



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MODELAGEM EM CIÊNCIA DA TERRA E DO AMBIENTE – PPGM
Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

Tese de doutorado

Avanços e Desafios para a Recuperação Energética de Biogás em Estações de Tratamento
de Esgoto Brasileiras

Apresentada por: Paula Marques Borges Vinhas Porto

Orientador: Washington de J. S. da Franca Rocha

Co-orientador: Rodrigo Nogueira Vasconcelos

Setembro de 2025

Paula Marques Borges Vinhas Porto

***Avanços e Desafios para a Recuperação Energética de Biogás em Estações de
tratamento de Esgoto Brasileiras***

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Curso de
Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente
da UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA,
como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em
Modelagem em Ciências Ambientais.

Área de conhecimento: Estudos Ambientais e Geotecnologias
Orientador: Dr. Washington de J. S. da Franca Rocha
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
Co-orientador: Dr. Rodrigo Nogueira Vasconcelos
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Feira de Santana, BA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

2025

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteadó - UEFS

Porto, Paula Marques Borges Vinhas
P882a Avanços e desafios para a recuperação energética de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto brasileiras / Paula Marques Borges Vinhas Porto. - 2025.
168f.: il.

Orientador: Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Coorientador: Rodrigo Nogueira de Vasconcelos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Feira de Santana.
Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, 2025.

1. Biogás. 2. Metano. 3. Bioenergia. 4. Esgoto. I. Rocha, Washington de Jesus Sant'Anna da Franca, orient. II. Vasconcelos, Rodrigo Nogueira de, coorient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente. IV. Título.

CDU: 662.767.2

Paula Marques Borges Vinhas Porto

*“Avanços e Desafios para a Recuperação Energética de Biogás em Estações de
tratamento de Esgoto Brasileiras”*

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente,
da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Orientador: Dr. Washington de J. S. da Franca Rocha

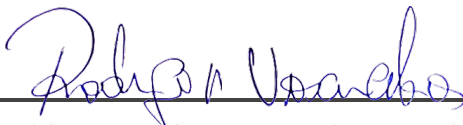
Área de conhecimento: Estudos Ambientais e Geotecnologias

Data da aprovação:

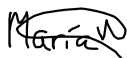
BANCA EXAMINADORA:



Dr. Washington de J. S. da Franca Rocha - Orientador
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS



Dr. Rodrigo Nogueira Vasconcelos - Coorientador
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS



Dra. María Molinos Senante
Universidad de Valladolid - UVA



Dr. João Paulo Just Peixoto
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA



Dra. Geovana Freitas Paim Rêgo
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS



Dra. Sabrina de Oliveira Anício
Universidade de São Paulo - USP

NOTA SOBRE O ESTILO DO PPGM-UEFS

Esta tese de doutorado foi elaborada considerando as normas de estilo propostas e aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente e estão disponíveis no formato eletrônico (<http://ppgm.uefs.br/teses>) ou no formato impresso para consulta.

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui foi resultado de esforços individuais e coletivos que me acompanharam ao longo desta jornada.

Ao meu refúgio nos momentos de angústia, dedico este trabalho. Senhor, obrigado por ser lâmpada para os meus pés e luz para o meu caminho, por me conceder força, sabedoria e proteção em cada etapa, guiando minhas escolhas e inspirando perseverança nos momentos de desafio.

Aos meus maiores amores na Terra, meus filhos Davi e Larissa, minha gratidão por cada demonstração de carinho e cuidado. Ao meu parceiro de vida, Mateus, meu amor, agradeço pela parceria, paciência e apoio constantes, especialmente nos períodos de intensa dedicação à pesquisa. Aos meus pais, irmãos, sogra, cunhada, sobrinhos e demais familiares, minha profunda gratidão pelo incentivo e por compartilharem comigo esta conquista de forma tão generosa.

