CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

# ROADMAP TECNOLÓGICO NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE BIOMETANO INTEGRADA COM HIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Janaina de Araujo Santos Martins

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título em Mestrado.

Orientador(a): Ronney Arismel Mancebo Boloy

Rio de Janeiro
Dezembro 2024

ROADMAP TECNOLÓGICO NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE BIOMETANO INTEGRADA COM HIDROGÊNIO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestrado.

Janaina de Araujo Santos Martins

Banca Examinadora:

Presidente, Professor Dr. Ronney Arismel Mancebo Boloy (CEFET/RJ) (Orientador)

Professor Dr. Marco Antônio Barbosa Braga (CEFET/RJ)

Professor Dr. Daniel de Cerqueira Lima e Penalva Santos (IFPE)

Rio de Janeiro
Dezembro 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M386 Martins, Janaina de Araujo Santos
ROADMAP tecnológico na produção sustentável de biometano integrada com hidrogênio a partir de resíduos sólidos urbanos / Janaina de Araujo Santos Martins. — 2024.
70f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 68-70
Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy

1. Gás natural. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos. 3. Sustentabilidade. 4. Planejamento estratégico . I. Boloy, Ronney Arismel Mancebo. (Orient.). II. Título.

CDD 553.285

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

# RESUMO

**Roadmap tecnológico na produção sustentável de biometano integrada com hidrogênio a partir de resíduos sólidos urbanos**

A pesquisa explorou o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de biometano e hidrogênio por meio de um quadro de avaliação estratégica que integra as dimensões Ambiental, Social, Econômica e de Governança (EESG). Utilizando a metodologia de Roteirização Tecnológica (TRM) combinada com análise bibliométrica, a análise PRISMA e a patentometria, pesquisa identificou tecnologias emergentes, destacando oportunidades e desafios na sua implementação. Os resultados revelaram lacunas significativas, principalmente na integração das dimensões de governança e sustentabilidade nas tecnologias de produção de biometano e hidrogênio. Oportunidades científicas foram identificadas em áreas como a eficiência dos processos de digestão anaeróbica e a aceitação social dessas tecnologias, especialmente em regiões periféricas. A análise de patentes indicou uma forte atividade inovadora, com um aumento significativo no número de patentes relacionadas à produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais. Este estudo contribui para o campo do conhecimento ao fornecer um roteiro estratégico para a evolução dessas tecnologias, sugerindo caminhos para superar barreiras regulatórias e incentivando o alinhamento das políticas públicas com os compromissos climáticos globais.

Palavras-chave: Biometano; Hidrogênio; Resíduos sólidos urbanos; *Roadmap* tecnológico; Sustentável; Revisão sistemática da literatura; Análise Bibliométrica; Econômico; Ambiental; Social; Governança.

# ABSTRACT

**Technological roadmap for sustainable production of biomethane integrated with hydrogen from municipal solid waste**

The research explored the development and implementation of biomethane and hydrogen technologies through a strategic evaluation framework integrating Environmental, Social, Economic, and Governance (EESG) dimensions. Utilizing the Technology Roadmapping (TRM) methodology combined with bibliometric analysis, PRISMA analysis, and patentometry, the study identified emerging technologies, highlighting opportunities and challenges in their implementation. The results revealed significant gaps, particularly in the integration of governance and sustainability dimensions in biomethane and hydrogen production technologies. Scientific opportunities were identified in areas such as improving the efficiency of anaerobic digestion processes and the social acceptance of these technologies, especially in peripheral regions. Patent analysis indicated strong innovative activity, with a significant increase in patents related to the production of biomethane and hydrogen from urban and municipal waste. This study contributes to the field of knowledge by providing a strategic roadmap for the evolution of these technologies, suggesting pathways to overcome regulatory barriers and encouraging the alignment of public policies with global climate commitments.



Keywords: Biomethane; Hydrogen; Municipal Solid Waste; Technological Roadmap; Sustainable; Systematic Literature Review; Bibliometric Analysis; Economic; Environmental; Social; Governance.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões EESG ..... 19
Figura 2 - Fluxograma PRISMA dos artigos selecionados ..... 22
Figura 3 - Mapa de coautoria entre países ..... 35
Figura 4 - Coocorrência com Palavra-chave do Autor ..... 38
Figura 5 - Visualização de Sobreposição das Palavras-chave dos Autores ..... 43
Figura 6 - Gráfico de Status Legal ..... 44
Figura 7 - Gráfico de Depósitos de Patentes ao Longo dos Anos ..... 47
Figura 8 - Famílias de Patentes por País de Proteção ..... 48
Figura 9 - Gráfico de Publicação de Patentes por País ..... 49
Figura 10 - Gráfico de Conceitos por Titular ..... 50
Figura 11 - Gráfico de Titular por Status Legal ..... 51
Figura 12 - Gráfico de conceitos ..... 52
Figura 13 - Total de tecnologias mencionadas no PRISMA ..... 54
Figura 14 - Total de resíduos mencionadas no PRISMA ..... 54
Figura 15 - Roadmap – Camada das tecnologias de conversão ..... 58
Figura 16 - Roadmap – Camada dos produtos ..... 59

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características e resultados dos dez artigos selecionados (parte 1) . 29
Tabela 2 - Principais características e resultados dos dez artigos selecionados (parte 2) . 31
Tabela 3 - Mapa de coautoria entre países..... 35
Tabela 4 - Detalhamento dos Clusters de Coocorrência das Palavras-chave dos Autores 39
Tabela 5 - Taxonomia e frequências da tabela PRISMA..... 57

# NOMENCLATURAS

| | |
|---|---|
| $CH_4$ | Metano |
| $CO_2$ | Dióxido de carbono |
| $H_2S$ | Sulfeto de hidrogênio |

# ABREVIAÇÕES

| | |
|---|---|
| CCMs | Células a Combustível Microbianas |
| EESG | *Environmental, Economic, Social, and Governance* (Dimensões econômica, ambiental, social e governança) |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| IA | *Inteligence Artificial* (Inteligência Artificial) |
| IoT | *Internet of things* (Internet das coisas) |
| PCT | Patent Cooperation Treaty (Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes) |
| PRISMA | *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (Itens Preferenciais para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises) |
| TRM | *Technology Roadmapping* (Mapeamento de Tecnologia) |
| WIPO | World Intellectual Property Organization (Organização Mundial da Propriedade Intelectual) |

# SUMÁRIO


**1 Introdução 11**
2 Metodologia 17
2.1 Etapa pré-prospectiva 18
3 Resultados e Discussões 22
3.1 Previsão tecnológica 22
3.1.1 Resultados da Revisão Sistemática 22
3.1.2 Resultados da Análise Bibliométrica 34
3.1.2.1 Coautoria com Países 34
3.1.2.2 Coocorrência com Palavra-chave do Autor 38
3.1.3 Resultado da análise de patentes 43
3.2 Desenvolvimento do Roadmap 53
3.3 Avaliação estratégica 60
3.3.1 Evolução tecnológica 60
3.3.2 Dimensão econômica 62
3.3.3 Dimensão ambiental 63
3.3.4 Dimensão social 64
3.3.5 Dimensão de governança 64
3.4 Contribuição científica 65
3.4.1 Inovação metodológica 65
3.4.2 Impactos na comunidade científica 66
3.4.3 Relevância estratégica 67
**Considerações finais 68**
**Referências 70**

# 1 Introdução

A crescente demanda por energia sustentável e a necessidade de uma gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos (RSU) têm impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para a produção de biometano, buscando a valorização desses resíduos, inclusive promovendo a integração do hidrogênio de baixo carbono (hidrogênio) quando possível. Produzir de forma integrada biometano e hidrogênio a partir de RSU não só contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também promove uma economia circular ao transformar (valorizar) resíduos em recursos energéticos valiosos. Essa abordagem é crucial para atender os compromissos do Acordo de Paris, que visa limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 graus Celsius em relação aos níveis pré-industriais, promovendo esforços para limitar o aumento a 1,5 graus Celsius.

Para tornar viável o desenvolvimento de tecnologias para produção integrada de biometano e hidrogênio a partir de resíduos sólidos urbanos, promover políticas públicas sob a óptica das dimensões de sustentabilidade, a saber: econômica, ambiental, social e de governança é mandatório. Essas políticas públicas podem ser construídas a partir de indicadores, prevendo sua disseminação em curto, médio e longo prazo, este último conhecido como perspectivas futuras, dessa maneira, o Roadmap tecnológico pode ser fundamental nesta construção, trata-se de um plano estratégico que descreve as etapas necessárias para alcançar os resultados e objetivos definidos promovendo a implantação de uma determinada tecnologia em um período. Atualmente, a produção integrada de biometano e hidrogênio enfrenta diversas limitações, entre elas, destacam-se a falta de padronização e certificação global que assegurem a qualidade e segurança dessas tecnologias, além da escassa integração da dimensão de governança com os aspectos técnicos e regulatórios. Adicionalmente, desafios tecnológicos como a eficiência limitada dos processos de conversão e a viabilidade econômica ainda representam barreiras significativas para a implementação em larga escala. Essas limitações, aliadas à necessidade de maior aceitação social, especialmente em regiões periféricas, evidenciam a urgência em promover incentivos políticos e estratégias de governança que fomentem um desenvolvimento mais robusto e sustentável dessas soluções tecnológicas.

Diante das urgentes demandas ambientais e climáticas, o hidrogênio e o biometano emergem como soluções promissoras para a transição energética, devido suas baixas emissões de carbono e potencial de sustentabilidade. O hidrogênio se destaca devido seu alto valor energético, sendo pelo menos 2,75 vezes maior que os combustíveis fósseis, sendo utilizado principalmente nas indústrias químicas e petroquímicas, em processos como refino de combustíveis e síntese de amônia (Albuquerque, 2024), com especial interesse no tipo “verde”, obtido a partir de fontes renováveis, o hidrogênio apresenta potencial de integração em setores de alta emissão, como o industrial e de transporte, além de ser uma alternativa em aplicações residenciais e de energia (Noussan, 2021). Dentre os métodos de conversão relacionados a produção de hidrogênio, a eletrólise se destaca pelo alto rendimento, porém, devido ao alto consumo de energia, pode impactar a pegada de carbono caso a eletricidade do processo não for renovável, ao contrário da fermentação escura, que representa o processo biológico anaeróbico de degradação de compostos orgânicos realizado por microrganismos na ausência de luz, que apesar de possuir baixo potencial energético em relação a eletrólise, requer baixa demanda de energia em consequência da utilização de resíduos como fonte de carbono (Albuquerque, 2024). Já o biometano, produzido a partir da purificação do biogás obtido de resíduos orgânicos via digestão anaeróbica, complementa essa cadeia ao permitir o reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos e industriais, alinhando-se aos princípios da economia circular (Nadaleti, 2021).

No Brasil, o incentivo ao uso de combustíveis sustentáveis tem ganhado força com políticas recentes, incluindo o Projeto de Lei 4516/2023, que estabelece diretrizes para o desenvolvimento dos "combustíveis do futuro", englobando hidrogênio de baixo carbono, biometano e combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). A legislação busca regulamentar e fomentar tecnologias que suportam a captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS), essenciais para atingir as metas climáticas globais (Brasil, 2023). Além disso, a política de biocombustíveis brasileira — incluindo o RenovaBio — e o plano estratégico da rota 20-30 de mobilidade sustentável, promovem o uso do biometano e de combustíveis avançados no transporte rodoviário, setor em que a mistura de etanol anidro com gasolina, que deve atingir 30%, representa um marco de descarbonização (Tiburcio, 2023). Esse cenário, pautado em legislações e avanços tecnológicos, cria oportunidades para a integração do biometano e do hidrogênio na matriz energética, impulsionando a transição para um futuro de baixo carbono e ampliando a resiliência das políticas públicas voltadas à energia sustentável.

O hidrogênio é amplamente reconhecido como uma das fontes de energia mais limpas atualmente disponíveis, destacando-se por sua elevada densidade energética e capacidade calorífica. Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de ser armazenado em forma química, o que o torna viável para diversas aplicações. Além disso, o hidrogênio possui um papel significativo na economia, especialmente ao favorecer a mudança de um modelo econômico linear para um modelo baseado na economia circular (Nadaleti, 2021). A pureza do ar nos centros urbanos pode ser aprimorada pela substituição de combustíveis fósseis por biogás, biometano e outras combinações de combustíveis.

O biogás é uma mistura de gases, principalmente metano ($CH_4$) e dióxido de carbono ($CO_2$), produzida pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica por microrganismos. Pode ser utilizado como fonte de energia renovável para geração de eletricidade, aquecimento, combustível para veículos e biofertilizantes. No entanto, para que o biogás seja usado como combustível para veículos ou injetado na rede de gás natural, ele deve ser purificado para remover o $CO_2$ e outras impurezas, resultando em biometano, um combustível com alta concentração de metano e propriedades semelhantes ao gás natural fóssil. (Peters R. B., 2019; Feki, 2015) . O biogás bruto geralmente é composto por metano (50−75%), dióxido de carbono (25−50%), pequenas quantidades de nitrogênio (2−8%) e níveis traços de sulfeto de hidrogênio, amônia, hidrogênio e vários compostos orgânicos voláteis, dependendo da matéria-prima (Li, 2019). Após a remoção de componentes nocivos em traços, um processo de atualização remove o $CO_2$ para aumentar o valor calorífico, e o produto pode ser usado como uma alternativa ao gás natural, promovendo uma aplicação mais flexível (R. C. Assunção, 2021). Estudos de avaliação do ciclo de vida mostraram que a implantação de tecnologias de biogás pode efetivamente reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, portanto, reduzir o impacto climático do consumo de energia (Li, 2019).

A digestão anaeróbica é um processo biológico em que a matéria orgânica é decomposta por microrganismos na ausência de oxigênio. A digestão anaeróbica é aplicada a vários substratos orgânicos, como esterco animal, resíduos agrícolas, resíduos alimentares e lodo de esgoto, para produzir biogás. Este processo ocorre em várias etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A otimização dessas etapas pode maximizar a produção de biogás (Kong, 2021). Durante a hidrólise, polímeros orgânicos complexos são decompostos em monômeros solúveis. Na acidogênese, esses monômeros são convertidos em ácidos graxos voláteis, álcool, $CO_2$ e hidrogênio. Na acetogênese, os ácidos graxos são convertidos em acetato, $CO_2$ e hidrogênio, e

finalmente, na metanogênese, o acetato, $CO_2$ e hidrogênio são convertidos em metano e água (Elsamadony, 2015). Esse processo é altamente eficiente na redução do volume de resíduos e na produção de biogás, que pode ser usado como fonte de energia renovável (Kong, 2021; Ennouri, 2016).

A estrutura de análise das dimensões EESG é um marco que considera aspectos ambientais, sociais, econômicos e de governança na avaliação de projetos e tecnologias. Essa estrutura é essencial para garantir que as tecnologias de produção de biometano sejam sustentáveis e contribuam positivamente para a sociedade (PtX Hub Berlin, 2021).

A dimensão ambiental envolve a análise dos impactos ambientais da tecnologia, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa, o uso eficiente dos recursos e a minimização de resíduos, conforme abordado no estudo de Li (2019). A produção de biogás pode reduzir significativamente as emissões de $CO_2$, contribuindo para as metas do Acordo de Paris. A dimensão social considera os benefícios e impactos sociais, como a criação de empregos, a melhoria da qualidade de vida e a aceitação social da tecnologia. A dimensão econômica avalia a viabilidade econômica, incluindo os custos de implementação, operação e manutenção, bem como os benefícios econômicos, como a geração de receita e a redução dos custos com energia e tratamento de resíduos.

No estudo realizado por Essamadony *et al.* (2015) a análise econômica mostrou que a codigestão de resíduos orgânicos pode ser uma solução economicamente viável. A dimensão de governança envolve a análise das políticas, regulamentações e estruturas de governança necessárias para a implementação e operação eficaz da tecnologia. O estudo de Enouri *et al*. (2016) abordou que uma governança adequada é crucial para garantir o sucesso das iniciativas de produção de biogás e biometano.

O propósito desta pesquisa é explorar e avaliar as tecnologias emergentes para a produção de biometano a partir de resíduos urbanos e municipais, com uma análise centrada nas dimensões ambiental, social, econômica e de governança (EESG). Essa pesquisa visa, ainda, preencher as lacunas existentes na literatura, identificando os desafios e oportunidades na implementação dessas tecnologias. Ao adotar uma abordagem que combina Roteirização Tecnológica (TRM), análise PRISMA, bibliometria e patentometria, o estudo busca fornecer um roteiro estratégico que auxilie a comunidade científica, formuladores de políticas públicas e gestores na tomada de decisões sobre o desenvolvimento sustentável de tecnologias de biometano. Assim, espera-se contribuir para uma transição energética mais verde, alinhada aos compromissos internacionais

de redução de emissões e promoção de uma economia circular. Embora o estudo avance na identificação de tecnologias emergentes e na análise de sua viabilidade, as limitações científicas atuais são evidentes na falta de padrões e certificações globais que garantam a qualidade e segurança dessas tecnologias, assim como uma governança que alinhe as políticas públicas com a inovação tecnológica. As oportunidades científicas residem na expansão da pesquisa voltada para melhorar a eficiência dos processos de digestão anaeróbica e na criação de mecanismos que promovam a aceitação social dessas tecnologias, especialmente em regiões periféricas. No entanto, a ausência de uma abordagem integrada que considere simultaneamente os aspectos técnicos e regulatórios limita a melhoria do desempenho das soluções propostas, tornando urgente o estabelecimento de políticas de incentivo e a harmonização de padrões internacionais para garantir a sustentabilidade a longo prazo dessas tecnologias.

A produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais representa uma solução promissora para a gestão sustentável de resíduos e a geração de energia renovável. Este processo não só contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também promove uma economia circular ao transformar resíduos em recursos energéticos valiosos.

Os artigos revisados forneceram uma visão ampla dos diferentes aspectos envolvidos no processo de produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais, desde o pré-tratamento dos resíduos até a otimização dos processos de digestão anaeróbica e purificação do biogás. A grande maioria utiliza a digestão anaeróbica como tecnologia de conversão, seguida pela codigestão, processos bioeletroquímicos e pré-tratamentos térmicos e químicos.

Por meio desta pesquisa, foi cumprido o objetivo de contribuir com a comunidade científica fornecendo uma análise abrangente e integrada das tecnologias de biometano e hidrogênio, destacando a necessidade de convergência entre a inovação tecnológica e a sustentabilidade. Ao focar nas dimensões EESG, este trabalho não só identifica os desafios e oportunidades existentes, mas também sugere caminhos para a evolução dessas tecnologias. Desta forma, espera-se que este estudo sirva como uma base sólida para futuras pesquisas em busca de soluções práticas e escaláveis para a gestão de resíduos urbanos e a produção de energia renovável, contribuindo para o progresso global na transição energética.

Esta dissertação de mestrado apresenta uma revisão sistemática e análise do *Roadmap* Tecnológico (TRM) aplicado à produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais, com base na estrutura EESG (ambiental, social,

econômica e de governança), utilizando a metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) combinada com análise bibliométrica e patentometria, com o auxílio dos softwares VOSviewer, Questel Orbit Intelligence e OpenRefine, destacando os principais desafios e oportunidades para a implementação de tecnologias sustentáveis de produção de biometano e hidrogênio.

Para realizar uma análise abrangente sobre o tema, foi estabelecida uma correlação entre as tecnologias de conversão, os produtos utilizados e as dimensões EESG identificadas nos principais estudos publicados nos últimos dez anos, conforme listado na tabela PRISMA, e nas informações obtidas por meio da patentometria. Esse processo resultou na criação de um roadmap que considerou as tecnologias de conversão e os produtos como as taxonomias para as camadas meso e micro que o compõem. Adicionalmente, a correlação entre as interações de coautoria entre países e as análises de coocorrência de palavras-chave dos autores foi realizada utilizando o software VOSviewer.

Este estudo oferece uma revisão da produção de biogás e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais, com previsões e *insights* para as dimensões EESG e as tecnologias envolvidas neste processo.

# 2 Metodologia

Um *Roadmap* Tecnológico é um plano estratégico que descreve as etapas necessárias para alcançar os resultados e objetivos definidos (Gonzalez-Salazar, 2016).

A metodologia de *Roadmap* Tecnológico (TRM) é uma ferramenta estratégica usada para planejar e gerenciar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias ao longo do tempo. Ela envolve a identificação de tecnologias, a avaliação de seus impactos e o desenvolvimento de um *roadmap* para sua implementação. A TRM ajuda a identificar necessidades futuras, estabelecer prioridades, alocar recursos e monitorar os progressos (R. C. Assunção, 2021).

