** Exeter: **Global Systems Institute**, Universidade de Exeter, 2023. Disponível em: <https://globalcarbonbudget.org/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

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.

JONES, D.; GREENFIELD, S. **Bioelectrochemical systems for carbon capture and conversion to chemicals.** *Journal of Biochemical Engineering*, v. 58, n. 3, p. 273–289, 2019.

JOURDIN, L. **Microbial electrosynthesis from carbon dioxide: performance enhancement and elucidation of mechanisms.** 2016. Tese (Doutorado) — University of Queensland.

JOURDIN, L.; BURDYN, T. **Microbial electrosynthesis: where do we go from here?** *Trends in Biotechnology*, v. 39, p. 359–369, 2021.

KUMAR, G. et al. **Electrochemical behavior of *Bacillus subtilis* in bioelectrochemical CO₂ reduction systems using sugar-rich substrates.** *Journal of CO₂ Utilization*, v. 55, p. 101–109, 2022.

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.

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.

LEE, J.; KIM, S.; LEE, J. **Microbial fuel cells: a bioelectrochemical system for sustainable energy production.** *Journal of Environmental Management*, v. 269, 110760, 2021.

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. et al. **Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems.** *Nature Reviews Microbiology*, v. 17, n. 5, p. 307–319, 2019.

LORENZO, M.; KARGI, F. **Bioconversion of CO₂ to organic acids using microbial electrosynthesis: a critical review.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 1, p. 106891, 2022.

MALIK, S.; RAMESH, K.; GOEL, A. **Recent advancements in microbial electrosynthesis: biochemical basis, reactor configurations and applications.** *Bioresource Technology Reports*, v. 15, p. 100706, 2021.

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, 2010.

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.

RABAEY, K.; ROZENDAL, R. A. **Microbial electrosynthesis—revisiting the electrical route for microbial production.** *Nature Reviews Microbiology*, v. 8, p. 706–716, 2010.

SCHRÖDER, U. **Bioelectrochemical systems: principles and applications.** Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.

SHARMA, M. et al. **Microbial bioelectrochemical systems for sustainable production of biofuels and chemicals: principles and recent developments.** *Bioresource Technology*, v. 313, p. 123631, 2020.

SILVA, R. B. et al. **Carbon felt electrodes for biotechnological applications: structure, modification and performance.** *Materials Science for Energy Technologies*, v. 8, p. 52-61, 2022.

SMITH, J.; DAVIS, R.; THOMPSON, K. **Electrosynthesis: a promising route for carbon neutrality.** *Advanced Energy Materials*, v. 11, n. 3, 2003135, 2021.

VENKATA MOHAN, S.; PANDEY, A.; VARJANI, S. **Microbial electrochemical technology: sustainable platform for fuels, chemicals and remediation.** Elsevier, 2018.

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, T. et al. **Microbial electrosynthesis: opportunities for chemical production.** *Chemical Society Reviews*, v. 41, p. 6186–6196, 2012.

ZHAO, Z. et al. **China's innovation policy and clean energy technologies: institutional evolution and strategic directions.** *Energy Policy*, v. 164, p. 112876, 2022.