Aos meus orientadores, Prof. Washington Rocha e Prof. Rodrigo Vasconcelos, agradeço pelo estímulo intelectual e pela confiança depositada em meu trabalho. Em especial, ao Prof. Washington, pela caminhada que iniciamos desde o mestrado, por me desafiar a sair da zona de conforto, me incentivar a ir além, e pelo constante esforço em proporcionar as condições necessárias para que eu pudesse desenvolver este trabalho. Agradeço por se importar comigo, pelos inúmeros conselhos e motivações, e por me olhar com consideração, como alguém que merece ser valorizado. Muito obrigada. Agradeço também ao Prof. Eduardo Cohim (UEFS) pela colaboração e por ampliar meu olhar sobre a temática. Aos professores Raul Muñoz e María Senante (ISP-UVA, Espanha), por me acolherem e proporcionarem uma experiência internacional enriquecedora, além de todas as trocas e contribuições valiosas. Registro igualmente minha gratidão a Sabrina Anício (USP) e Débora Leroy (ISP-UVA, Espanha) pelas contribuições e por compartilharem comigo o mesmo sentimento enquanto pesquisadoras de doutorado.

Agradeço a todo o corpo docente do PPGM pelas discussões, conselhos e pelo compartilhamento de conhecimento. Em especial, ao atual coordenador do programa, Prof. Willian Aguiar, pelo apoio, respeito e por abraçar a minha luta como se fosse sua. Agradeço também a Luana, secretária do programa, por auxiliar com tanta gentileza e presteza sempre que precisei.

Agradeço à Capes pela concessão da bolsa de pesquisa durante todo o período dos estudos, assim como pela bolsa para a experiência no exterior, fundamentais para a viabilização deste trabalho.

Às minhas professoras de espanhol, Luciene Soares e Leillane Mendes, minha eterna gratidão. Vocês acreditaram em mim mais do que eu mesma. Em especial, Luciene, dedicada, respeitosa, amorosa e exigente. Naquele período, eu precisava exatamente disso. Durante três meses, “me forçava” a estudar 17 horas por dia, e, com o volume de atividades e o rigor cobrado, não poderia ser diferente. Resultado, em curto período, ajudou-me a passar de iniciante a fluente em espanhol, inacreditável o que vivi ao seu lado. Recebi sua cobrança com amor, pois ela me deu forças para viver, com garra, a experiência internacional que tanto desejei.

Aos amigos que a Espanha me deu, Luis, Claudiana, Neto, Letícia, Bernardo e Marina, minha gratidão pelas experiências que vivemos juntos, por suavizarem a minha vida e a dos meus filhos e esposo, e por nos fazerem sentir sempre em casa e amados. Em especial, a Luis, por tanto: você foi pai, amigo e servo de Deus. Muito obrigada. À Comunidad Cristiana del Camino de Vida,

por nos acolherem e por tantas trocas vividas pautadas em Cristo. Em especial, a Glória: há marcas de Cristo em mim que nasceram de nossas conversas. Levarei você comigo para toda a vida.

Ao meu pastor e amigo Alex Cosmo, a quem recorri tantas vezes no período de preparação para a experiência na Espanha, agradeço pela escuta atenta e pelas orações, que me orientaram a seguir quando portas pareciam se fechar. Ao grupo de jejum e orações, em especial ao Pr. Eduardo Bergsten, por fortalecer a minha fé, vencemos juntos esta jornada. Às amigas Jamile, Larissa Nery, Cylene e Tayani, por estarem ao meu lado nos momentos de dúvida e ansiedade, oferecendo apoio, alegria e cumplicidade. Ao Ministério de Artes do Aprisco, por orarem por mim e proporcionarem momentos de descontração e inspiração, lembrando-me da importância da arte na vida.

Aos colegas da Turma I do doutorado, agradeço pela parceria, troca de experiências e incentivo durante esta caminhada.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta pesquisa se concretizasse, deixo minha sincera e profunda gratidão.