A aplicação da TRM neste estudo de revisão sobre a produção de biometano e hidrogênio envolveu as seguintes etapas:

- Etapa Pré-prospectiva: Revisão sistemática da literatura com análise de dados bibliométricos, identificando tecnologias existentes e emergentes com foco nas dimensões EESG e identificando inovações futuras por meio de buscas de patentes e análise de dados, com o suporte do *software* Orbit Intelligence da Questel.
- Previsão Tecnológica: Discussão dos achados com análise do estado atual das tecnologias de conversão de biometano e hidrogênio, patentes, políticas, regulamentações e estruturas de governança.
- Desenvolvimento do *Roadmap*: Desenvolvimento de um plano estratégico que mapeia as trajetórias de desenvolvimento e implementação das tecnologias.
- Avaliação Estratégica: Análise das tecnologias de conversão, ressaltando os avanços tecnológicos esperados e influência regulatória.

Para viabilizar a aplicação do método, as informações foram coletadas por meio de uma revisão sistemática da literatura e análise bibliométrica dos documentos encontrados, em detrimento de entrevistas e workshops, como comumente aplicado (Gonzalez-Salazar, 2016).

## 2.1 Etapa pré-prospectiva

### 2.1.1 Revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática da literatura foi realizada em junho de 2024 na base de dados Scopus, seguindo os critérios do "*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses"* (PRISMA) para selecionar artigos relevantes, resultando em uma amostra de 10 artigos que atenderam aos critérios. A metodologia PRISMA permite visualizar os resultados por meio de um diagrama que detalha informações relacionadas aos resultados totais identificados, triados, elegíveis e, finalmente, selecionados para análise.

A base de dados Scopus contém uma coleção mais abrangente de estudos em comparação com outras bases, tornando-a a fonte mais adequada para a realização dessa pesquisa (Kar, 2022).

A busca considerou apenas artigos e revisões publicados em inglês, no período de 2014 a 2024, com acesso aberto. Para a estratégia de busca, foram utilizados os seguintes termos: "*TITLE-ABS-KEY* (*hydrogen AND "biogas" AND ("urban waste*" OR "municipal waste*"*)). Foram obtidos 168 resultados antes de considerar os filtros mencionados. No entanto, após o processo de refinamento, o número caiu para 86 artigos, nos quais foram selecionados os 10 artigos mais citados na literatura para compor o PRISMA.

Os resultados desta busca foram exportados com registros completos e referências citadas e salvos em um formato compatível com o OpenRefine, uma ferramenta que auxilia na exploração de grandes conjuntos de dados, alterando formatos que podem estar desorganizados, removendo duplicatas e tornando essas informações mais organizadas e fáceis de ler. Cada artigo foi analisado com base nas dimensões EESG, avaliando os impactos de cada tecnologia e identificando os aspectos ambientais, sociais, econômicos e de governança abordados.

A abordagem EESG consiste em uma estrutura analítica que integra quatro dimensões essenciais para avaliar a sustentabilidade e o impacto de projetos, políticas e tecnologias, sendo elas: Ambiental, Social, Econômica e de Governança. Cada uma dessas dimensões é subdividida em clusters, representando áreas específicas de interesse e preocupação dentro de cada dimensão (PtX Hub Berlin, 2021). A integração dessas dimensões permite uma avaliação holística e equilibrada, essencial para promover a sustentabilidade e a responsabilidade social em diversos contextos.

Na Figura 1, é possível identificar cada dimensão e seus clusters, detalhando quais parâmetros são considerados em cada um desses clusters.




Figura 1 - Dimensões EESG

Fonte: Adaptado de (PtX Hub Berlin, 2021).

### 2.1.2 Metodologia de análise bibliométrica

Os métodos bibliométricos oferecem uma forma quantificável, objetiva e transparente de avaliar o impacto da pesquisa. O desenvolvimento constante de *softwares* analíticos possibilita a avaliação de extensas bases de dados com escopo local ou global, dependendo da análise realizada, além de resumir os autores mais proeminentes e os documentos publicados (Kar, 2022).

Para realizar a análise dos dados processados pelo OpenRefine, foi utilizado o software VOSviewer. Essa ferramenta fornece mapas bibliométricos de fácil interpretação, que podem incluir coautoria entre países, coocorrências de palavras-chave dos autores, cocitação, citação ou acoplamento bibliográfico. Os gráficos gerados são representados por círculos, que variam em tamanho de acordo com a relevância do item analisado, e por conexões que representam a proximidade do vínculo entre os itens em análise. A seleção de cores para os círculos e suas posições indica o agrupamento dos itens (Pizzi, 2020).

A análise das relações bibliométricas envolve vários tipos de interações dentro da literatura científica. Na análise de coautoria, os países são usados como unidades para medir a colaboração entre pesquisadores, identificando o número de autores de diferentes países que contribuem para um artigo. A análise de cocitação envolve examinar a frequência com que certas fontes ou autores são citados juntos em vários documentos, destacando com que frequência diferentes trabalhos de pesquisa são referenciados em conjunto. A análise de coocorrência foca na frequência com que palavras-chave específicas dos autores aparecem juntas nos artigos de pesquisa, indicando temas ou tópicos comuns que estão sendo estudados.

No campo da produção de biogás, a análise de coautoria pode revelar colaborações entre pesquisadores de países que investem ativamente em tecnologias de energia renovável, como Alemanha e China. A análise de cocitação pode mostrar quais artigos fundamentais sobre tecnologia de biogás são frequentemente citados juntos, indicando sua influência na pesquisa atual. A análise de coocorrência poderia identificar temas-chave na pesquisa de biogás, como "digestão anaeróbica" e "energia sustentável", que frequentemente aparecem juntas na literatura, demonstrando tópicos de pesquisa predominantes (Jaramillo, 2023).

Os indicadores bibliométricos listados para o estudo foram: mapas de coautoria entre países e coocorrência de palavras-chave dos autores.

### 2.1.3 Busca de patentes

A análise do panorama de patentes relacionadas à produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais foi essencial para identificar tecnologias emergentes e parceiros tecnológicos chave.

Garantir o crescimento econômico sustentável, bem como um ambiente limpo que promova o bem-estar social, está associado a iniciativas em ciência, tecnologia e inovação (de Melo, 2021). Além disso, em um ambiente altamente competitivo, as empresas utilizam informações de patentes como parte de suas estratégias de desenvolvimento tecnológico. Compreender as informações de patentes como um cluster é o princípio do Mapeamento de Patentes. O uso de mapas para avaliação de patentes exige a coleta de informações de patentes, que podem ser organizadas em tabelas, gráficos ou diagramas como formas visuais de apresentação para fins específicos (Japan Patent Office, 2011).

Para este estudo, foi considerada uma análise qualitativa, utilizando informações contidas nos documentos de patentes com o auxílio do *software* Orbit Intelligence da Empresa Questel. Este *software* permite o acesso a uma vasta base de dados dos principais escritórios de patentes, dentre eles: CN, US, JP, KR, WO, CA, IN, BR, AU e EP, representando 85% das solicitações de patentes do mundo, permitindo o cruzamento e a análise de diversos dados contidos nas patentes registradas. Ele possui uma base de dados com mais de 100 milhões de patentes (Questel, 2024). Além da análise qualitativa que forneceu *insights* sobre os países e parceiros tecnológicos com mais patentes aplicadas ao longo dos anos no campo da produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais, listando os principais tipos de tecnologias de conversão utilizadas.

O acesso ao *software* ocorreu em 23/07/24, e o período de contagem de patentes adotado neste estudo é de 20 anos, utilizando a mesma *string* de busca aplicada na revisão sistemática da literatura, considerando os seguintes campos de coleta: "título", "resumos", “descrição”, "reivindicações" e "objeto da invenção".

A busca avaliou tanto patentes ativas, que incluem solicitações concedidas e pendentes, quanto inativas, que correspondem a solicitações revogadas, caducadas ou expiradas.

# 3 Resultados e Discussões

## 3.1 Previsão tecnológica

### 3.1.1 Resultados da Revisão Sistemática

Inicialmente, 168 artigos foram identificados na base de dados Scopus, e após a aplicação dos critérios de refinamento, 82 documentos foram excluídos. A seleção dos artigos mais citados resultou em dez documentos, que foram então sintetizados para compor a análise qualitativa. A Figura 2 abaixo apresenta o diagrama de fluxo PRISMA dos artigos incluídos na revisão.

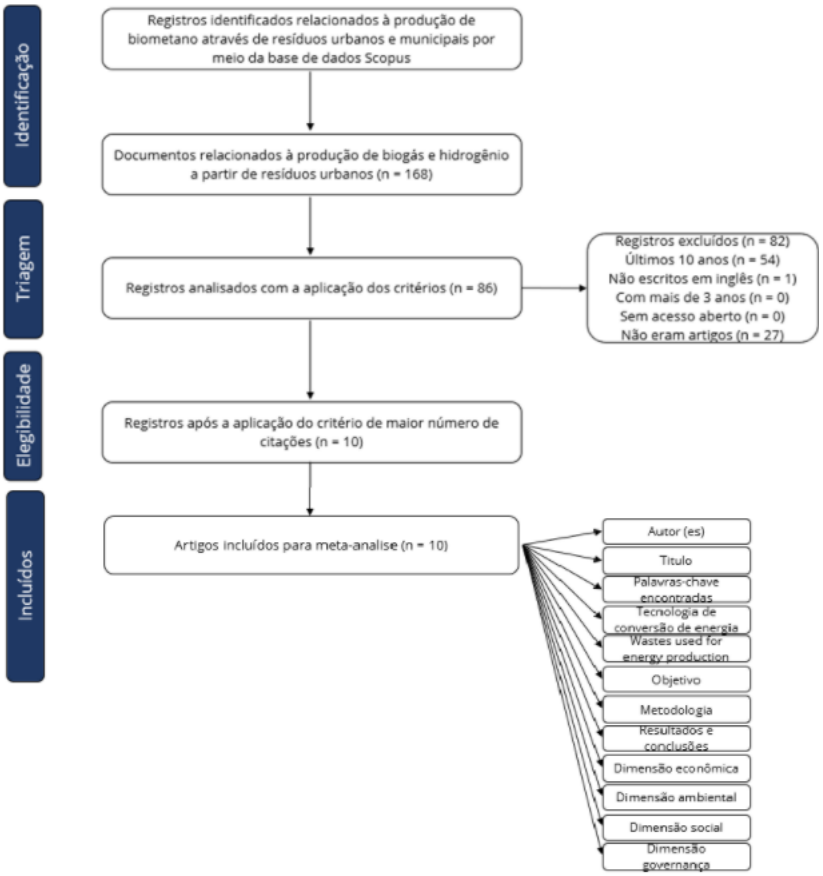



Figura 2 - Fluxograma PRISMA dos artigos selecionados

Fonte: Elaborado pelo autor

Para organizar as informações dos dez artigos analisados nesta revisão, foram preparadas a Tabela 1 e a Tabela 2. Essas tabelas estão segmentadas em oito categorias: autores, título, palavras-chave, tecnologias de conversão de energia, resíduos utilizados para conversão de energia, objetivo, metodologia, resultados e conclusão, dimensão econômica, dimensão ambiental, dimensão social e dimensão de governança, permitindo uma análise qualitativa simplificada.

De acordo com a categorização dos artigos selecionados para esta análise, indicada no PRISMA (Tabela 1 e Tabela 2), o uso de resíduos de lodo ativado e águas residuais para a produção de biometano prevaleceu na maioria dos artigos, exceto em quatro, que utilizam resíduos de alimentos, esterco e resíduos sólidos urbanos.

Em relação às tecnologias de conversão utilizadas, oito artigos consideraram a digestão anaeróbica, prevalecendo como a tecnologia mais utilizada. Em seguida, a eletrólise foi citada em dois documentos, seguida pela fermentação escura e Células a Combustível Microbiana (*Microbial Fuel Cells*), cada uma com um artigo.

Uma das razões pelas quais a digestão anaeróbica é amplamente adotada como tecnologia de conversão de energia é a sua eficiência em converter resíduos orgânicos em biogás, além da significativa redução das emissões de gases de efeito estufa e da produção de subprodutos valiosos, como o digestato, que pode ser utilizado na agricultura (Kong, 2021; Elsamadony, 2015; Ennouri, 2016).

A digestão anaeróbica é altamente eficiente na conversão de resíduos orgânicos em biogás, permitindo a recuperação de energia a partir de resíduos que, de outra forma, seriam descartados em aterros sanitários (Kong, 2021).

O digestato, que também é um subproduto da digestão anaeróbica, pode ser usado como fertilizante orgânico, enriquecendo o solo e promovendo a agricultura sustentável (Ennouri, 2016). A diversidade de materiais que podem ser processados por meio da digestão anaeróbica, incluindo resíduos alimentares, lodo de esgoto, resíduos agrícolas e resíduos sólidos urbanos, torna a tecnologia aplicável em diversos contextos e escalas, contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental e a economia circular (Elsamadony, 2015; Kong, 2021).

Os benefícios econômicos gerados pela produção de biogás e pela venda da energia gerada podem fornecer uma fonte adicional de receita, tornando a digestão anaeróbica economicamente atraente. Além disso, a redução dos custos de gestão de resíduos e a venda de subprodutos como o digestato aumentam ainda mais a viabilidade econômica (Li, 2019).

Processos como a fermentação escura e as MFCs ainda estão em fases emergentes de desenvolvimento. Embora prometam benefícios notáveis, como a produção de biohidrogênio e eletricidade a partir de resíduos, essas tecnologias não são tão amplamente aplicadas ou estudadas quanto a digestão anaeróbica, o que explica sua menor presença no PRISMA.

A eletrólise da água, usada para produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis, também foi menos abordada devido à sua eficiência relativamente baixa e altos custos energéticos, especialmente quando comparada à digestão anaeróbica. No contexto de conversão de resíduos em energia, tecnologias mais estabelecidas como a digestão anaeróbica tendem a ser preferidas por seu custo-benefício e maior disponibilidade de dados de pesquisa. Na análise tecnoeconômica realizada por Ralf *et al* (2019) em plantas comerciais, o metano sintético, produzido via eletrólise, tem um custo que pode variar entre €3,51 e €3,88 por kg, dependendo da fonte de hidrogênio e dióxido de carbono utilizados. Esse custo é, atualmente, mais elevado do que o do gás natural fóssil, o que representa um desafio econômico para a adoção em larga escala. No entanto, à medida que os custos da eletrólise diminuem e o preço do carbono aumenta devido a políticas ambientais, essa tecnologia se torna uma solução mais viável, especialmente em contextos em que é necessário reduzir as emissões de gases de efeito estufa para atender às metas climáticas de longo prazo.

Por meio das Tabelas 1 e 2, é possível verificar que, entre os vários tipos de resíduos que podem ser utilizados na digestão anaeróbica para a produção de biometano, os resíduos sólidos urbanos foram destacados na maioria, atendendo aos critérios de busca de acordo com as palavras-chave utilizadas. Resíduos sólidos orgânicos municipais, incluindo restos de alimentos e resíduos de jardins, são comumente usados na digestão anaeróbica devido à sua alta biodegradabilidade e potencial de produção de biogás (Peters R. B., 2019).

O lodo de esgoto também foi identificado como um insumo para a produção de biometano, conforme demonstrado na Tabela 1. Este resíduo é rico em matéria orgânica e, após o pré-tratamento térmico, a solubilização dos sólidos aumenta, melhorando a eficiência da digestão anaeróbica e a produção de biogás (Feki, 2015). A codigestão deste resíduo com resíduos sólidos urbanos é uma prática frequente que aumenta a produção de biogás devido à sinergia entre diferentes tipos de matéria orgânica (Kong, 2021).

O PRISMA também proporcionou uma compreensão detalhada utilizando a estrutura de clusters das quatro dimensões EESG (Ambiental, Econômica, Social e

Governança) na produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais.

Ao avaliar a dimensão ambiental, é possível observar que os clusters relacionados à Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa, Gestão de Resíduos e Reciclagem, e Riscos de Poluição e Segurança foram citados na maioria dos artigos, enquanto o cluster sobre Água, Terra e Biodiversidade não foi mencionado. A justificativa para os clusters citados pode ser considerada, pois a maioria dos artigos aborda o processo de digestão anaeróbica como uma forma de conversão, conforme já observado na análise das tecnologias, que é responsável por reduzir significativamente as emissões de metano dos aterros ao capturar esse gás e utilizá-lo como biogás, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. O uso de resíduos orgânicos, como restos de alimentos e lodo de esgoto, não só reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros, mas também promove a reciclagem de nutrientes por meio da produção de digestato, que pode ser utilizado como fertilizante orgânico (Ennouri, 2016; Elsamadony, 2015). A produção e o uso de biogás estão sujeitos a normas de segurança rigorosas e a avaliações de impacto ambiental para minimizar os riscos de poluição e garantir a segurança durante o armazenamento e transporte do biogás (Ennouri, 2016) A ausência de uma discussão aprofundada sobre os impactos na água, terra e biodiversidade reflete o foco dos estudos na eficiência do processo e nos benefícios diretos da redução de emissões e da gestão de resíduos, sem priorizar os impactos indiretos sobre ecossistemas específicos nos estudos avaliados.

A análise da dimensão social identifica a abordagem dos clusters de acesso à energia e recursos, empregos e habilidades, e saúde e segurança, sendo o primeiro predominantemente identificado, principalmente porque a produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos sólidos urbanos melhora o acesso à energia renovável, especialmente em áreas rurais e periféricas, aumentando a segurança energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Ennouri, 2016). A instalação e operação de plantas de biogás geram empregos diretos e indiretos, contribuindo para o desenvolvimento econômico local e oferecendo oportunidades de treinamento e desenvolvimento de habilidades (Peters R. B., 2019; Ennouri, 2016). Campanhas de conscientização e educação que informam a comunidade sobre os benefícios ambientais e econômicos do biogás possibilitam a aceitação social das tecnologias de biogás (Peters R. B., 2019). A ausência de abordagens relacionadas ao cluster de direitos humanos e padrões laborais pode ser atribuída ao fato de os estudos focarem principalmente nos

aspectos técnicos e econômicos da produção de biogás, sem abordar diretamente as condições de trabalho e os direitos dos trabalhadores envolvidos no processo.

As relações dos estudos associados à dimensão econômica mostraram que os clusters de valor agregado e crescimento desacoplado e de mix e transformação energética ocorreram na maioria dos artigos listados no PRISMA, em 9 e 7 artigos, respectivamente. Isso ocorre porque a conversão de resíduos em energia, foco da maioria dos estudos, reduz os custos associados ao tratamento de resíduos e à compra de energia, proporcionando economias substanciais para municípios e empresas. Além disso, a venda de biogás e biometano, bem como do digestato como fertilizante, gera receita adicional, tornando os projetos economicamente viáveis e atraentes para investimento (Li, 2019; Elsamadony, 2015). Apenas 2 documentos abordaram os clusters de comércio e transferência de tecnologia e investimento e finanças públicas. A baixa frequência desses clusters se deve ao fato de que a maioria dos artigos foca na implementação local e nos benefícios econômicos diretos da produção de biometano e hidrogênio, sem explorar a dimensão global ou regional do comércio de tecnologia e devido à priorização dos aspectos técnicos e operacionais sobre os financeiros. Esse baixo quantitativo também é refletido nos resultados da análise de patentes, que mostra uma concentração maior de inovações voltadas para a geração de biogás e biometano, enquanto tecnologias associadas à transferência de energia e ao comércio internacional de tecnologias energéticas ainda são menos exploradas.

Isso sugere que, embora a produção de biometano esteja avançando significativamente, o desenvolvimento de inovações que facilitem a integração e a comercialização dessas tecnologias em nível global ainda é limitado. A análise de patentes corrobora essa tendência, destacando que o foco tem sido em otimizar processos locais de produção e uso de biogás, deixando uma lacuna em tecnologias voltadas para a transferência e comercialização de energia em mercados internacionais. Como resultado, o potencial de expansão dessas tecnologias para além dos contextos locais ainda está subexplorado, e esse é um ponto que precisa de mais atenção em estudos futuros e em novas inovações tecnológicas.

Considerando os clusters da dimensão de governança, eles foram identificados em apenas 3 dos 10 artigos analisados, com o cluster de compromisso político e coerência tendo 2 ocorrências, normas e certificação e estabilidade e estado de direito tendo 1 ocorrência cada. O primeiro cluster ocorre principalmente porque o apoio político e políticas coerentes são essenciais para a viabilidade e expansão das tecnologias de biometano e hidrogênio. Esse compromisso dos governos em promover a energia

renovável e a sustentabilidade ambiental surge por meio da implementação de políticas de incentivo, subsídios e incentivos fiscais. Essas ações reduzem o custo de implementação das tecnologias de biometano e hidrogênio, tornando-as mais atraentes para investidores e operadores, e promovem a confiança dos investidores, facilitando o financiamento de novos projetos. No Brasil, uma das principais iniciativas é o RenovaBio, que faz parte da Política Nacional de Biocombustíveis. O programa busca expandir a produção de biocombustíveis, incluindo o biometano, por meio de metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Outra política relevante é a Lei 14.059/2020, que incentiva a produção de biogás e biometano a partir de resíduos, oferecendo isenção de impostos como o PIS/Cofins sobre a venda desses biocombustíveis. Na Europa, a Diretiva de Energias Renováveis (RED II) estabelece metas ambiciosas para o uso de fontes renováveis na matriz energética dos países membros. A diretiva exige que pelo menos 32% da energia consumida na União Europeia venha de fontes renováveis até 2030. Especificamente para o biometano, muitos países oferecem subsídios e tarifas de alimentação (*feed-in tariffs*) para a injeção de biometano nas redes de gás natural, como na Alemanha e na França, que também possuem políticas de incentivos fiscais para plantas de biogás.

Ao avaliar a limitada citação dos clusters de normas e certificação e estabilidade e Estado de Direito no PRISMA, é possível relacionar isso ao foco técnico e operacional predominante dos estudos, que priorizaram melhorias tecnológicas e operacionais voltadas para a eficiência do processo de digestão anaeróbica, otimização da produção de biogás e análise econômica dos projetos. A complexidade e variabilidade das normas entre diferentes regiões também contribuem para essa limitação de citação, assim como o estágio de desenvolvimento dos projetos, onde a maioria está nas fases iniciais de desenvolvimento, com o foco principal na comprovação da viabilidade técnica e econômica, representando uma etapa anterior ao exame aprofundado de questões envolvendo normas e certificações.

Vale ressaltar também as prioridades de pesquisa dos autores desses estudos, cujas abordagens sobre inovações tecnológicas e avanços em processos específicos resultam na omissão de discussões detalhadas sobre regulamentações e certificações, deixando esses tópicos para um estágio posterior. A ausência ou baixa ocorrência dos clusters de transparência e participação e de estabilidade e Estado de Direito está principalmente relacionada ao foco dos artigos em aspectos tecnológicos e econômicos. Essas abordagens são importantes porque a transparência nas decisões políticas e econômicas relacionadas aos projetos de biometano e hidrogênio de baixo carbono

promovem a confiança pública, aumentando a aceitação social e prevenindo a corrupção e a má gestão dos recursos. Além disso, a participação pública permite que as preocupações da comunidade sejam abordadas e incorporadas nas decisões dos projetos. A falta de estabilidade política aumenta os riscos associados aos projetos, dificultando a atração de investimentos. Ademais, a aplicação adequada do Estado de Direito proporciona segurança jurídica, essencial para proteger os investimentos e a operação contínua dos projetos.

Tabela 1 - Principais características e resultados dos dez artigos selecionados (parte 1)

| Autor (es) | Título | Palavras-chave encontradas | Tecnologias de conversão de energia | Resíduos utilizados na produção de energia | Objetivo | Metodologia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ennouri H.; Miladi B.; Diaz S.Z.; Güelfo L.A.F.; Solera R.; Hamdi M.; Bouallagui H. | Efeito do pré-tratamento térmico na produção de biogás e no equilíbrio das comunidades microbianas durante a digestão anaeróbica de lodo ativado de resíduos urbanos e industriais. | Digestão anaeróbica; Hibridização fluorescente in situ; Lodo industrial; Equilíbrio microbiano; Pré-tratamento térmico; Lodo urbano. | Digestão anaeróbica. | Lodo ativado de resíduos urbanos e industriais e águas residuais. | Analisar o efeito do pré-tratamento térmico na melhoria da bioconversão anaeróbica de lodo ativo urbano e industrial em biogás, utilizando reatores anaeróbicos sequenciais em batelada (ASBR). | Pré-tratamento térmico de lodo ativado em diferentes temperaturas, posteriormente submetido à digestão anaeróbica para avaliar a produção de biogás. Técnicas de sequenciamento de DNA também foram usadas para identificar e quantificar populações microbianas antes e depois do pré-tratamento e da digestão anaeróbica. |
| Li Y.; Alaimo C.P.; Kim M.; Kado N.Y.; Peppers J.; Xue J.; Wan C.; Green P.G.; Zhang R.; Jenkins B.M.; Vogel C.F.A.; Wuertz S.; Young T.M.; Kleeman M.J. | Composição e Toxicidade do Biogás Produzido a partir de Diferentes Materiais de Alimentação na Califórnia | Matéria-prima; Metas de redução de gases de efeito estufa; Sistemas de produção de biogás; Toxicidade; Fluxos de biogás na Califórnia; Esterco de laticínios; Biogás de resíduos alimentares; Exaustão da combustão de biogás. | Digestão anaeróbica. | Esterco de plantas de produção de laticínios, resíduos alimentares e resíduos sólidos urbanos. | Investigar a composição química e a toxicidade do biogás produzido a partir de diferentes substratos, incluindo esterco de vaca, resíduos alimentares e resíduos sólidos urbanos. | Digestão anaeróbica de substratos selecionados, incluindo esterco de vaca, resíduos alimentares e resíduos sólidos urbanos para produção de biogás, com uma análise comparativa da composição química gerada para cada substrato, bem como o grau de toxicidade, através da simulação de envelhecimento atmosférico usando uma câmara de smog fotoquímico. |
| Kuo J.; Dow J. | Produção de Biogás a partir da Digestão Anaeróbica de Resíduos Alimentares e Implicações Relevantes para a Qualidade do Ar. | Biogás; digestão anaeróbica; resíduos alimentares; qualidade do ar; gases de efeito estufa; energia renovável. | Eletrólise da água usando energia eólica para produzir hidrogênio e captura e utilização de carbono. | Resíduos alimentares. | Investigar a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de resíduos alimentares e avaliar as implicações para a qualidade do ar. | Diferentes tipos de resíduos alimentares foram submetidos à digestão anaeróbica, com monitoramento da eficiência de conversão e medição das emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes durante a combustão do biogás. Também foram realizadas análises da qualidade do ar, com comparação dos resultados das emissões com os padrões ambientais atuais. |
| Hoppe W.; Thonemann N.; Bringezu S. | Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de Metano e Metanol Baseada em Dióxido de Carbono e Polímeros Derivados. | Captura e utilização de carbono (CCU); captura e uso de $CO_2$; potencial de aquecimento global; avaliação do ciclo de vida (ACV); *power-to-X*; eficiência de recursos. | | Fontes industriais e ambientais (Resíduos de biomassa, dióxido de carbono da produção de biogás, usinas de energia a carvão lignito e plantas de incineração de resíduos). | Realizar uma avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de metano, metanol e polímeros derivados utilizando $CO_2$ como matéria-prima. | Reações químicas catalíticas foram usadas para converter $CO_2$ e hidrogênio em metano e metanol. Produtos intermediários, como gás de síntese, foram convertidos em polímeros como polióximetileno, polietileno e polipropileno. Foram realizadas medições das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida, juntamente com uma avaliação da quantidade de recursos necessários no processo. Também foi realizada uma análise de trade-off entre a redução das emissões de GEE e o aumento do uso de recursos abióticos. |
| Peters R.; Baltruweit M.; Grube T.; Samsun R.C.; Stolten D. | Uma análise técnico-econômica da rota Power-to-Gas. | Metanação; *Power to gas*; Acoplamento de setores; Análise técnico-econômica. | Eletrólise da água usando energia eólica para produzir hidrogênio e captura de dióxido de carbono ($CO_2$) de várias fontes para produzir metano sintético ($CH_4$). | Esterco líquido, resíduos municipais, biomassa e esterco seco. | Realizar uma análise técnico-econômica do processo *Power-to-Gas*, avaliando a viabilidade econômica e os benefícios ambientais da produção de metano sintético a partir de hidrogênio renovável e $CO_2$ capturado. | A avaliação da viabilidade econômica foi realizada comparando os custos do metano sintético com o metano de fontes convencionais, considerando oito cenários: quatro usando hidrogênio renovável produzido via eletrólise alimentada por energia eólica, combinado com $CO_2$ de diferentes fontes (biogás, gases residuais de usinas, $CO_2$ fornecido por fornecedores e captura direta do ar), e quatro cenários adicionais usando hidrogênio e $CO_2$ de fontes convencionais para fornecer uma comparação abrangente. Os impactos ambientais do processo *Power-to-Gas* foram baseados na produção de metano sintético. A análise técnica considerou a eficiência do processo, os custos de produção e as implicações ambientais. |

| Autor (es) | Título | Palavras-chave encontradas | Tecnologias de conversão de energia | Resíduos utilizados na produção de energia | Objetivo | Metodologia |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Feki E.; Khoufi S.; Loukil S.; Sayadi S. | Melhoria da digestão anaeróbica de lodo ativado de resíduos usando oxidação com $H_2O_2$, eletrólise, eletro-oxidação e pré-tratamentos termo-alcalinos. | Digestão anaeróbia; Solubilização de DQO (Demanda Química de Oxigênio); Eletro-oxidação; Termo-alcalino; Lodo ativado de resíduos. | Digestão anaeróbica. | Lodo ativado de resíduos. | Investigar a solubilização da DQO (Demanda Química de Oxigênio) e o aumento na produção de biogás e comparar os métodos de pré-tratamento do lodo ativado de resíduos (WAS) em relação aos processos de oxidação com $H_2O_2$, eletrólise, eletro-oxidação e pré-tratamento termo-alcalino, focando na melhoria da digestão anaeróbica, para identificar o método mais eficaz. | Os parâmetros de solubilização da DQO (Demanda Química de Oxigênio) e a quantidade de biogás produzida após o pré-tratamento e a digestão anaeróbica foram avaliados sob várias condições operacionais, considerando os processos de oxidação com $H_2O_2$, eletrólise, eletro-oxidação (EO) e pré-tratamento termo-alcalino (TA). |
| Elsamadony M.; Tawfik A. | Co-digestão anaeróbica seca da fração orgânica de resíduos municipais com lodo de fábrica de papelão e resíduos sólidos de gelatina para aumento da produção de hidrogênio. | Bio-hidrogênio; Cofermentação anaeróbia seca; Resíduo sólido de gelatina; Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos; Lodo de fábrica de papelão. | Digestão anaeróbica seca. | Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos de gelatina e lodo de fábrica de papelão. | Identificação das condições ótimas para maximizar a geração de hidrogênio. | Reatores anaeróbicos secos foram configurados para realizar a co-digestão de diferentes misturas de resíduos, devidamente preparadas em proporções específicas para este tipo de tratamento. Essas diferentes misturas foram submetidas a várias condições operacionais, e uma comparação foi feita entre elas para identificar a melhor eficiência de co-digestão e rendimento de hidrogênio. |
| Rebosura M., Jr.; Salehin S.; Pikaar I.; Sun X.; Keller J.; Sharma K.; Yuan Z. | Avaliação laboratorial abrangente dos efeitos de sais de ferro dosados em esgotos nos processos de tratamento de águas residuais. | Digestão anaeróbia; Desaguamento; Sistema integrado de água urbana; Dosagem de sal de ferro; Reator em batelada sequencial; Sistema de esgoto. | Digestão anaeróbica | Lodo de digestato. | Investigar os efeitos da dosagem de sais de ferro em águas residuais nos processos de tratamento de esgoto. | Sais de ferro foram aplicados a amostras de águas residuais e lodo de esgoto antes da digestão anaeróbica, e os resultados obtidos com e sem a dosagem de sais de ferro foram comparados para avaliar os impactos nos processos de tratamento. |
| Rózsenberszki T.; Koók L.; Bakonyi P.; Nemestóthy N.; Logroño W.; Pérez M.; Urquizo G.; Recalde C.; Kurdi R.; Sarkady A. | Tratamento de líquidos de resíduos municipais por meio de processos bioeletroquímicos e de fermentação ($H_2$ + $CH_4$): Avaliação de várias sequências tecnológicas. | Biogás; Biohidrogênio; Célula de combustível microbiana; Processo em múltiplas etapas; OFMSW (Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Municipais); Efluente. | Digestão anaeróbica, fermentação escura e Células a Combustível Microbianas (CCMs). | Fração líquida de resíduos sólidos urbanos. | Maximização da remoção de matéria orgânica e recuperação de energia. | Os processos de fermentação, digestão anaeróbica e células a combustível microbianas foram realizados utilizando a fração líquida de resíduos sólidos urbanos para produzir biohidrogênio, biogás e eletricidade. Foram realizados testes com várias combinações de processos para determinar a sequência mais eficiente para a remoção de matéria orgânica e recuperação de energia. |
| Kong Z.; Li L.; Wu J.; Wang T.; Rong C.; Luo Z.; Pan Y.; Li D.; Li Y.; Huang Y.; Li Y.-Y. | Avaliação da recuperação de bioenergia a partir do tratamento anaeróbico de águas residuais municipais por um biorreator anaeróbico submerso em escala piloto (AnMBR) em temperatura ambiente. | Digestão anaeróbia; AnMBR (Reator de Membrana Anaeróbia); Neutralidade de carbono; Recuperação de energia; Efluente urbano; Escala piloto. | Digestão anaeróbica | Águas residuais municipais. | Avaliar a recuperação de bioenergia do tratamento anaeróbico de águas residuais municipais usando um biorreator anaeróbico submerso em escala piloto (AnMBR). | Produção de biogás através do tratamento de águas residuais municipais usando um biorreator anaeróbico submerso em escala piloto (AnMBR), avaliando o desempenho do biorreator por meio da eficiência de remoção de DQO e da quantidade de biogás produzido. |

Fonte: Scopus

Tabela 2 - Principais características e resultados dos dez artigos selecionados (parte 2)

| Resultados e Conclusão | Dimensão econômica | Dimensão Environmental | Dimensão Social | Dimensão Governança |
|---|---|---|---|---|
| O estudo mostrou que, com o processo de pré-tratamento térmico, houve um aumento na produção de biogás e na proporção de metano durante a digestão anaeróbica do lodo ativado, levando a um aumento de bactérias metanogênicas e hidrolíticas. Concluiu-se que a temperatura de pré-tratamento é um parâmetro crítico e deve ser otimizada para maximizar os benefícios na produção de biogás. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** Benefícios econômicos gerados pelo aumento da eficiência e produtividade da produção de biogás, alcançados por meio da otimização da temperatura de pré-tratamento, implicando em uma análise de custo-benefício que considera os custos do pré-tratamento em relação aos ganhos na produção de energia. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Redução de gases de efeito estufa e substituição de combustíveis fósseis por meio do aumento da produção de biogás e da proporção de metano.<br>**Recursos e Reciclagem:** A digestão anaeróbica de resíduos urbanos e industriais mencionada no artigo promove a reciclagem de resíduos orgânicos, convertendo-os em biogás e digestato, que podem ser usados como fertilizante.<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** Redução da poluição ambiental através da digestão anaeróbica. | **Acesso à Energia e Recursos:** A produção de biogás fornece uma fonte alternativa de energia, melhorando o acesso à energia em áreas que utilizam resíduos urbanos e industriais para a produção de biogás. | **Compromisso e Coerência das Políticas:** O artigo apresentou a abordagem de que políticas de incentivo, como subsídios e incentivos fiscais, são fundamentais para atrair investimentos e apoiar o desenvolvimento de infraestruturas de biogás.<br>**Normas e Certificação:** O estudo mostrou que marcos regulatórios bem definidos são necessários para garantir a qualidade e a segurança do biogás e do biometano. Isso inclui regulamentações para a injeção de biometano em redes de gás natural e o uso de digestato como fertilizante. |
| O estudo mostrou que o biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos e resíduos alimentares continha os níveis mais altos de compostos tóxicos em comparação com o biogás gerado a partir de esterco de vaca. Concluiu-se que o tipo de substrato tem um impacto significativo na composição química e na toxicidade do biogás produzido, sugerindo a necessidade de controle adequado e tratamento dos produtos da combustão, mesmo ao lidar com resíduos contendo menores concentrações de compostos químicos, como observado no biogás gerado a partir de esterco de vaca, para minimizar os impactos negativos na saúde pública e no meio ambiente. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** Possibilidades de implicações financeiras associadas à viabilidade econômica e aos custos operacionais das plantas de biogás, resultantes da otimização da produção de biogás a partir de diferentes substratos. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Redução das emissões de gases de efeito estufa através da produção de biogás.<br>**Recursos e Reciclagem:** A produção de biogás envolve o uso de resíduos como matéria-prima, promovendo a reciclagem de resíduos orgânicos**.**<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** A análise da toxicidade dos produtos de combustão gerados ajuda a identificar os riscos de poluição associados, contribuindo para os esforços de melhorar a qualidade do ar e a saúde ambiental. | **Acesso à Energia e Recursos:** A produção de biogás pode melhorar o acesso a fontes de energia renovável, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável.<br>**Saúde e Segurança:** Melhoria indireta da saúde pública por meio da análise da composição química e toxicidade dos tipos de biogás gerados, visando garantir a segurança para a saúde humana, beneficiando as comunidades próximas às plantas de produção de biogás.<br>. | **Compromisso e Coerência das Políticas:** O artigo apresentou a abordagem de que políticas de incentivo, como subsídios e incentivos fiscais, são fundamentais para atrair investimentos e apoiar o desenvolvimento de infraestruturas de biogás. |
| Os resultados mostraram um alto rendimento de metano no biogás produzido a partir da digestão anaeróbica de resíduos alimentares, e o processo de combustão resultou em emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e particulados. A análise das emissões demonstrou uma redução dos gases de efeito estufa em comparação com os combustíveis fósseis usuais, concluindo que a digestão anaeróbica de resíduos alimentares é uma tecnologia viável para a produção de energia renovável. No entanto, as emissões de poluentes durante a combustão ainda precisam ser abordadas para minimizar os impactos na qualidade do ar. São sugeridas tecnologias de controle de emissões para mitigar os impactos ambientais da combustão do biogás. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** A produção de biogás a partir de resíduos alimentares pode gerar valor econômico ao transformar resíduos em uma fonte de energia renovável, contribuindo para um crescimento econômico mais sustentável. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Redução de gases de efeito estufa através do uso de energia renovável e da gestão de resíduos alimentares.<br>**Recursos e Reciclagem:** O uso de resíduos alimentares para a produção de biogás promove a reciclagem de resíduos orgânicos, convertendo-os em energia e fertilizantes.<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** Implicações para a qualidade do ar relacionadas à produção de biogás, incluindo a avaliação de potenciais poluentes emitidos durante o processo de digestão anaeróbica. | **Acesso à Energia e Recursos:** A produção de biogás pode melhorar o acesso a fontes de energia renovável, proporcionando uma alternativa sustentável para as comunidades. | **Estabilidade e Estado de Direito:** O estudo sugere a necessidade de políticas e regulamentos para controlar as emissões de poluentes da combustão do biogás, orientando a governança na implementação de tecnologias de biogás**.** |
| Os resultados dos processos baseados em $CO_2$ foram comparados com as rotas de produção convencionais para avaliar os benefícios e desvantagens ambientais, concluindo que há potencial para reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa em comparação com alternativas convencionais, desde que haja um aumento no uso de recursos abióticos. Além disso, o uso de energia eólica contribui para alcançar bons resultados ambientais para o processo. | **Comércio e Transferência de Tecnologia:** Avaliação de trade-offs entre a redução de emissões de GEE e o aumento no uso de recursos abióticos**.**<br>**Mix Energético e Transformação**: A produção de combustíveis e produtos químicos a partir de $CO_2$ pode ser integrada ao mix energético existente, contribuindo para a transição energética em direção a fontes mais sustentáveis. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) através do uso de $CO_2$ como matéria-prima.<br>**Recursos e Reciclagem:** A análise do ciclo de vida inclui a avaliação da utilização de recursos na produção de metano, metanol e polímeros derivados, bem como as opções de reciclagem para os produtos finais.<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** O estudo aborda os impactos ambientais relacionados à produção e uso de metano, metanol e derivados de polímeros, incluindo potenciais emissões e poluentes. | **Acesso à Energia e Recursos:** A produção de metano e metanol a partir de $CO_2$ pode fornecer acesso a novos recursos energéticos sustentáveis, beneficiando comunidades e indústrias | Nenhum cluster foi abordado. |

| Resultados e Conclusão | Dimensão econômica | Dimensão Environmental | Dimensão Social | Dimensão Governança |
|---|---|---|---|---|
| Os custos de produção de metano sintético foram calculados, considerando diferentes fontes de $CO_2$ e hidrogênio. Os resultados da análise ambiental mostraram que os processos baseados em $CO_2$ podem reduzir significativamente as emissões de GEE em comparação com os métodos convencionais. Observou-se que é necessário avaliar a sustentabilidade geral do processo devido ao maior uso em escala de recursos abióticos nos processos baseados em $CO_2$ em comparação com os métodos convencionais. Cada cenário de uma das fontes de $CO_2$ usadas no estudo forneceu uma perspectiva diferente sobre os trade-offs entre a eficiência econômica e o impacto ambiental. Embora o estudo tenha mostrado que o custo da rota Power-to-Gas para a produção de metano é mais alto em comparação com o metano de fontes convencionais, viu-se que o foco na sustentabilidade e na redução das emissões de GEE justificaria o uso dessas tecnologias no futuro. As políticas públicas devem considerar esses benefícios ambientais para apoiar a implementação dessas tecnologias por meio de incentivos e regulamentos favoráveis, mesmo quando os benefícios econômicos diretos não são imediatamente aparentes. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado**: A análise econômica considera o potencial de gerar valor econômico por meio da produção de gás a partir da eletricidade, promovendo um crescimento econômico sustentável.<br>**Comércio e Transferência de Tecnologia:** Análise dos custos de produção de metano sintético em diferentes cenários, detalhando os custos de produção e comparando-os com o metano convencional, além de informar os trade-offs econômicos relacionados.<br>**Mix Energético e Transformação:** A produção de hidrogênio e metano a partir da eletricidade pode ser integrada ao mix energético existente, contribuindo para a diversificação e transformação da matriz energética.<br>**Investimento e Finanças Públicas:** O artigo aborda a viabilidade econômica e os investimentos necessários para a implementação de projetos *power-to-gas*, incluindo custos, retornos e apoio financeiro. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Mitigação das emissões de GEE, redução de impactos ecológicos como acidificação e eutrofização, e redução da pegada de carbono do processo.<br>**Recursos e Reciclagem:** A análise considera a eficiência do uso de recursos no processo *Power-to-Gas*, incluindo a utilização do excesso de eletricidade e a integração com outros sistemas energéticos.<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** O artigo avalia os impactos ambientais da produção de gás a partir da eletricidade, incluindo emissões potenciais e poluentes durante a produção, armazenamento e transporte**.** | **Acesso à Energia e Recursos:** A produção de gás a partir da eletricidade pode melhorar o acesso a fontes de energia sustentável, beneficiando comunidades e indústrias.<br>**Empregos e Habilidades:** A implementação de tecnologias de *power-to-gas* pode criar empregos e exigir novas habilidades, contribuindo para o desenvolvimento econômico local. | Nenhum cluster foi abordado. |
| A eletro-oxidação (EO) apresentou a maior eficiência, com 28% de solubilização de DQO nas condições ideais e até 78% de aumento na produção de biogás em comparação com o lodo não tratado. O método de pré-tratamento termo-alcalino (TA) veio em seguida, com até 40% de aumento na produção de biogás, concluindo que o TA também se mostrou eficaz, embora com um aumento menor na produção de biogás em comparação com a EO. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** Redução potencial dos custos operacionais e aumento da viabilidade econômica de plantas de tratamento de resíduos através do aumento da eficiência na produção de biogás.<br>**Mix Energético e Transformação:** A produção de biogás a partir de lodo ativado pode ser integrada ao mix energético existente, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a transição para fontes de energia mais limpas.<br>. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Redução dos impactos ambientais por meio da melhoria da eficiência da digestão anaeróbica, resultando em maior produção de biogás e melhor gestão de resíduos<br>**Recursos e Reciclagem:** O uso de lodo ativado como matéria-prima para a produção de biogás promove a reciclagem de resíduos orgânicos, transformando-os em energia e produtos úteis, como o digestato. | **Acesso à Energia e Recursos**: A produção de biogás a partir de resíduos pode melhorar o acesso a fontes de energia renovável, beneficiando comunidades locais e indústrias.<br>**Empregos e Habilidades:** A implementação de tecnologias de pré-tratamento e digestão anaeróbica pode criar empregos e exigir novas habilidades, contribuindo para o desenvolvimento econômico local. | Nenhum cluster foi abordado. |
| As misturas alcançaram altos níveis de produção de hidrogênio, concluindo que a otimização das condições operacionais da co-digestão anaeróbica seca da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos com lodo de fábrica de papel e resíduos de gelatina pode levar a um aumento significativo na produção de hidrogênio, contribuindo para uma gestão mais eficiente de resíduos orgânicos e produção de energia renovável. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** Melhoria da viabilidade econômica dos processos de gestão de resíduos e produção de energia renovável através do aumento da produção de hidrogênio por co-digestão**.**<br>**Mix Energético e Transformação:** A produção de hidrogênio a partir de resíduos pode ser integrada ao mix energético existente, contribuindo para a diversificação e transformação da matriz energética em direção a fontes mais limpas. | **Ciclo de Energia e Carbono**: A produção de hidrogênio através da digestão anaeróbica, conforme discutido no estudo, é uma forma de energia renovável que pode substituir os combustíveis fósseis e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.<br>**Recursos e Reciclagem**: A co-digestão de resíduos sólidos urbanos, lodo de papel e resíduos sólidos de gelatina promove a reciclagem de materiais orgânicos, convertendo-os em bioenergia e subprodutos úteis, como o digestato.<br>**Riscos de Poluição e Segurança**: A co-digestão melhora a eficiência da biodegradação de carboidratos, proteínas e lipídios, resultando em uma redução significativa de poluentes nos resíduos tratados. | **Acesso à Energia e Recursos:** Melhorias na gestão de resíduos e na produção de hidrogênio como fonte de energia renovável contribuem positivamente para a saúde pública e o bem-estar da comunidade.<br>**Saúde e Segurança:** A digestão anaeróbica, especialmente em condições termofílicas, é destacada por sua capacidade de desinfecção de patógenos, contribuindo para a saúde pública. | Nenhum cluster foi abordado. |
| Os resultados mostraram que após a adição de sais de ferro às amostras de águas residuais e lodo de esgoto antes da digestão anaeróbica, houve um aumento na produção de biogás durante a digestão anaeróbica do lodo, além de uma melhor remoção de sulfetos e problemas de eutrofização em corpos d'água receptores devido ao controle do fósforo. Concluiu-se que houve maior produção de biogás e melhor remoção de contaminantes devido à maior eficiência dos processos de tratamento de águas residuais por conta da dosagem de sais de ferro nas amostras, provando ser uma estratégia eficaz para otimizar a digestão anaeróbica. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** Eficiência econômica nas instalações de tratamento de águas residuais com custos reduzidos de disposição e manuseio de lodo, alcançada pela melhoria da desaguabilidade do lodo digerido anaerobicamente.<br>**Mix Energético e Transformação:** Aumento da eficiência na produção de biogás por meio da redução de $H_2S$ no biogás. | **Ciclo de Energia e Carbono:** Melhoria na qualidade do ar devido à redução das emissões de sulfeto de hidrogênio ($H_2S$) no biogás, resultante da dosagem de $FeCl_3$ no sistema de esgoto, que reduz a concentração de sulfeto dissolvido no esgoto e no lodo digerido anaerobicamente.<br>**Recursos e Reciclagem:** Reciclagem de nutrientes com a eliminação da eutrofização em corpos d'água através da remoção de fósforo durante o tratamento de águas residuais com a adição de sais de ferro**.**<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** Redução dos riscos ambientais associados à disposição de águas residuais através da melhoria da qualidade do efluente tratado, removendo | **Acesso à Energia e Recursos:** A melhoria na qualidade da água tratada por meio da remoção eficaz de fósforo e sulfetos beneficia as comunidades ao redor das estações de tratamento de águas residuais.<br>**Saúde e Segurança:** A redução de problemas de odor associados ao tratamento de águas residuais, resultante da diminuição de $H_2S$ no biogás, melhora as condições de trabalho e a aceitação pública das instalações de tratamento. | Nenhum cluster foi abordado. |

| Resultados e Conclusão | Dimensão econômica | Dimensão Environmental | Dimensão Social | Dimensão Governança |
|---|---|---|---|---|
| | | poluentes como sulfetos e fosfatos do esgoto utilizando $FeCl_3$. | | |
| Os resultados mostraram que o método de células a combustível microbianas (MFC) alcançou a maior eficiência de remoção de DQO, sendo o mais eficaz em termos de limpeza de águas residuais em comparação com os métodos de digestão e fermentação, sendo este último o menos eficiente em termos de tratamento da matéria orgânica. Em termos de ganho de energia, o processo de fermentação foi o mais eficiente. Concluiu-se que uma abordagem de três estágios (fermentação de hidrogênio, digestão anaeróbica e MCCs) é necessária para maximizar tanto a remoção de matéria orgânica quanto a recuperação de energia, recomendando a combinação de fermentação de hidrogênio seguida de biometanação e MCCs para maior eficácia. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** A produção de biogás e hidrogênio a partir de resíduos municipais pode agregar valor econômico ao transformar resíduos em recursos energéticos úteis, promovendo o crescimento econômico sustentável.<br>**Mix Energético e Transformação:** Diversificação e transformação da matriz energética em direção a fontes mais limpas por meio da produção de hidrogênio e metano a partir de resíduos.<br>**Investimento e Finanças Públicas:** O estudo avalia a viabilidade econômica das tecnologias de tratamento de resíduos e recuperação de energia por meio de dados específicos de ganho energético e da eficiência dos diferentes processos apresentados no estudo. | **Ciclo de Energia e Carbono:** O estudo aborda a produção de hidrogênio ($H_2$) e metano ($CH_4$) por meio de processos de fermentação e bioeletroquímicos, contribuindo para a redução do uso de combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa.<br>**Recursos e Reciclagem:** A reciclagem de resíduos e a recuperação de recursos energéticos por meio do uso de frações líquidas de resíduos sólidos urbanos para a produção de energia promovem uma economia circular e a gestão sustentável de recursos**.**<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** Redução da carga de poluentes em efluentes tratados por meio da melhoria da remoção de matéria orgânica com tratamentos anaeróbicos e bioeletroquímicos. | **Acesso à Energia e Recursos:** Melhorar o acesso a fontes de energia sustentável através da produção de hidrogênio e metano a partir de resíduos, beneficiando comunidades locais e indústrias.<br>**Saúde e Segurança:** A redução de problemas de odor associados ao tratamento de águas residuais, resultante da diminuição de $H_2S$ no biogás, melhora as condições de trabalho e a aceitação pública das instalações de tratamento. | Nenhum cluster foi abordado. |
| O biorreator demonstrou alta eficiência na remoção de DQO de águas residuais municipais e na recuperação de bioenergia por meio de uma produção significativa de biogás, concluindo que é uma solução eficaz para o tratamento de águas residuais municipais e recuperação de bioenergia. | **Valor Agregado e Crescimento Desvinculado:** Geração de energia renovável através da produção de biogás a partir de águas residuais, agregando valor econômico e promovendo o crescimento econômico sustentável.<br>Eficiência Econômica com o uso de AnMBR, que possui eficiência energética superior ao processo convencional de lodo ativado (CAS), resultando em economia de energia e redução de custos operacionais.<br>**Mix Energético e Transformação:** Diversificação da matriz energética e redução da dependência de combustíveis fósseis através da integração do biogás produzido pelo AnMBR ao mix energético existente. | **Ciclo de Energia e Carbono:** A substituição de combustíveis fósseis pelo biogás produzido no processo de recuperação de bioenergia do tratamento anaeróbico de águas residuais municipais contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. O uso de AnMBR é considerado uma tecnologia de carbono neutro devido à captura de carbono no biogás produzido, promovendo a sustentabilidade ambiental**.**<br>**Recursos e Reciclagem:** A digestão anaeróbica de águas residuais promove a reciclagem de resíduos orgânicos, convertendo-os em biogás e digestato, que pode ser utilizado como fertilizante.<br>**Riscos de Poluição e Segurança:** A redução da carga de poluentes em efluentes tratados devido à alta eficiência de remoção de DQO (demanda química de oxigênio) no AnMBR, contribuindo para a melhoria da qualidade da água. | **Acesso à Energia e Recursos:** A produção de biogás a partir de águas residuais municipais pode melhorar o acesso a fontes de energia renovável, beneficiando comunidades locais e indústrias.<br>**Saúde e Segurança:** A redução de problemas de odor associados ao tratamento de águas residuais, resultante da diminuição de $H_2S$ no biogás, melhora as condições de trabalho e a aceitação pública das instalações de tratamento. | Nenhum cluster foi abordado. |

Fonte: Scopus

A análise PRISMA revelou lacunas significativas na literatura existente, particularmente no que diz respeito à integração das dimensões de governança com o desenvolvimento e implementação das tecnologias de produção de biometano e hidrogênio. Em relação aos clusters ambientais, há uma falta de estudos que abordem os impactos na biodiversidade e nos recursos hídricos, que são fundamentais para uma avaliação ambiental abrangente. Isso representa uma oportunidade científica importante para pesquisas que explorem esses aspectos mais profundamente, ampliando a compreensão dos impactos ecológicos dessas tecnologias.

Na dimensão social, a análise destacou um foco restrito na criação de empregos e na melhoria do acesso à energia, enquanto questões relacionadas aos direitos humanos e padrões trabalhistas não receberam a devida atenção. Essa lacuna aponta para a necessidade de estudos que considerem não apenas os benefícios econômicos e sociais imediatos, mas também os impactos de longo prazo nas comunidades locais e as condições de trabalho associadas a essas tecnologias.

Na dimensão econômica, embora muitos estudos discutam os benefícios econômicos da produção de biometano e hidrogênio, há uma falta de análises que considerem a transferência de tecnologia e os mecanismos de financiamento público que poderiam viabilizar a ampliação dessas soluções. A falta de foco nessas áreas representa uma oportunidade para o desenvolvimento de novas estratégias de financiamento e modelos de negócios que possam apoiar a transição para uma economia mais sustentável.

Por fim, na dimensão de governança, foi identificada uma lacuna substancial na discussão sobre normas e certificações, bem como na análise da estabilidade e do Estado de Direito. A escassez de pesquisas nessa área sugere uma oportunidade para o desenvolvimento de estruturas regulatórias robustas que possam orientar a implementação segura e eficiente das tecnologias de biometano e hidrogênio de baixo carbono. A integração de políticas públicas com a inovação tecnológica é crucial para garantir que essas tecnologias contribuam de forma significativa para os objetivos globais de sustentabilidade.

### 3.1.2 Resultados da Análise Bibliométrica

#### 3.1.2.1 Coautoria com Países

O mapa de coautoria entre países permite analisar o interesse dos países em tópicos específicos de acordo com o número de documentos publicados. Para esta análise, foi aplicado o método de força de associação, que utiliza o número de publicações conjuntas como uma medida de força entre os países, sendo o peso as publicações. Foram selecionados países com pelo menos 5 publicações em coautoria com outros países, totalizando 39 países, dos quais apenas 9 atenderam aos critérios selecionados, conforme mostrado no mapa da Figura 3.

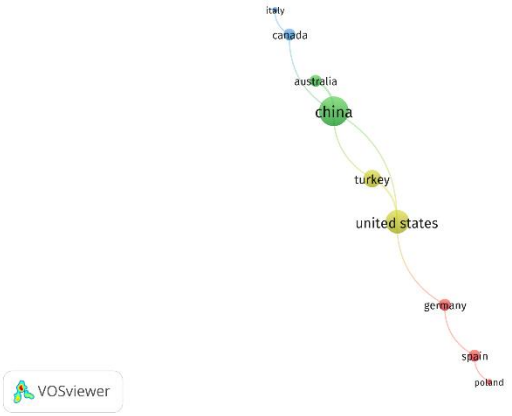



Figura 3 - Mapa de coautoria entre países

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software VOSviewer

No mapa da Figura 3, o tamanho do círculo indica o número de publicações; além disso, sua proximidade sugere um vínculo mais forte de coautoria. Os clusters de países são representados por cores, e as linhas são conexões entre os países. Quatro clusters são identificados, entre eles, o cluster verde mostra que a China possui o nó mais proeminente e tem uma relação mais forte com a Austrália, pertencente ao mesmo grupo, com 14 publicações e 4 parcerias com a Turquia, Estados Unidos, Canadá e Austrália.

Na Tabela 3, pode-se observar a relação dos países com o maior número de publicações.

Tabela 3 - Mapa de coautoria entre países

| País | N° de documentos | Citações |
|---|---|---|

| | | |
|---|---|---|
| China | 14 | 279 |
| Estados Unidos | 8 | 292 |
| Turquia | 7 | 134 |
| Austrália | 8 | 242 |
| Canadá | 7 | 143 |
| Alemanha | 7 | 179 |
| Espanha | 7 | 181 |
| Itália | 5 | 79 |
| Polônia | 9 | 81 |

Fonte: Elaborado pelo autor através dos dados do VosViewer

A forte ligação entre China e Austrália na colaboração de coautoria sobre biogás, mostrada no mapa da Figura 3, é apoiada por uma série de iniciativas conjuntas focadas no desenvolvimento de energia renovável e descarbonização. Recentemente, foi inaugurado o Centro Conjunto de Pesquisa China-Austrália para Biocombustíveis e Biorrefinarias, uma parceria entre o Instituto de Conservação de Energia de Guangzhou da Academia Chinesa de Ciências e a Universidade de Tecnologia de Queensland. Este centro é apoiado pelo Fundo de Ciência e Pesquisa China-Austrália e tem como objetivo promover a pesquisa conjunta e a inovação tecnológica no campo da energia renovável (Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, 2023). Além disso, há discussões e eventos, como a Mesa Redonda de Descarbonização Austrália-China, que destacam a colaboração contínua e o intercâmbio de conhecimentos e tecnologias entre os dois países no campo da energia renovável, incluindo o biogás (ANU Institute for Climate, Energy & Disaster Solutions, 2024).

Avaliando o cluster amarelo, é possível identificar a forte relação entre os Estados Unidos, que têm 3 parcerias e 8 documentos, e a Turquia, com 2 parcerias e 7 documentos. Isso pode ser explicado pelo compartilhamento de interesses e objetivos comuns na utilização do potencial de resíduos agrícolas e animais para a produção de biogás. Ambos os países possuem uma quantidade significativa de resíduos agrícolas que oferecem um potencial substancial para a produção de biogás, levando a colaborações de pesquisa para otimizar a tecnologia de biogás e maximizar seu uso eficiente. Com as mudanças geopolíticas trazidas pela guerra na Ucrânia, a relação EUA-Turquia ganha ainda mais relevância. A Turquia, por sua posição geopolítica, tem

mantido um equilíbrio diplomático entre o Ocidente e a Rússia. Ao mesmo tempo, a busca por fontes de energia alternativas tem impulsionado novas iniciativas de cooperação em energias renováveis. Para os Estados Unidos, fortalecer os laços com a Turquia, especialmente em setores estratégicos como o de energia, é uma forma de consolidar uma aliança que possa ajudar a mitigar os impactos de crises energéticas e fortalecer a estabilidade regional. A colaboração em áreas de interesse comum, como o desenvolvimento de biogás e tecnologias sustentáveis, pode servir como um terreno neutro para fortalecer essas relações.

A colaboração em biogás entre Alemanha, Espanha e Polônia, demonstrada no cluster vermelho, que têm 7, 8 e 9 documentos, respectivamente, está fortemente ligada aos esforços conjuntos para avançar na produção e utilização de biogás como parte das estratégias de energia renovável da União Europeia. Esses países compartilham tecnologias de produção e estratégias de implantação, apoiados por políticas da UE que promovem a transição para uma economia de baixo carbono. A Alemanha lidera na adoção e desenvolvimento de tecnologias de digestão anaeróbica e atualização de biogás para biometano, servindo como modelo para colaborações com países vizinhos como Polônia e Espanha, que também estão expandindo suas capacidades de biogás (Pavičić, 2022). No cenário geopolítico, é relevante considerar como a guerra na Ucrânia influencia essas relações de coautoria desses países, sendo observado um aumento na busca por independência energética, principalmente na Europa, onde a dependência de gás natural da Rússia tornou-se uma questão estratégica. Esse contexto acelerou o interesse em fontes alternativas de energia, como o biogás e o biometano, tanto na União Europeia quanto em países com forte tradição agrícola e industrial. Além disso, a guerra também afetou cadeias de suprimentos e mercados de energia, forçando colaborações mais estreitas entre países europeus e aqueles que possuem capacidade tecnológica para avançar na produção de energia renovável. Países como Alemanha e Polônia, que já colaboravam em tecnologia de biogás, agora têm um incentivo ainda maior para expandir suas pesquisas e desenvolver projetos conjuntos que fortaleçam suas capacidades energéticas internas e promovam uma economia de baixo carbono.

O cluster azul, formado por Itália e Canadá, pode ser atribuído ao foco compartilhado em avanços tecnológicos e políticas de energia sustentável. A Itália se destaca na produção e uso de biogás e biometano como uma importante fonte de energia renovável, estabelecendo mais de 1.500 plantas de digestão anaeróbica. Isso reflete

uma infraestrutura bem desenvolvida que pode oferecer colaborações significativas com países como o Canadá, que também está interessado em promover tecnologias de energia limpa e sustentável (Ieabioenergy, 2021). Para a Itália, a colaboração com o Canadá não apenas fortalece as suas capacidades tecnológicas e econômicas no setor de energia renovável, mas também ajuda a diversificar suas fontes de parceria energética em um cenário global incerto. Para o Canadá, a cooperação com a Itália oferece acesso a mercados e tecnologias europeias de ponta, promovendo sua presença global no setor de energia limpa.

### 3.1.2.2 Coocorrência com Palavra-chave do Autor

Para analisar a coocorrência das palavras-chave, foram escolhidas as palavras-chave dos autores, pois tendem a ser mais específicas, descrevendo exatamente sobre o que é o estudo. O OpenRefine foi utilizado para mesclar os sinônimos das palavras-chave para melhor visualização, e, em seguida, o arquivo foi aberto no VOSviewer. Assim, foram encontradas 328 palavras-chave dos autores e aplicou-se um mínimo de duas ocorrências por palavra-chave. 44 palavras-chave atenderam a esse critério, conforme mostrado na Figura 4.

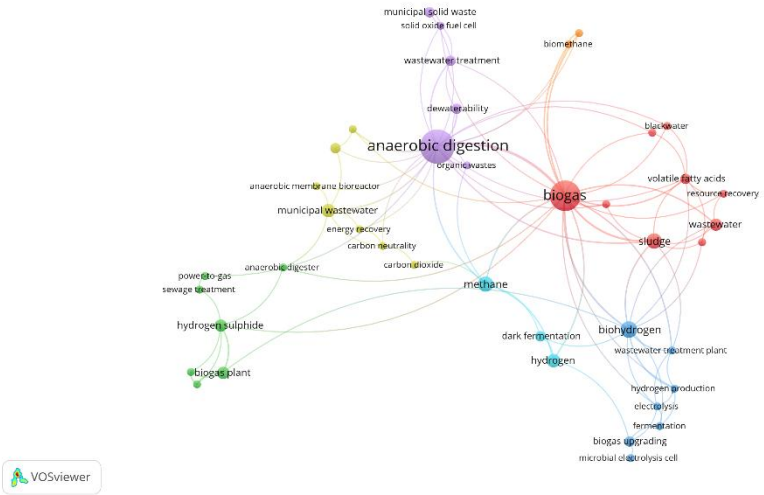



Figura 4 - Coocorrência com Palavra-chave do Autor

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software VOSviewer

O mapa de coocorrência de palavras-chave na Figura 4 fornece uma visualização detalhada das relações e agrupamentos entre os termos-chave frequentemente associados à pesquisa sobre a produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais. Um total de 44 itens foram identificados, conectados entre si, formando 7 clusters, com 98 links, resultando em uma força total de ligação de 134. As informações foram geradas usando o método de normalização, com a opção de força de associação selecionada, utilizando um layout de atração de 3 e repulsão de 0. Os detalhes dos clusters podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Detalhamento dos Clusters de Coocorrência das Palavras-chave dos Autores

| Palavras-chave do Autor | Cluster | Nº de Ocorrencias |
|---|---|---|
| Digestão anaeróbica | 1 | 24 |
| Biogás | 2 | 20 |
| Biohidrogênio | 3 | 7 |
| Metano | 4 | 6 |
| Águas residuais municipais | 5 | 5 |
| Sulfeto de hidrogênio | 6 | 4 |
| Biometano | 7 | 2 |

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software VOSviewer

As conexões entre os diversos termos relacionados à produção de biometano e hidrogênio destacam a integração de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis. O cluster roxo está centrado no processo de digestão anaeróbica, crucial para a produção de biogás, e está fortemente ligado ao "biogás", representando o processo biológico e químico que transforma matéria orgânica em biogás, um composto rico em metano, em um ambiente anaeróbico, ou seja, na ausência de oxigênio. Essa relação é importante porque contribui para a eficiência energética, uma vez que o processo de digestão anaeróbica é uma forma eficiente de converter resíduos orgânicos em energia renovável, ajudando a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, além de promover a gestão de resíduos devido à capacidade de transformar significativamente a massa de resíduos orgânicos, reduzindo seu volume e impacto ambiental enquanto gera energia, contribuindo para a sustentabilidade ambiental ao tratar resíduos de

forma ecológica e fornecer uma fonte de energia limpa. Esse cluster também mostra conexões com "águas residuais municipais" e "sulfeto de hidrogênio", indicando o foco na gestão de resíduos urbanos e os desafios associados à presença de compostos de enxofre durante a digestão anaeróbica. A ligação com "desaguamento" sugere uma preocupação com o manuseio e o tratamento dos biossólidos resultantes, o que é essencial para a eficiência operacional das plantas.

O segundo cluster mais relevante é o vermelho, com o termo "Biogás" em seu núcleo. Quando conectado com "metano" e "biometano", retrata a conversão do biogás em formas de energia mais refinadas e utilizáveis. Segundo (Francisco López, 2024), o processo de purificação do biogás remove impurezas como $CO_2$, transformando o biogás em biometano, um combustível com características semelhantes ao gás natural, que pode ser utilizado em várias aplicações industriais e domésticas.

As conexões com "economia circular" e "hidrogênio" indicam uma tendência de integrar a produção de biogás em ciclos econômicos fechados, maximizando subprodutos e resíduos. Essa abordagem se alinha com os princípios da economia circular, que visam maximizar o uso de recursos e minimizar o desperdício, promovendo a reciclagem e o reuso de materiais. Estudos recentes destacam o papel do biogás na economia circular, ressaltando seu potencial para integrar fluxos de resíduos e produzir energia renovável (Geissdoerfer, 2017).

Adicionalmente, a ligação com "águas residuais" e "lodo" reforça a ideia de que o tratamento de águas residuais é uma fonte vital para a produção de biogás. A digestão anaeróbica de lodo de esgoto e resíduos de tratamento de águas residuais é uma prática bem estabelecida que não apenas auxilia na gestão de resíduos, mas também contribui significativamente para a geração de biogás. Um estudo de Tsegaye (2022) explora como as plantas de tratamento de águas residuais podem ser otimizadas para maximizar a produção de biogás, melhorando assim a sustentabilidade ambiental e energética. O estudo destaca o potencial da digestão anaeróbica de lodo de esgoto e outros resíduos de águas residuais para aumentar os rendimentos de biogás.

O cluster azul, representado pelo termo "biohidrogênio", está conectado à "eletrólise", sugerindo o uso dessa técnica para a produção de hidrogênio a partir do biogás. A relação com "produção de hidrogênio" e "atualização do biogás" revela um interesse em técnicas avançadas para melhorar a qualidade do biogás e expandir suas aplicações, incluindo produção de energia e purificação para uso em células de combustível.

O quarto cluster, azul claro, destaca o termo “metano”, um componente principal do biogás e biometano e um dos gases de efeito estufa mais potentes. Sua produção significativa é centrada na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, onde sua gestão é crucial para aplicações em energia renovável e mitigação das mudanças climáticas (Ieabioenergy, 2021). Essas razões justificam as ligações com os termos “biogás”, “digestão anaeróbica” e “resíduos orgânicos”. A conexão com “dióxido de carbono” reflete a importância das tecnologias de separação e captura de carbono para melhorar a qualidade do biogás e sua viabilidade como fonte de energia renovável.

O termo “águas residuais municipais” integra o quinto cluster, e suas conexões com “digestão anaeróbica”, “comunidade microbiana”, “biorreator de membrana anaeróbico”, “recuperação de energia” e “neutralidade de carbono” fornecem um quadro importante para a compreensão dos processos de tratamento e utilização de águas residuais municipais. A digestão anaeróbica é uma técnica essencial no tratamento de águas residuais municipais, permitindo a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, e integrar a digestão anaeróbica nas estações de tratamento de águas residuais ajuda a reduzir o volume de lodo, minimizar as emissões de gases de efeito estufa e gerar receita por meio da venda de energia. A comunidade microbiana em instalações de tratamento de águas residuais desempenha um papel crucial na degradação dos resíduos e na eficiência da digestão anaeróbica. A diversidade e a atividade desses microrganismos são essenciais para otimizar a conversão de resíduos em biogás. Biorreatores de membrana anaeróbicos são uma tecnologia avançada que combina tratamento biológico e separação por membrana, oferecendo tratamento de efluentes altamente eficaz e potencial para recuperação de recursos. Este sistema é particularmente vantajoso para tratar e reciclar águas residuais em contextos urbanos (Liang, 2023). A busca pela neutralidade de carbono em instalações de tratamento de águas residuais envolve estratégias para reduzir ou compensar as emissões de carbono, incluindo a otimização de processos para maximizar a produção de energia renovável e minimizar a liberação de gases de efeito estufa.

O sexto cluster verde tem “sulfeto de hidrogênio” como termo central, que é um subproduto comum em plantas de biogás. O $H_2S$ precisa ser removido para prevenir a corrosão de equipamentos, como digestores anaeróbicos, e garantir que o biogás seja seguro para combustão e conversão de energia. Portanto, sua remoção é fundamental para manter a eficiência operacional e a segurança ambiental das plantas de biogás (Mutegoa, 2023) justificando a ligação com os termos “planta de biogás”,

“digestor anaeróbico” e “biogás”. Em estações de tratamento de águas residuais, o $H_2S$ é encontrado principalmente nos tanques de lodo, sendo uma preocupação significativa devido ao seu potencial corrosivo e tóxico, especialmente em processos como a digestão anaeróbica do lodo de esgoto. Sua ocorrência é influenciada pela composição do esgoto e pelas condições operacionais (Habeeb, 2018). A ligação com o termo “amônia” ocorre porque este composto, assim como o $H_2S$, surge durante o processo de purificação do biogás, onde ambos precisam ser removidos para evitar problemas de corrosão e cumprir as rigorosas regulamentações ambientais. Os principais componentes do biogás são o metano ($CH_4$) e o dióxido de carbono ($CO_2$), que representam 55–65% e 35–45% da mistura de gases, respectivamente; contaminantes como água, nitrogênio, oxigênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e siloxanos estão presentes em quantidades traço (di Profio, 2023). A conexão com “COVs” surge porque o $H_2S$ é frequentemente associado a compostos orgânicos voláteis (COVs) no contexto de tratamento de águas residuais e biogás, onde esses compostos podem ser emitidos durante o processamento de resíduos orgânicos, exigindo controle para prevenir efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente. As estratégias de gestão dos COVs incluem técnicas de absorção, adsorção e condensação, bem como tratamentos biológicos para degradar esses compostos de forma eficiente (Sun, 2019).

O último cluster é representado pelo nó “biometano”, mostrando ligações diretas com “energia renovável”, “digestão anaeróbica” e “biogás”. É considerado uma fonte de energia renovável porque é produzido a partir da decomposição de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, esterco e resíduos sólidos urbanos. Essa natureza renovável é significativa, pois ajuda a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminui as emissões de gases de efeito estufa. Tem grande potencial para contribuir para a matriz energética renovável, fornecendo uma alternativa sustentável e mais limpa ao gás natural (Scarlat, 2018). O biometano é produzido por meio da atualização do biogás, que é gerado durante a digestão anaeróbica de materiais orgânicos (Ryckebosch, 2011).

Na Figura 5, o mapa de sobreposição das palavras-chave dos autores pode ser visualizado, mostrando a evolução dos termos relacionados ao biogás e à digestão anaeróbica de 2018 a 2022, onde a codificação de cores do azul para o amarelo indica a transição das áreas de foco anteriores para as mais recentes na pesquisa. As pesquisas iniciais focaram fortemente nos aspectos fundamentais da produção de biogás, particularmente através da digestão anaeróbica, um processo pelo qual a matéria

orgânica é decomposta por bactérias na ausência de oxigênio, produzindo biogás rico em metano (Francisco López, 2024). À medida que o campo amadureceu, o foco mudou para a integração da produção de biogás com outras tecnologias renováveis. Isso inclui a atualização do biogás para biometano e a exploração da produção de hidrogênio via eletrólise, refletindo uma tendência em direção a sistemas energéticos mais versáteis e eficientes (Antukh, 2022). As pesquisas mais recentes enfatizam a sustentabilidade e a recuperação de recursos. Tecnologias como células de eletrólise microbiana, que convertem o biogás em hidrogênio, ganharam atenção, apoiando os objetivos de neutralidade de carbono (Lu, 2016).

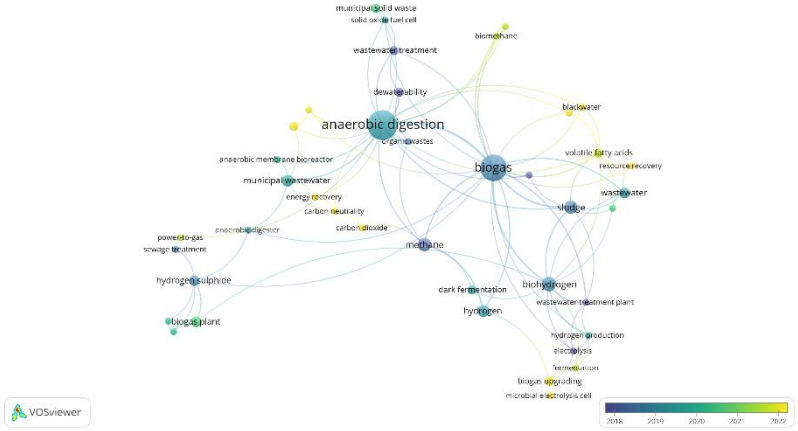



Figura 5 - Visualização de Sobreposição das Palavras-chave dos Autores

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software VOSviewer

### 3.1.3 Resultado da análise de patentes

A primeira análise de patentes revelou *insights* significativos sobre a interseção entre a produção de biometano e resíduos urbanos e municipais, identificando um total de 1.765 patentes. Esse total inclui tanto patentes ativas quanto inativas, proporcionando uma visão abrangente do panorama de inovação nesta área emergente de energia sustentável.

O gráfico de pizza da Figura 6 ilustra o status legal dessas patentes, considerando a categorização em cinco grupos distintos, com a maior parte representada por

patentes concedidas, totalizando 43,74% do gráfico, indicando que quase metade das patentes analisadas foram oficialmente aprovadas e estão atualmente válidas. As patentes nesta categoria estão ativas e aplicáveis, sugerindo um forte e contínuo interesse e investimento em tecnologias relacionadas à produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais. A porcentagem significativa de 27,60% de patentes caducadas pode indicar áreas onde a tecnologia se tornou obsoleta ou onde a viabilidade comercial não foi sustentada. Essas patentes já estiveram ativas, mas desde então caducaram devido a razões como o não pagamento de taxas de manutenção ou o término do prazo da não renovação em patentes.

20,34% estão em status pendente, ou seja, foram depositadas e aguardam decisão. Essa proporção substancial reflete os esforços contínuos de pesquisa e desenvolvimento no campo, indicando que novas inovações estão sendo continuamente propostas e estão sob revisão. As menores porcentagens são representadas por patentes revogadas, resultando em 4,82% do gráfico, e este status refere-se às patentes que foram negadas após análise, o que pode ocorrer por várias razões, como descobertas subsequentes de que a invenção não era nova ou era óbvia no momento do depósito da patente, ou devido a desafios legais que provaram com sucesso a invalidade da patente.

Além disso, 3,91% são patentes expiradas, considerando aquelas que chegaram ao fim de seu prazo legal, caindo nesta categoria. A presença de patentes expiradas ressalta a maturação de certas tecnologias dentro do setor.

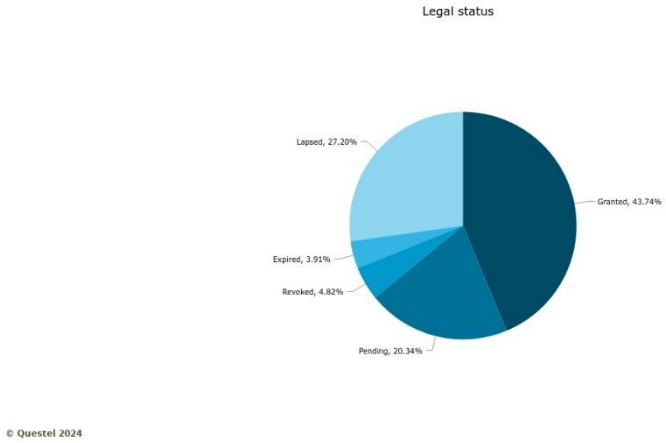



Figura 6 - Gráfico de Status Legal

Fonte: Elaborado pelo Autor através do software Questel Orbit Intelligence

O grande número de patentes concedidas e pendentes reflete uma intensa atividade inovadora e o potencial de crescimento contínuo no campo da produção de biometano e hidrogênio. Esse aumento de patentes indica que as empresas e instituições estão investindo significativamente no desenvolvimento de novas tecnologias para aproveitar o potencial energético de resíduos e na transição para uma economia de baixo carbono. No entanto, a presença de patentes expiradas, abandonadas ou revogadas também serve como um indicativo dos desafios que essas tecnologias enfrentam. Esses abandonos podem ocorrer por vários motivos, como a obsolescência tecnológica, onde avanços concorrentes ou mudanças no mercado tornam certas patentes menos viáveis comercialmente. Além disso, o custo de manutenção de patentes pode ser elevado, e decisões estratégicas são tomadas para focar recursos em inovações mais promissoras, redirecionando os esforços para tecnologias com maior impacto e viabilidade econômica a longo prazo.

Examinar as tendências nos depósitos de patentes ao longo dos anos, conforme mostrado na Figura 7, fornece uma visão abrangente da evolução tecnológica no campo da produção de biometano, oferecendo insights sobre o crescimento e as mudanças na inovação ao longo do tempo. Este fato permite ver não apenas o volume de inovações, mas também o impacto de vários fatores tecnológicos, econômicos e regulatórios que influenciaram este setor ao longo das décadas, ajudando-nos a entender como o ritmo da inovação respondeu às demandas globais por soluções de energia renovável e técnicas de gestão de resíduos, refletido no número crescente de pedidos de patentes, especialmente desde o início dos anos 2000, com crescimento exponencial a partir de 2005.

Durante este período, a conscientização global sobre práticas sustentáveis e fontes de energia renovável começou a crescer. Eventos como a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto em 2005, que estabeleceu obrigações vinculativas para os países industrializados reduzirem as emissões de gases de efeito estufa, incentivaram o desenvolvimento de tecnologias mais limpas, incluindo a produção de biogás e hidrogênio a partir de fontes renováveis. O aumento constante nos depósitos de patentes de 2005 a cerca de 2015 sugere um interesse crescente nas tecnologias de conversão de resíduos em energia, impulsionado pelo movimento global contínuo em direção à sustentabilidade. Os avanços na tecnologia de biogás durante esse período, como melhorias nas técnicas de digestão anaeróbica e sistemas de atualização de biogás, contribuíram para o aumento da atividade de patentes. Tecnologias que permitiram a

conversão do biogás em biometano e a integração de técnicas de produção de hidrogênio receberam considerável atenção.

O pico em torno de 2015 pode ser atribuído a uma combinação de fatores, incluindo incentivos governamentais, avanços tecnológicos, demanda crescente por energia sustentável, foco na economia circular e pressões por segurança energética. O Acordo de Paris certamente foi um catalisador importante, à medida que países e empresas aumentaram seus investimentos em tecnologias de energia renovável, mas esse aumento de patentes também reflete uma convergência de inovações tecnológicas e políticas econômicas focadas em energias renováveis e soluções de baixo carbono.

Nos últimos anos, observou-se um nível estável, porém elevado, de depósitos de patentes focados em sustentabilidade e nos princípios da economia circular. Isso reflete o crescente interesse no desenvolvimento de tecnologias que não apenas geram energia, mas também abordam de forma eficiente a gestão de resíduos, a recuperação de recursos e a mitigação dos impactos ambientais. Tais invenções, especialmente no campo da produção de biogás e biometano, alinham-se às metas globais de transição energética e descarbonização. Um exemplo claro dessa tendência é o aumento expressivo de invenções relacionadas à produção de hidrogênio. O Global Hydrogen Review (2023) destacou que as patentes no setor de hidrogênio atingiram um pico significativo, com 555 pedidos em 2021, um aumento de quase 68% desde 2018. Esse crescimento está diretamente relacionado à necessidade urgente de transição para emissões líquidas zero até 2050, incentivando empresas de energia a intensificar suas pesquisas e produção de hidrogênio verde. Além da transição para o hidrogênio verde, outras tendências como incentivos governamentais e políticas climáticas, avanços na digitalização e automação e demandas crescentes por fontes de energia limpa, justificam o aumento contínuo no depósito de patentes relacionadas à sustentabilidade.

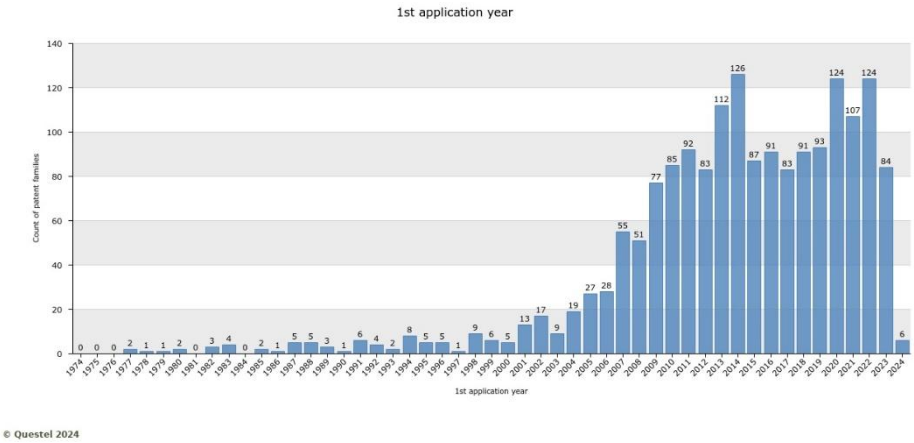



Figura 7 - Gráfico de Depósitos de Patentes ao Longo dos Anos

Fonte: Elaborado pelo Autor através do software Questel Orbit Intelligence

A origem da tecnologia é, em regra geral, atribuída ao país cujo escritório de patentes recebeu o primeiro depósito. O país onde a patente é inicialmente registrada tem um papel fundamental no processo de proteção, pois estabelece a data de prioridade, que é determinante para o reconhecimento internacional da invenção. Essa data de prioridade serve como referência para futuros depósitos em outros países, embora nem sempre o primeiro depósito defina todos os aspectos das estratégias de proteção internacional que podem variar conforme o caso e a jurisdição. Esse depósito inicial é normalmente feito em um escritório de patentes nacional e estabelece precedência para a proteção da patente em outros países sob acordos internacionais, como a CUP - Convenção da União de Paris de 1883. Esta convenção permite que os inventores depositem primeiro em seu país de origem e depois estendam sua aplicação internacionalmente dentro de um prazo definido, geralmente de até 12 meses para patente de invenção, caracterizando a Prioridade Unionista. Esse depósito inicial estratégico é importante não apenas do ponto de vista legal, mas também pelas implicações comerciais e estratégicas potenciais, dependendo das jurisdições envolvidas, pois considera não apenas a inovação em si, mas também onde essa inovação terá o maior impacto econômico e ambiental (WIPO, 2024). A Figura 8, que destaca as famílias de patentes por país de proteção, revela onde as empresas e inventores optam por proteger suas inovações, geralmente em mercados considerados estratégicos. Isso indica os locais onde há maior interesse em garantir os direitos exclusivos sobre a tecnologia, como os Estados Unidos e a China, que aparecem em destaque devido a seus grandes

mercados e a infraestrutura avançada para desenvolvimento e implementação de tecnologias de energia renovável e gestão sustentável de resíduos.

Por outro lado, a Figura 9, que se refere aos países de publicação, mostra onde as patentes são oficialmente publicadas após o depósito inicial, o que pode incluir várias jurisdições dependendo da estratégia global de proteção de propriedade intelectual adotada. O grande número de publicações em países como os Estados Unidos e a China sugere que esses mercados são prioritários para a comercialização de inovações no campo das tecnologias sustentáveis, alinhando-se com as políticas e incentivos locais que favorecem a inovação e o desenvolvimento de soluções ambientais. Além disso, os dados refletem a importância do país de prioridade, que estabelece a data de prioridade para a patente e geralmente é o local onde o primeiro depósito é feito. Esse país desempenha um papel crucial ao definir a posição do requerente no cenário internacional de patentes. Esse cenário, evidenciado pelas Figuras 8 e 9, reflete uma tendência de concentrar os esforços de proteção e publicação em regiões desenvolvidas, como os EUA e a China, alinhando-se com compromissos climáticos e políticas de desenvolvimento sustentável. Tais países, com regulamentos robustos e incentivos financeiros para energias renováveis, são escolhidos como locais estratégicos para proteger e publicar inovações tecnológicas no setor de biogás, hidrogênio e gestão de resíduos. Isso demonstra o foco em mercados que não apenas oferecem potencial de crescimento, mas também apoio governamental significativo para tecnologias limpas, promovendo o cumprimento de acordos climáticos internacionais e objetivos de desenvolvimento sustentável.

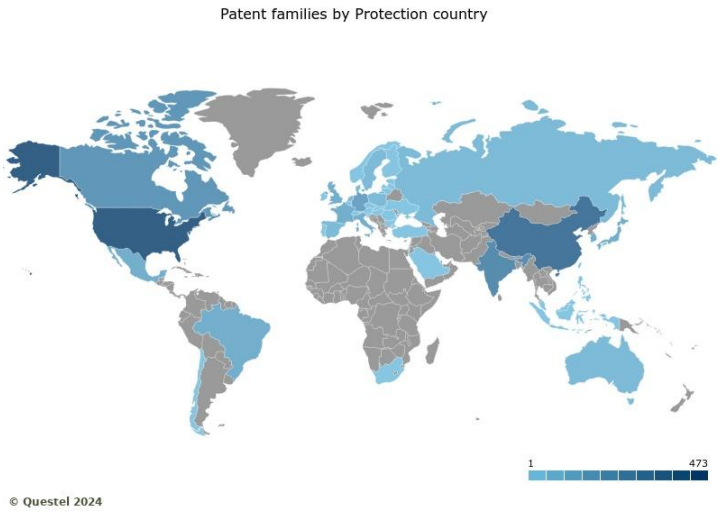



Figura 8 - Famílias de Patentes por País de Proteção

Fonte: Elaborado pelo Autor através do software Questel Orbit Intelligence

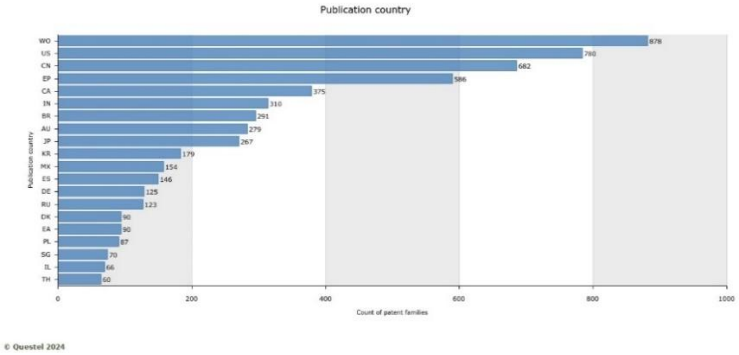



Figura 9 - Gráfico de Publicação de Patentes por País

Fonte: Elaborado pelo Autor através do software Questel Orbit Intelligence

A presença proeminente da designação WO (Patentes Internacionais da Organização Mundial da Propriedade Intelectual) indica uma estratégia de proteção internacional, visando cobrir múltiplos mercados globais, possibilitada pelo Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT) (WIPO, 2024).

As empresas envolvidas no depósito e manutenção de patentes relacionadas às tecnologias de biometano e gestão de resíduos urbanos e municipais representam um grupo diversificado de inovadores na vanguarda das soluções de energia renovável e sustentabilidade ambiental. Essas empresas variam em tamanho, desde gigantes globais dos setores químico e energético até startups focadas em tecnologia limpa. Entre os principais players destacados na Figura 9 está a Xyleco, líder em inovação tecnológica, com muitas patentes, especialmente em tecnologias de biomassa (62 patentes) e fermentação (39 patentes). A empresa se concentra em transformar materiais não alimentares em combustíveis renováveis, produtos químicos e materiais biodegradáveis, demonstrando seu compromisso com tecnologias sustentáveis.

Em seguida, está a DSM IP Assets, uma subsidiária da Royal DSM, conhecida por suas inovações em saúde, nutrição e materiais, com um portfólio forte em biogás (33 patentes) e fermentação (20 patentes), alinhando-se com a missão da empresa de usar a ciência para criar impactos positivos nos ambientes e sociedades.

A seguir, está a empresa canadense Iogen, especializada em tecnologia de biocombustíveis, que se destacou no desenvolvimento de processos avançados para produzir etanol celulósico. Suas patentes em biogás (19 patentes) e digestor

anaeróbico (15 patentes) refletem seu foco em soluções de bioenergia e reciclagem de resíduos.

Em quarto lugar no gráfico está a startup Synata Bio, que investiu em tecnologias disruptivas para converter gás natural e biomassa em produtos químicos e combustíveis limpos, demonstrando sua abordagem inovadora por meio de um número significativo de patentes em diversas áreas-chave.

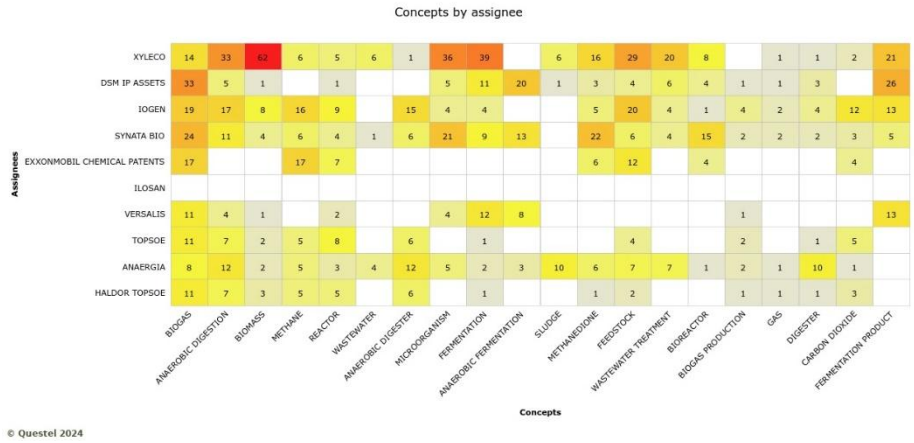



Figura 10 - Gráfico de Conceitos por Titular

Fonte: Elaborado pelo Autor através do software Questel Orbit Intelligence

A análise do status legal das famílias de patentes no gráfico da Figura 11 fornece uma compreensão do status e do potencial comercial das invenções desses titulares, demonstrando a forte posição de mercado e o potencial para proteger suas inovações pela Xyleco, devido ao grande número de patentes pendentes e ativas (46). Do ponto de vista das patentes expiradas, Xyleco e DSM IP Assets ocupam as duas primeiras posições, cada uma apresentando 28 patentes cujo status podem representar as patentes expiradas, caducadas e revogadas. Isso pode estar relacionado ao ciclo de vida da inovação, onde, devido à rápida evolução tecnológica em áreas como a produção de biometano e hidrogênio, algumas invenções podem rapidamente se tornar obsoletas ou menos competitivas, levando ao abandono das patentes associadas.

Isso também pode resultar da estratégia de proteção de propriedade intelectual adotada, onde a decisão de abandonar patentes que não são mais estrategicamente importantes ou que não justificam o custo de manutenção pode surgir, indicando que a empresa está direcionando seu foco para áreas mais promissoras ou eficientes. A decisão de abandonar uma patente é, em última análise, uma medida estratégica que

permite que as empresas concentrem seus recursos em tecnologias que continuam a agregar valor ao negócio e ao mercado.

Titulares sem patentes expiradas podem indicar que as patentes são relativamente recentes e ainda não atingiram o ponto de expiração. Isso também pode apontar para uma maior seletividade no processo de patenteamento, escolhendo registrar apenas invenções com potencial de mercado claro ou aplicabilidade a longo prazo, ou devido à estratégia de manter essas patentes ativas, potencialmente devido ao seu valor contínuo para a empresa em termos de produtos no mercado atual ou tecnologias em desenvolvimento.

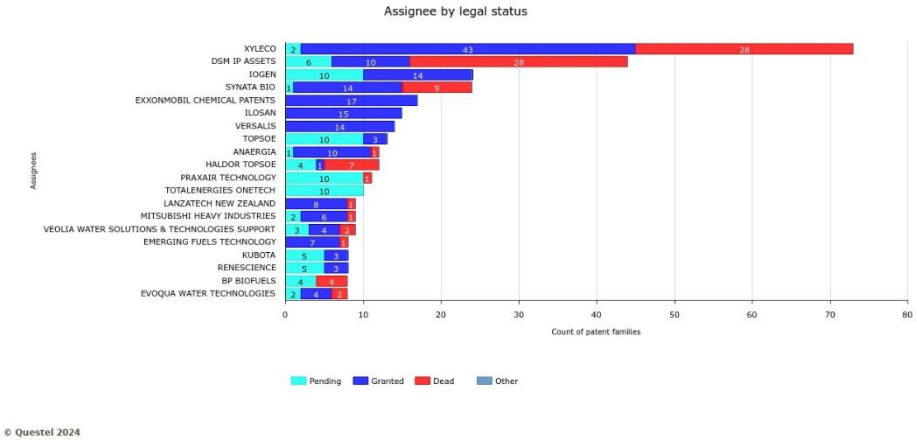



Figura 11 - Gráfico de Titular por Status Legal

Fonte: Elaborado pelo Autor através do *software* Questel Orbit Intelligence

Uma análise geral dos conceitos de patentes oferece uma visão valiosa das áreas de foco em termos de pesquisa e desenvolvimento. No gráfico da Figura 12, uma série de conceitos associados a patentes no campo do biogás e tecnologias relacionadas são visualizados. A Digestão Anaeróbica é o conceito mais destacado no gráfico, com 609 ocorrências, diretamente relacionado à produção de energia renovável e à gestão de resíduos, sendo central para muitas das patentes das empresas identificadas em análises anteriores. A proeminência dessa tecnologia de conversão também foi vista na revisão sistemática da literatura e na análise bibliométrica apresentadas anteriormente.

O Biogás aparece com 573 ocorrências e é o produto desejado da digestão anaeróbica. O biogás é usado para a produção de energia limpa e pode ser atualizado para produzir biometano, que é uma alternativa renovável ao gás natural (Francisco

López, 2024). O Metano e o metandienona aparecem com 499 e 480 ocorrências, respectivamente, destacando a importância do metano como o principal componente do biogás e como um ponto focal nas inovações tecnológicas para aumentar a eficiência da produção de biogás e seu processamento subsequente em produtos químicos ou combustíveis úteis.

A Fermentação e a fermentação anaeróbica também são destacadas, com 448 e 280 ocorrências, refletindo o processo bioquímico usado para decompor matéria orgânica na ausência de oxigênio, um passo crítico na produção de biogás. Os termos biomassa e eletricidade emergem em seguida, com 478 e 389 ocorrências, indicando a fonte de matéria-prima (biomassa) e um dos produtos finais (eletricidade) das tecnologias de biogás. Isso destaca o papel do biogás como uma ponte entre recursos renováveis e a produção de energia sustentável.

A proeminência da digestão anaeróbica nas inovações tecnológicas e patentes é justificada por sua capacidade de fornecer uma solução eficaz de gestão de resíduos que não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também produz energia renovável e subprodutos valiosos. A adoção crescente dessa tecnologia é uma resposta direta às necessidades globais de gestão sustentável de resíduos e soluções energéticas, alinhando-se com os objetivos ambientais globais e impulsionando uma economia circular mais ampla (Almansa, 2023).




Figura 12 - Gráfico de conceitos

Fonte: Elaborado pelo Autor através do *software* Questel Orbit Intelligence

## 3.2 Desenvolvimento do Roadmap

A contínua evolução das tecnologias de conversão de resíduos em energia é fundamental para enfrentar os desafios globais relacionados à gestão de resíduos, produção de energia renovável e sustentabilidade ambiental. À medida que os volumes de resíduos urbanos e municipais crescem, aumenta também a urgência de desenvolver e aprimorar tecnologias que não apenas gerenciem esses resíduos de forma eficiente, mas também os convertam em recursos energéticos valiosos, como o biometano e hidrogênio de baixo carbono. Compreender o cenário atual e futuro das aplicações tecnológicas é crucial, pois alcançar metas de sustentabilidade exige uma perspectiva voltada para o futuro, a fim de antecipar e capitalizar sobre os avanços tecnológicos.

Para apoiar essa análise, foi realizada uma revisão abrangente das tecnologias de conversão mencionadas nos dez artigos selecionados na análise PRISMA assim como dos resíduos. Essa revisão destaca as tendências atuais de pesquisa e os estágios de desenvolvimento de várias tecnologias de conversão de resíduos em energia. As tecnologias identificadas incluem Digestão Anaeróbica, Eletrólise, Fermentação Escura, Células a Combustível Microbianas (CCMs) e Digestão Anaeróbica Seca.

O gráfico da Figura 13 ilustra a distribuição das tecnologias de conversão de energia mencionadas em uma revisão sistemática de dez artigos de pesquisa. O gráfico quantifica a frequência de menção de cada tecnologia, fornecendo uma visualização que destaca a ênfase relativa colocada em vários métodos de conversão de resíduos urbanos e municipais em biometano e hidrogênio. A Digestão Anaeróbica surge como a tecnologia mais discutida, representando 64% das menções, sublinhando seu papel dominante na pesquisa atual. Em contraste, a Eletrólise é destacada em 14% das discussões, enquanto a Fermentação Escura, as Células a Combustível Microbianas e a Digestão Anaeróbica Seca cada uma ocupam 7%, refletindo suas posições emergentes, porém menos proeminentes, no campo.

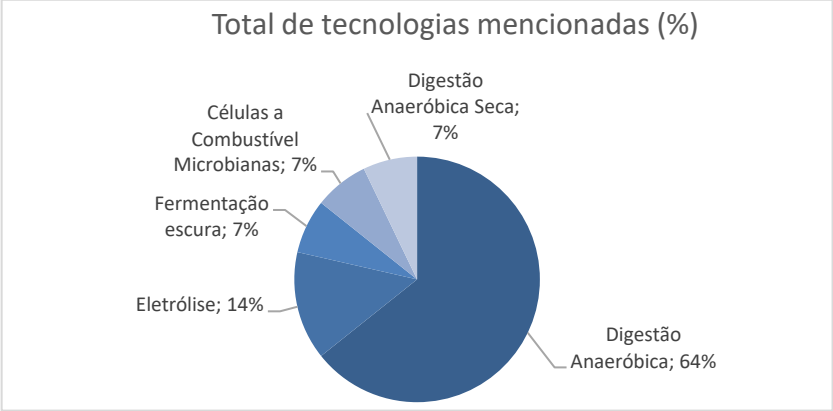



Figura 13 - Total de tecnologias mencionadas no PRISMA

Fonte: Criado pelo Autor.

Ainda considerando os estudos que compuseram a tabela PRISMA, foi elaborado o gráfico da Figura 13, que apresenta a frequência dos resíduos utilizados para a conversão de energia proposta nos respectivos estudos, onde os resíduos sólidos urbanos e o lodo aparecem em destaque como sendo os resíduos de maior frequência de utilização, representados por 36% e 21% respectivamente. O esterco e resíduo alimentar surgem com 14% cada e o resíduo industrial e esgoto com 7% cada.

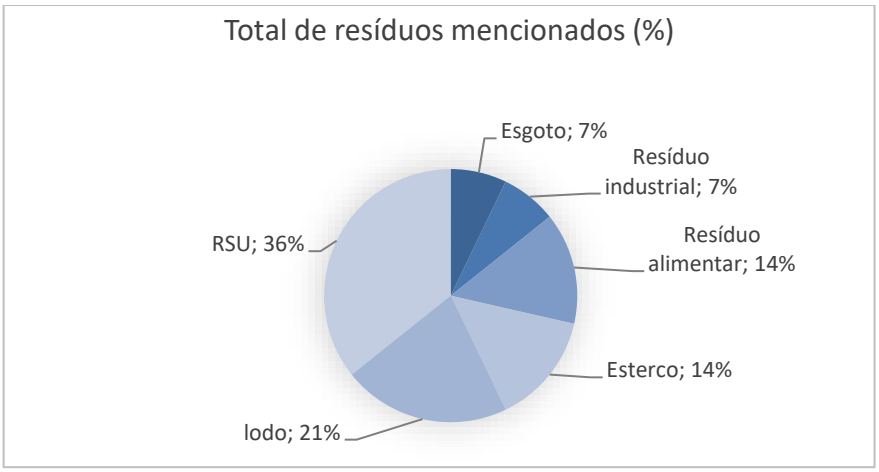



Figura 14 - Total de resíduos mencionadas no PRISMA

Fonte: Criado pelo Autor.

Com base nas tecnologias de conversão e os resíduos apresentadas nos gráficos das Figuras 13 e 14, além das informações da patentometria, o *roadmap* tecnológico das Figuras 15 e 16 a seguir foi elaborado, sintetizando os principais avanços e

perspectivas na produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos. Estruturado nos horizontes temporais de estágio atual, curto prazo e perspectivas futuras, ele organiza as tecnologias de conversão e seus desafios, alinhando-os aos objetivos estratégicos de descarbonização, economia circular e eficiência energética.

No estágio atual, as direções de pesquisa em andamento e os avanços tecnológicos já implementados são identificados, como a integração da digestão anaeróbica com fontes de energia renovável e a exploração da captura de carbono com eletrólise para produzir metano sintético, trazendo os estudos relevantes que evidenciam ações implementadas para a melhoria dessas tecnologias, oferecendo *insights* sobre estudos inovadores que moldam a compreensão e a evolução de cada tecnologia.

Segundo Borschiver (2016), para a elaboração do roadmap tecnológico, a maturidade das informações geradas a partir das buscas efetuadas podem ser divididas em quatro fases de tempo, sendo elas a etapa de estágio atual, que corresponde ao cenário cujas ações já estão sendo aplicadas, podendo ser encontradas em mídias especializadas e em artigos científicos. Etapa de curto e médio prazo, onde são mostrados os *players* que atuarão no mercado em breve, cuja informação é encontrada em patentes concedidas e solicitadas / pendentes, respectivamente. O último estágio de longo prazo, refere-se aos estudo científicos e as patentes revogadas / mortas que se encontram em um estágio aceitável de desenvolvimento tecnológico, por estarem em fase de estudo, ou terem caído em domínio público, no caso de patentes.

Para este estudo, devido a limitação de quantidade e dias de acesso ao *software* de análise de patentes Orbit Intelligence, as análises se restringiram aos gráficos extraídos da busca, assim como aos títulos das patentes, não sendo possível a leitura completa de cada patente para realizar a separação das patentes concedidas, solicitadas / pendentes e revogadas / mortas por tipo de tecnologia de conversão. Por esse motivo, o roadmap suprimiu as colunas temporais de médio e longo prazo, considerando a visão consolidada de perspectivas futuras, além de considerar apenas 2 camadas, referentes a tecnologias e produtos, não sendo considerada a terceira camada relacionada ao mercado.

Desta forma, no estágio atual considerou os estudos que trouxeram o estado atual dessas tecnologias. No curto prazo, o foco está nas patentes concedidas que trazem inovações com oportunidades de otimização de processos e ampliam a integração de sistemas inteligentes, como a eletro-oxidação e o uso de sensores para monitoramento em tempo real. Para as perspectivas futuras, foram consideradas as

patentes solicitadas / pendentes e patentes revogadas / mortas, que preveem a adoção de tecnologias disruptivas, como sistemas modulares de biogás e integração de *blockchain* para rastreabilidade, destacando os aprimoramentos tecnológicos esperados, as influências regulatórias e a escalabilidade do mercado.

Adicionalmente, foram consideradas as taxonomias Meso e Micro, representadas como camadas e subcamadas respectivamente, no contexto das tecnologias de conversão e produtos. A definição dessas taxonomias foi baseada nas informações organizadas a partir da tabela PRISMA, visando uma análise estruturada e hierarquizada. Segundo (Borschiver, 2016), no nível Meso, é realizada uma análise preliminar que requer a leitura dos resumos dos documentos coletados para extração das informações principais que definem o assunto de cada documento permitindo a criação de taxonomias que agrupam os documentos de forma temática, proporcionando uma visão geral organizada antes de avançar para uma análise mais detalhada. Já as subcamadas representam as taxonomias Micro fornecendo uma compreensão mais detalhada de cada grupo temático.

Para este estudo, foram consideradas as análises dos artigos que compuseram o PRISMA para a definição das camadas e subcamadas. Cada camada representa uma taxonomia Meso, enquanto as subcamadas correspondem às taxonomias Micro associadas, conforme Tabela 5:

| Meso | Nº Meso | Micro | Nº Micro |
|---|---|---|---|
| Tecnologias de conversão | 10 | Digestão Anaeróbica | 9 |
| | | Eletrólise | 2 |
| | | Fermentação Escura | 1 |
| | | Células a Combustível Microbianas | 1 |
| | | Digestão Anaeróbica Seca | 1 |
| Produtos | 10 | Resíduos sólidos urbanos | 5 |
| | | Lodo | 3 |
| | | Esterco | 2 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | Resíduo alimentar | 2 |
| | | Resíduo industrial | 1 |
| | | Esgoto | 1 |

Tabela 5 - Taxonomia e frequências da tabela PRISMA

Essa abordagem hierárquica facilita a categorização e o entendimento das informações, permitindo uma análise sistemática das tecnologias de conversão e seus respectivos produtos. Assim, o estudo não apenas organiza os dados de maneira eficiente, mas também promove uma compreensão detalhada de cada elemento relevante para a pesquisa.

Este *roadmap* também apresenta os principais *players* envolvidos nesse ecossistema tecnológico, cujas patentes apontam os caminhos para a superação das barreiras técnicas relacionadas a esse processo de conversão. Assim, ele se configura como um guia estratégico para pesquisadores, formuladores de políticas e investidores, visando à expansão sustentável da cadeia produtiva de biometano e hidrogênio de baixo carbono.

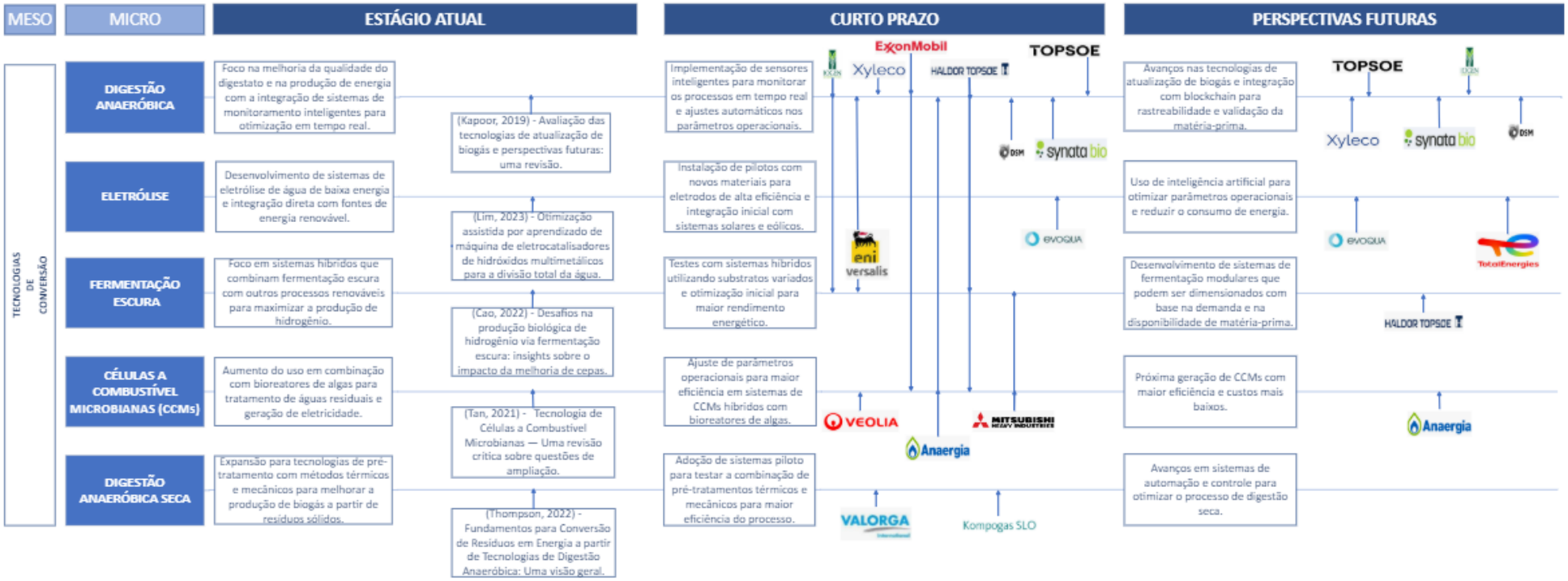



Figura 15 - Roadmap – Camada das tecnologias de conversão

Fonte: Criado pelo Autor

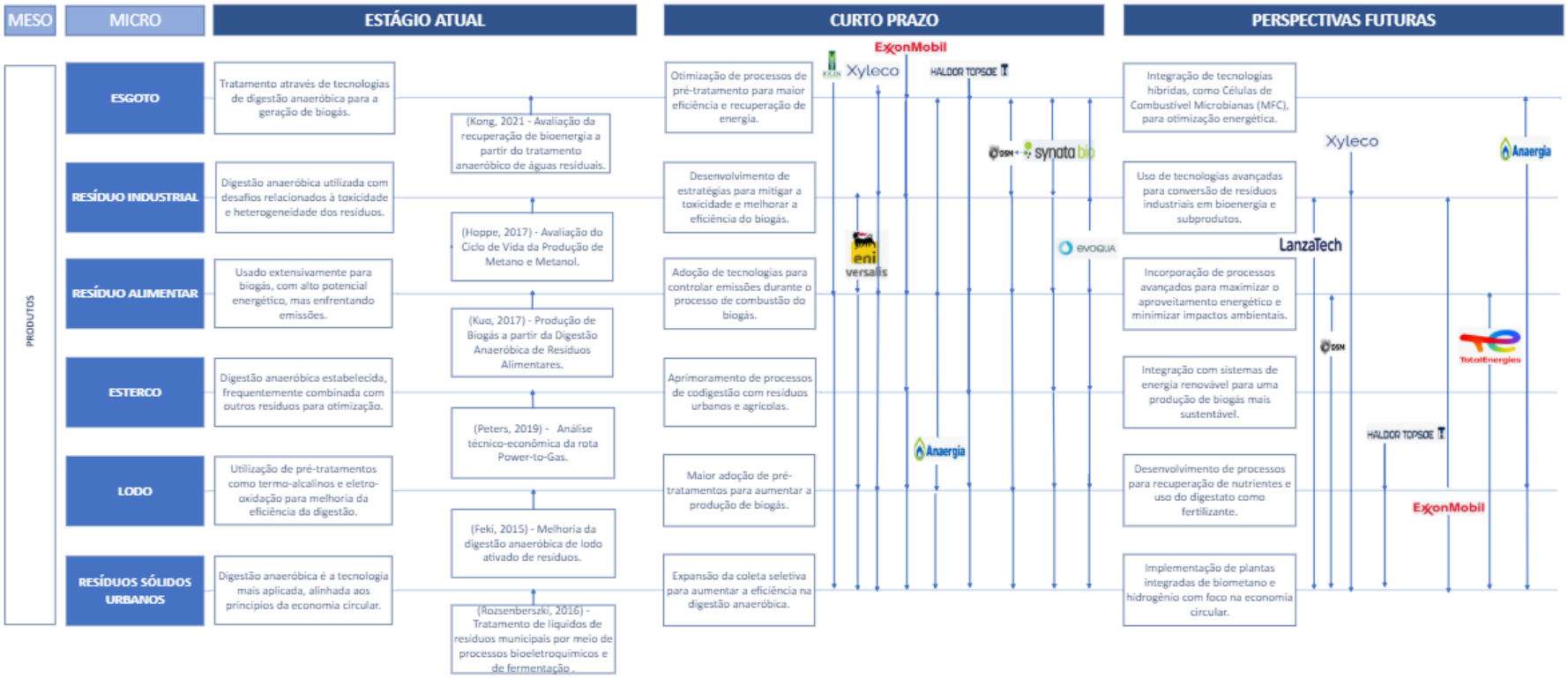



Figura 16 - Roadmap – Camada dos produtos

Fonte: Criado pelo Autor

Nos próximos anos, avanços significativos nessas tecnologias são esperados, impulsionados tanto por descobertas científicas quanto por mudanças nos cenários regulatórios. Esses desenvolvimentos provavelmente influenciarão a escalabilidade, eficiência e integração desses sistemas em estruturas mais amplas de gestão de resíduos e energia renovável. Ao explorar as tendências atuais, perspectivas e pesquisas fundamentais dentro de cada tecnologia, as partes interessadas podem se preparar melhor para as mudanças futuras, garantindo que investimentos e iniciativas estejam alinhados com a trajetória de evolução tecnológica e regulamentações políticas.

## 3.3 Avaliação estratégica

A avaliação estratégica das tecnologias de produção de biometano e hidrogênio é essencial para garantir sua implantação sustentável e eficaz. Foi realizada uma análise abrangente das considerações estratégicas necessárias para a integração dessas tecnologias nos sistemas de gestão de resíduos urbanos e municipais, avaliando as dimensões tecnológica, econômica, ambiental, social e de governança para identificar oportunidades e desafios que possam impactar a viabilidade e o sucesso a longo prazo dessas tecnologias. Com foco em alinhar a inovação com os objetivos de sustentabilidade, a avaliação estratégica busca informar formuladores de políticas, líderes da indústria e pesquisadores sobre os fatores críticos que impulsionam a adoção e otimização das tecnologias de biometano e hidrogênio, permitindo explorar seu potencial para contribuir com uma economia circular, reduzir emissões de gases de efeito estufa e promover a segurança energética, garantindo ao mesmo tempo equidade social e aceitação da comunidade.

### 3.3.1 Evolução tecnológica

A avaliação tecnológica foca em avaliar a maturidade e a escalabilidade das tecnologias atuais e emergentes. A digestão anaeróbica, por exemplo, continua sendo uma tecnologia fundamental devido à sua capacidade de converter eficientemente

resíduos orgânicos em biogás. Avanços recentes aumentaram a eficiência e o rendimento da produção de biogás, particularmente através da integração de sistemas de monitoramento inteligente e automação. Estudos indicam que o uso de sensores da Internet das Coisas (IoT) pode otimizar significativamente o processo de digestão anaeróbica, fornecendo dados em tempo real sobre os parâmetros operacionais, levando a um melhor desempenho e redução do tempo de inatividade (Swami, 2023).

A tecnologia de eletrólise, crucial para a produção de hidrogênio, tem visto avanços significativos com o desenvolvimento de novos materiais catalisadores que reduzem o consumo de energia e melhoram a eficiência. A integração da inteligência artificial (IA) na otimização de parâmetros operacionais mostra-se promissora para melhorar ainda mais a eficiência dos processos de eletrólise (Lim, 2023).

A fermentação escura, uma tecnologia emergente para a produção de biohidrogênio, está sendo cada vez mais explorada em sistemas híbridos que combinam múltiplos processos renováveis para maximizar a produção de hidrogênio. Uma das principais inovações nessa área é o desenvolvimento de sistemas de fermentação modulares. Esses sistemas podem ser dimensionados de acordo com a demanda e a disponibilidade de matéria-prima, tornando-os altamente adaptáveis e eficientes. A abordagem modular permite uma operação mais flexível, possibilitando o ajuste da capacidade de produção com base nas necessidades em tempo real, o que é crucial para integrar fontes de energia renovável que podem ter saídas variáveis (Fabrice Ndayisenga, 2021).

As Células a Combustível Microbianas oferecem o benefício duplo de tratamento de águas residuais e geração de eletricidade. Inovações recentes em materiais de eletrodos, como o uso de nanotubos de carbono, melhoraram a produção de energia e a relação custo-benefício das CCMs, tornando-as uma opção viável para a produção de energia renovável (Wang, 2022).

As tecnologias de digestão anaeróbica seca avançaram com a implementação de métodos de pré-tratamento, como processos térmicos e mecânicos, aumentando o rendimento do biogás a partir de resíduos sólidos. Espera-se que sistemas de automação e controle tornem os processos de digestão seca mais eficientes, aumentando sua adaptabilidade a várias correntes de resíduos (Thompson, 2022).

### 3.3.2 Dimensão econômica

A dimensão econômica no contexto do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, particularmente para a produção de biometano, enfatiza a importância de criar valor enquanto se garante que o crescimento econômico seja desvinculado da degradação ambiental. Esse desvinculamento é essencial para alcançar uma transição sustentável que apoie a prosperidade econômica sem aumentar as emissões de gases de efeito estufa ou o esgotamento dos recursos (PtX Hub Berlin, 2021).

Um exemplo prático desse conceito é a realidade das plantas de biometano em escala comercial, que já operam em diversos países, como Alemanha, Itália e Estados Unidos. Essas plantas são capazes de processar grandes volumes de resíduos orgânicos, transformando-os em energia renovável e, ao mesmo tempo, gerando valor econômico ao reduzir custos com gestão de resíduos e fornecimento de energia. Em países como a Alemanha, políticas de incentivo e subsídios permitiram a expansão significativa da infraestrutura de biometano, contribuindo para a independência energética e impulsionando a economia circular. Nos Estados Unidos, o crescimento de plantas comerciais está sendo incentivado por políticas fiscais que promovem o uso de biogás a partir de resíduos agrícolas e urbanos. Essas plantas demonstram que o crescimento econômico sustentável é viável, integrando tecnologias avançadas e otimizando processos em larga escala.

Em linha com essa abordagem, a integração de tecnologias avançadas, como sensores IoT em sistemas de digestão anaeróbica, é um exemplo de como a eficiência e o valor econômico podem ser aumentados simultaneamente. Esses sensores otimizam o processo de digestão, levando a uma melhor produção de energia e redução dos custos operacionais, contribuindo tanto para o crescimento econômico quanto para a sustentabilidade ambiental (Swami, 2023).

Portanto, a avaliação estratégica das tecnologias de biometano e hidrogênio deve incluir uma análise de seu impacto econômico, particularmente de como elas contribuem para o crescimento desvinculado. Isso envolve não apenas avaliar a eficiência atual e a escalabilidade dessas tecnologias, mas também compreender seu potencial de sustentabilidade a longo prazo em termos de viabilidade econômica e impacto ambiental (González-Delgado, 2023). Por exemplo, o uso de sensores IoT nos processos de digestão anaeróbica, como mencionado, pode otimizar o desempenho e

reduzir custos, alinhando-se com a dimensão econômica da sustentabilidade ao aumentar o valor agregado e promover o crescimento desvinculado.

### 3.3.3 Dimensão ambiental

As tecnologias de produção de biometano e hidrogênio contribuem significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e apoiam os objetivos de gestão de resíduos. Ao utilizar resíduos orgânicos como matéria-prima, essas tecnologias ajudam a mitigar as emissões de metano dos aterros sanitários e promovem a reciclagem de nutrientes de volta para o ecossistema. Pesquisas destacam o papel dessas tecnologias na realização de metas de neutralidade de carbono e na melhoria da sustentabilidade ambiental (Barakat, 2023).

Em escala comercial, plantas de biometano na Europa, como na Alemanha e na Itália, têm se destacado por sua capacidade de converter grandes volumes de resíduos em energia renovável, utilizando tecnologias avançadas de digestão anaeróbica. Essas plantas não apenas capturam metano, que seria liberado em aterros, como também produzem biogás de alta qualidade que pode ser convertido em biometano para uso como combustível. Além disso, os subprodutos, como o digestato, são usados como fertilizantes orgânicos, fechando o ciclo de reciclagem de nutrientes e promovendo a agricultura sustentável. O crescimento dessas plantas demonstra que a produção de biometano em larga escala é não apenas tecnicamente viável, mas também ecologicamente benéfica e economicamente atrativa.

Outro ponto relevante é a utilização de sensores IoT e outras tecnologias de automação nas plantas de biometano e hidrogênio, que otimizam o processo de digestão anaeróbica, aumentando a eficiência da produção e reduzindo os custos operacionais. Isso reforça a sustentabilidade econômica das plantas, enquanto maximiza a eficiência energética e minimiza o impacto ambiental. Assim, a produção de biometano e hidrogênio em escala comercial reflete um importante avanço no uso de tecnologias de energia limpa, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a preservação dos recursos naturais.

Os benefícios ambientais se estendem à redução da dependência de combustíveis fósseis e à minimização da pegada de carbono da produção de energia. Essas

tecnologias também facilitam a reciclagem de nutrientes e a conservação de recursos, contribuindo para a preservação da biodiversidade e a redução da poluição.

### 3.3.4 Dimensão social

Socialmente, a implementação de tecnologias de biometano e hidrogênio pode levar à criação de empregos, ao desenvolvimento de habilidades e à melhoria do acesso à energia, especialmente em áreas carentes. A avaliação estratégica deve considerar a aceitação social dessas tecnologias e seu impacto na saúde e segurança pública, além dos impactos econômicos e ambientais. Garantir que as comunidades se beneficiem da implantação de tecnologias de energia renovável é crucial para alcançar a equidade social e promover o apoio da comunidade.

Por exemplo, projetos focados no acesso à energia limpa têm mostrado que envolver as comunidades locais no processo de tomada de decisões e garantir que elas se beneficiem dessas tecnologias pode aumentar significativamente o apoio público e melhorar a saúde e segurança públicas em geral.

Na Virgínia, por exemplo, projetos voltados para a melhoria do acesso à energia em lares de baixa renda por meio da eletrificação levaram a reduções substanciais nos custos de energia e nas emissões de gases de efeito estufa. Essas iniciativas demonstram como as tecnologias de energia renovável, quando implementadas corretamente, podem contribuir para a equidade social e promover o apoio da comunidade (Energy News Network, 2021).

Estudos recentes sugerem que a implantação bem-sucedida dessas tecnologias pode melhorar a segurança energética e fornecer fontes de energia confiáveis para comunidades remotas e rurais, contribuindo assim para o desenvolvimento regional e a resiliência (OCED, 2024).

### 3.3.5 Dimensão de governança

A governança eficaz é essencial para a implementação bem-sucedida das tecnologias de biometano e hidrogênio. Isso envolve o estabelecimento de estruturas regulatórias claras e medidas políticas que apoiem a implantação das tecnologias, garantindo, ao mesmo tempo, a proteção ambiental e a segurança pública. A cooperação internacional e as parcerias são vitais para fomentar a inovação e facilitar a transferência de tecnologia entre fronteiras. O quadro de governança também deve abordar os padrões de qualidade e segurança, especialmente para a injeção de biometano nas redes de gás natural e o uso do digestato como fertilizante. Pesquisas ressaltam a importância de alinhar as medidas políticas com os compromissos climáticos internacionais para garantir a sustentabilidade a longo prazo dessas tecnologias (Guerra-Mota, 2024).

A avaliação estratégica das tecnologias de produção de biometano e hidrogênio a partir de resíduos urbanos e municipais envolve uma avaliação abrangente de seu potencial impacto nas dimensões econômica, ambiental, social e de governança. Ao abordar essas áreas, as partes interessadas podem desenvolver estratégias que maximizem os benefícios e mitiguem os riscos associados à transição para fontes de energia renováveis derivadas de resíduos, contribuindo, em última análise, para um futuro energético mais sustentável e resiliente.

## 3.4 Contribuição científica

Este trabalho apresenta uma contribuição significativa para a comunidade científica ao propor uma abordagem inovadora que combina a Revisão Sistemática da literatura por intermédio do método PRISMA, associada à análise bibliométrica, assim como a análise de patentes e *roadmap* tecnológico. Essa integração metodológica permite não apenas uma compreensão profunda do estado da arte das tecnologias de produção de biometano e hidrogênio, mas também a identificação de lacunas e oportunidades estratégicas para avanços tecnológicos e regulações sustentáveis.

### 3.4.1 Inovação metodológica

A principal contribuição inovadora deste estudo está na sinergia estabelecida entre a análise PRISMA, que proporcionou a identificação sistemática de literatura acadêmica relevante, permitindo o mapeamento de tendências e temas emergentes nas tecnologias de biometano e hidrogênio, alinhado às dimensões EESG (Ambiental, Social, Econômica e de Governança), a análise de patentes, que explorou o potencial inovador com foco em tecnologias de conversão de resíduos sólidos urbanos e municipais em biogás e hidrogênio, com o uso do *software* Orbit Intellingence da Questel e o *roadmap* tecnológico, no qual foi demonstrado o plano estratégico para a implementação e evolução das tecnologias de conversão.

A integração dessas abordagens proporciona uma visão holística que vai além da análise tradicional de cada componente isolado, criando um subsídio robusto para avanços científicos e tecnológicos no campo da sustentabilidade e transição energética.

### 3.4.2 Impactos na comunidade científica

O estudo revelou lacunas no desenvolvimento de tecnologias que considerem simultaneamente os aspectos técnicos e regulatórios. A integração da análise PRISMA com as dimensões EESG identificou áreas críticas ainda não exploradas, como:

- Impactos na biodiversidade e nos recursos hídricos;
- Governança em nível global para padronização e certificação;
- Aceitação social e implicações socioeconômicas em regiões periféricas.

Ao propor um *roadmap* tecnológico que aborda o contexto atual e a visão futura das tecnologias, este trabalho oferece um guia para alavancar a produção de biometano e hidrogênio de maneira mais eficaz e alinhada às políticas públicas globais de descarbonização e economia circular.

A análise de patentes contribui para o avanço tecnológico ao mapear as principais tendências tecnológicas, identificando os principais atores e instituições inovadoras e fornecendo *insights* sobre colaborações internacionais potenciais.

### 3.4.3 Relevância estratégica

A metodologia proposta não se limita ao contexto do biometano e hidrogênio, podendo ser adaptada a outros setores tecnológicos, como energia renovável, hidrogênio verde e gestão de resíduos. Isso amplia o impacto do trabalho, estabelecendo um modelo replicável para outras áreas de pesquisa.

Com a integração inovadora de metodologias, este estudo representa um marco para o campo de pesquisa em gestão de resíduos urbanos e sustentabilidade. Espera-se que os resultados inspirem futuros trabalhos e avanços em tecnologia limpa, além de promover uma maior colaboração entre o universo acadêmico, industrial e formuladores de políticas.

# Considerações finais

Em resumo, a produção integrada de biometano e hidrogênio a partir de RSU, considerando dimensões ambientais, sociais, econômicas e de governança à revisão sistemática da literatura (PRISMA) e à análise bibliométrica de patentes, resultou no desenvolvimento de um *roadmap* tecnológico para a gestão sustentável de resíduos urbanos, abordando lacunas e propondo soluções inovadoras e alinhadas com os compromissos climáticos globais.

O resultado da análise PRISMA aplicada aos dez artigos selecionados, destacou a digestão anaeróbica como sendo a tecnologia predominante para a conversão de resíduos em biometano e hidrogênio. Este processo se mostrou eficiente na redução de emissões de gases de efeito estufa, na valorização energética de resíduos sólidos urbanos e na produção de subprodutos úteis como o digestato. Entretanto, lacunas relacionadas ao impacto em ecossistemas e à gestão de biodiversidade foram evidenciadas, indicando oportunidades de futuras investigações.

A análise das dimensões EESG, os resultados revelaram uma forte redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a promoção da economia circular, embora ainda existam limitações na análise de impactos indiretos na água e no solo. Também foram identificados benefícios sociais como a geração de empregos e a melhoria do acesso à energia renovável, especialmente em regiões periféricas. No âmbito econômico, a viabilidade da conversão de resíduos em biometano e hidrogênio de baixo carbono foi demonstrada, porém, ainda existem desafios que persistem devido à ausência de padrões globais e à baixa transferência tecnológica. No que se refere à governança, observou-se que os artigos apresentaram pouca abordagem aos temas relacionados a normas, certificações e estabilidade política, o que reflete a necessidade de políticas integradas e incentivos regulatórios.

A análise bibliométrica revelou um aumento significativo de registros de patentes relacionadas à produção de biometano e hidrogênio nos últimos 20 anos, concentrando-se principalmente em tecnologias de digestão anaeróbica e sistemas associados ao tratamento de resíduos.

Os mapas de coautoria e coocorrência indicaram a Alemanha e a China como principais polos tecnológicos, demonstrando o potencial de colaborações

internacionais. Apesar disso, observou-se uma lacuna na comercialização global dessas tecnologias e na integração entre países em desenvolvimento e desenvolvidos.

A integração do framework EESG ao PRISMA e à análise de patentes culminou na elaboração de um *roadmap* estratégico. Este *roadmap* propõe trajetórias para a implementação de tecnologias de biometano e hidrogênio de baixo carbono que priorizam os avanços em digestão anaeróbica e processos bioeletroquímicos, incentivos regulatórios e econômicos para aumentar a atratividade da produção de biometano e a criação de padrões globais de certificação e governança para harmonizar esforços internacionais. Como resultado dessa integração, o *roadmap* destaca a necessidade de alinhamento entre políticas públicas e inovação tecnológica, considerando as dimensões EESG como pilares fundamentais para a sustentabilidade. Esta abordagem promove não apenas a viabilidade técnica e econômica, mas também a aceitação social e a governança eficiente, maximizando o impacto positivo das tecnologias de biometano e hidrogênio no contexto urbano.

Esse estudo contribui para a transição energética, transição ecológica e bioeconomia do Brasil ao fornecer uma análise abrangente e integrada das tecnologias de biometano e hidrogênio de baixo carbono, identificando desafios e oportunidades. O *roadmap* tecnológico desenvolvido serve como uma base sólida para a evolução sustentável dessas tecnologias, incentivando a adoção de políticas públicas alinhadas com compromissos climáticos e promovendo o avanço em pesquisas futuras. Assim, espera-se que este estudo auxilie na transição energética e no desenvolvimento de soluções escaláveis para a gestão de resíduos urbanos, consolidando o papel do biometano e hidrogênio de baixo carbono como vetores estratégicos na economia de baixo carbono.

.

# Referências


Albuquerque, M. S.-B. (2024, 09 14). Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. *Methane, 3*(3), pp. 500-532. doi:doi.org/10.3390/methane3030029

Almansa, X. F. (2023). Anaerobic Digestion as a Core Technology in Addressing the Global Sanitation Crisis: Challenges and Opportunities. *Environmen-tal Science and Technology, 57*(48), pp. 19078–19087. doi: https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05291

Antukh, T. L. (2022). Hydrogenotrophs-Based Biological Biogas Upgrading Technologies. *In Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 10*. doi:https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.833482

ANU Institute for Climate, Energy & Disaster Solutions. (2024, 05 08). *iceds.anu.edu.au*. Retrieved 08 02, 2024, from iceds.anu.edu.au: https://iceds.anu.edu.au/news-events/events/australia-china-decarbonisation-roundtable-0)

Barakat, N. A.-S. (2023). Synergistic advancements in sewage-driven microbial fuel cells: novel carbon nanotube cathodes and biomass-derived anode for efficient renewable energy generation and wastewater treatment. *Frontiers in Chemistry, 11*. doi: https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1286572

Borschiver, S. S. (2016). *Technology Roadmap: Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia.* Rio de Janeiro: Interciência.

Brasil. (2023, 09 18). *Projeto de lei 4516/23.* Retrieved 11 23, 2024, from Camara dos Deputados: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2343636&filename=Avulso+PL+4516%2F2023

Cao, Y. L. (2022). Debottlenecking the biological hydrogen production pathway of dark fermentation: insight into the impact of strain improvement. *In Microbial Cell Factories*. doi:https://doi.org/10.1186/s12934-022-01893-3

de Melo, C. A. (2021). Renewable energy technologies: patent counts and considerations for energy and climate policy in Brazil. *Climate and Development, 13*(7), pp. 630–643. doi:https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1848778

di Profio, P. C. (2023). Emerging green strategies for biogas upgrading through CO2 capture: From unconventional organic solvents to clathrate and semi-clathrate hydrates. *Journal of Molecular Liquids, 391*, pp. 123-196. doi:https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2023.123196

Elsamadony, M. &. (2015). Dry anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal waste with paperboard mill sludge and gelatin solid waste for enhancement of hydrogen production. *Bioresource Technology*, pp. 157–165. doi:https://doi.org/10.1016/j.bioterch.2015.05.017

Energy News Network. (2021, 08 30). *Energy News Network*. Retrieved 08 14, 2024, from Energy News Network: https://energynews.us/2021/08/30/virginia-project-shows-benefits-costs-of-ditching-fossil-fuels-in-low-income-homes/

Ennouri, H. M. (2016). Effect of thermal pretreatment on the biogas production and microbial communities balance during anaerobic digestion of urban and industrial waste activated sludge. *Bioresource Technology*, pp. 184–191. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.076

Fabrice Ndayisenga, Z. Y. (2021). Renewable and Sustainable Energy Reviews. doi:DOI:10.1016/j.rser.2021.111078

Feki, E. K. (2015). Improvement of anaerobic digestion of waste-activated sludge by using H2O2 oxidation, electrolysis, electro-oxidation and thermo-alkaline pretreatments. *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 14717–14726. . doi:https://doi.org/10.1007/s11356-015-4677-2

Francisco López, A. L. (2024). From Biogas to Biomethane: An In-Depth Review of Upgrading Technologies That Enhance Sustainability and Reduce Greenhouse Gas Emissions. *In Applied Sciences, 14*(6). doi:https://doi.org/10.3390/app14062342



Francisco López, A. L. (2024). From Biogas to Biomethane: An In-Depth Review of Upgrading Technologies That Enhance Sustainability and Reduce Greenhouse Gas Emissions. *In Applied Sciences, 14*(6). doi:https://doi.org/10.3390/app14062342

Geissdoerfer, M. S. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? . *Journal of Cleaner Production, 143*, pp. 757–768. doi:https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048

Global hydrogen review. (2023, 12 05). *Hydrogen innovation reaches high point with record patent filings for production and storage*. Retrieved from Global hydrogen review: / https://www.globalhydrogenreview.com/hydrogen/05122023/hydrogen-innovation-reaches-high-point-with-record-patent-filings-for-production-and-storage/

González-Delgado, Á. D.-M.-G. (2023). (2023). Economic Evaluation and Technoeconomic Resilience Analysis of Two Routes for Hydrogen Production via Indirect Gasification in North Colombia. *Sustainability, 15*(23), p. 16371. doi:https://doi.org/10.3390/su152316371

Gonzalez-Salazar, M. A. (2016). Development of a technology roadmap for bioenergy exploitation including biofuels, waste-to-energy and power generation & CHP. *Applied Energy*, pp. 338–352. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.120

Guerra-Mota, M. A. (2024). Getting biomethane out of the shadow: a framework analysis in Portugal and Brazil. *Environ Dev Sustain*. doi:https://doi.org/10.1007/s10668-024-05182-4

Habeeb, O. A. (2018). Hydrogen sulfide emission sources, regulations, and removal techniques: A review. *Reviews in Chemical Engineering, 34*(6), pp. 837–854. doi:https://doi.org/10.1515/revce-2017-0

Ieabioenergy. (2021). *Implementation of bioenergy in Italy.* Retrieved 08 02, 2024, from https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_Italy_final

Japan Patent Office. (2011). *Introduction to Patent Map Analysis.*

Jaramillo, A. M. (2023). The structure of segregation in co-authorship networks and its impact on scientific production. *EPJ Data Science, 12*, p. 1. doi:https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-023-00411-8

Kapoor, R. G. (2019). Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. *In Environmental Science and Pollution Research, 26*(12), pp. 11631–11661. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-019-04767-1

Kar, S. K. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead. *In International Journal of Hydrogen Energy, 47*, pp. 10803–10824). doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137

Kong, Z. L. (2021). Evaluation of bio-energy recovery from the anaerobic treatment of municipal wastewater by a pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) at ambient temperature. *Bioresource Technology*, p. 339. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125551

Kunwar, S. P. (2024). A concise review on wastewater treatment through microbial fuel cell: sustainable and holistic approach. *31*, pp. 6723–6737. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-023-31696-x

Li, Y. A. (2019). Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks. *Environmental Science and Technology*. doi:https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03003

Liang, Y. W. (2023). Advances in Chemical Conditioning of Residual Activated Sludge in China. . *In Water, 15*(2). doi:https://doi.org/10.3390/w15020345

Lim, C. Y. (2023). Machine learning-assisted optimization of multi-metal hydroxide electrocatalysts for overall water splitting. *Materials Horizons, 10*(11).

Lu, L. &. (2016). Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: A state of the art review. *In Bioresource Technology, 215*, pp. 254–264. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.034

Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. (2023, 08 12). *most.gov.cn*. Retrieved 08 02, 2024, from most.gov.cn: most.gov.cn

Mutegoa, E. &. (2023). Approaches to mitigation of hydrogen sulfide during anaerobic digestion process – A review. . *Heliyon, 9*(9), p. 19768.8. doi: https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E1976

Nadaleti, W. M. (2021, 05 25). A pioneering study of biomethane and hydrogen production from the wine industry in Brazil: Pollutant emissions, electricity generation and urban bus fleet supply. *International Journal of Hydrogen Energy, 46*(36), pp. 19180-19201. doi:doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.044

Noussan, M. R. (2021, 01 01). The role of green and blue hydrogen in the energy transition - a technological and geopolitical perspective. *Sustainability, 13 (1)*, pp. 1-26. doi:10.3390/su13010298

OCED. (2024, 02 27). *OCED - Office of Clean Energy Demonstrations*. Retrieved 08 14, 2024, from govdelivery: https://content.govdelivery.com/accounts/USDOEOCED/bulletins/38d8be9

Pavičić, J. M. (2022). Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. *In Energies, 15*(8). doi:https://doi.org/10.3390/en15082940

Peters, R. B. (2019). A techno economic analysis of the power to gas route. *Journal of CO2 Utilization*, pp. 616–634. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.009

Peters, R., Baltruweit, M., Grube, T., Samsun, R. C., & Stolten, D. (2019). A techno economic analysis of the power to gas route. *Journal of CO2 Utilization, 34*, pp. 616-634. doi:10.1016/j.jcou.2019.07.009

Pizzi, S. C. (2020). Management research and the UN sustainable development goals (SDGs): A bibliometric investigation and systematic review. *Journal of Cleaner Production, 276*, p. 124033. doi:https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124033

PtX Hub Berlin. (2021). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.*

Questel. (2024, 08 02). *Questel*. Retrieved from Questel: https://www.questel.com/patent/ip-intelligence-software/orbit-intelligence/

R. C. Assunção, L. A. (2021). Technology roadmap of renewable natural gas: Identifying trends for research and development to improve biogas upgrading technology management. *Applied Energy*, p. 292. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.1168849

Ryckebosch, E. D. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *In Biomass and Bioenergy, 35*(5), pp. 1633–1645. doi:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033

Scarlat, N. D. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *In Renewable Energy, 129*, pp. 457–472. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006

Sun, S. J. (2019). Simultaneous removal of hydrogen sulfide and volatile organic sulfur compounds in off-gas mixture from a wastewater treatment plant using a two-stage bio-trickling filter system. *Frontiers of Environmental Science and Engineering, 13*(4). doi:https://doi.org/10.1007/s11783-019-1148-x

Swami, S. S. (2023). Integration of anaerobic digestion with artificial intelligence to optimise biogas plant operation. *In Environment, Development and Sustainability*. doi:https://doi.org/10.1007/s10668-023-04326-2

Tan, W. H. (2021). Microbial fuel cell technology—a critical review on scale-up issues. *In Processes, 9*(6). doi:https://doi.org/10.3390/pr9060985

Thompson, T. N. (2022). Fundamentals for Waste-to-Energy from Anaerobic Digestion Technologies: An Overview. *Handbook of Waste Biorefinery*, pp. 525-564. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-06562-0_19

Tiburcio, R. M. (2023, 12 23). Brazilian Biofuels Policy (RenovaBio): Overview and generation of decarbonization credits by biodiesel production facilities. *Energy for Sustainable Development, 77*, p. 101334. doi:doi.org/10.1016/j.esd.2023.101334

Tsegaye, D. &. (2022). Optimization of operating parameters for biogas production using two-phase bench-scale anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater: Focus on methanogenic step. *Bioresources and Bioprocessing, 9*(1). doi:https://doi.org/10.1

Wang, T. C. (2022). PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carb Neutrality, 1*. doi:https://doi.org/10.1007/s43979-022-00022-8

WIPO. (2024, 08 27). *Guide to the International Patent Classification.* Retrieved from www.wipo.int: https://www.wipo.int/classifications/ipc/

World Intellectual Property Organization. (2021). *WIPO Guide to Using Patent Information Disclaimer.*