No mais, declaro que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Feira de Santana, BA, Brasil

Paula Marques Borges Vinhas Porto

05 de Setembro de 2025

RESUMO

O Brasil possui o maior parque de reatores anaeróbios UASB do mundo, com alto potencial para aproveitamento do biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), embora a maior parte ainda seja queimada, sem uso energético. O tema ganha relevância pelo potencial de mitigar emissões de gases de efeito estufa e reduzir custos operacionais via autoconsumo. O objetivo desta tese foi analisar, sob perspectivas históricas, tecnológicas e comparativas, os avanços e desafios da recuperação energética do biogás em ETEs brasileiras, estruturando-se em três artigos. O primeiro, baseado em revisão bibliométrica de 217 estudos, mapeou a evolução global do tema, destacando tendências como co-digestão, aproveitamento de metano dissolvido e uso de tecnologias emergentes, MBR. O Brasil se sobressai com a participação de centros de referência como a Universidade de São Paulo e a Universidade Federal de Minas Gerais. O principal fundo financiador é de origem chinesa, e o Brasil ocupa posições de destaque no ranking global, segunda, terceira e décima posição, por meio do CNPq, do MCTI e da CAPES. O segundo artigo investigou a transição sociotécnica brasileira pelo Modelo Multinível (MLP), revelando um cenário e regime fragmentados, em que São Paulo lidera com 32,4% dos depósitos de patentes de biocombustíveis, seguido por Paraná (15%) e Rio de Janeiro (13,2%), enquanto Norte e Nordeste permanecem com participação marginal. No saneamento, a região Norte recebeu pouco mais de 10% do montante investido no Sudeste, apresentando lacuna de infraestrutura 4,4 vezes maior que o investimento realizado; no Nordeste, essa relação é de 2,2 vezes. Neste artigo também foram identificadas três fases-chave da transição brasileira: (i) experimentação inicial (1970–1990), (ii) projetos-piloto impulsionados por regulamentações (2000–2010) e (iii) a fase atual de expansão (após 2013), caracterizada por incentivos políticos como o RenovaBio e a net metering. Atualmente o Brasil se encontra na fase “take-off”, com previsão para avançar para o próximo nível, “breakthrough”, até 2033 no cenário otimista ou 2043 no realista. O terceiro artigo comparou Brasil e Espanha: a Espanha adota modelo “top-down”, com 70% das plantas voltadas ao saneamento, enquanto o Brasil segue modelo “bottom-up”, com 73% no setor agropecuário e apenas 13% no saneamento. Casos como El Prat (Espanha) e Franca (Brasil) mostram que a integração entre tecnologia, políticas públicas e governança territorial é determinante para o sucesso. Conclui-se que consolidar o uso do biogás em ETEs é viável e estratégico, exigindo políticas integradas, incentivos econômicos e inovação.

Palavras-chave – Biogás, metano, bioenergia, esgoto.

ABSTRACT

Brazil has the largest park of UASB anaerobic reactors in the world, with high potential for biogas recovery in large-scale Wastewater Treatment Plants (WWTPs), although most of the biogas is still flared without energy use. The topic has gained relevance due to its potential to mitigate greenhouse gas emissions and reduce operational costs through self-consumption. This thesis aimed to analyze, from historical, technological, and comparative perspectives, the advances and challenges in biogas energy recovery in Brazilian WWTPs, structured around three articles. The first article, based on a bibliometric review of 217 studies, mapped the global evolution of the field, highlighting trends such as co-digestion, recovery of dissolved methane, and the use of emerging technologies such as MBR. Brazil stands out through reference centers such as the University of São Paulo (USP) and the Federal University of Minas Gerais (UFMG). The main funding source is Chinese, while Brazil occupies prominent positions in the global ranking—second, third, and tenth—through CNPq, MCTI, and CAPES. The second article examined the Brazilian socio-technical transition using the Multi-Level Perspective (MLP), revealing a fragmented scenario and regime, with São Paulo leading with 32.4% of biofuel patent deposits, followed by Paraná (15%) and Rio de Janeiro (13.2%), while the North and Northeast have marginal participation. In sanitation, the North received just over 10% of the Southeast's investment, with an infrastructure gap 4.4 times larger; in the Northeast, the gap is 2.2 times. Three key transition phases were identified: (i) initial experimentation (1970–1990), (ii) pilot projects driven by regulations (2000–2010), and (iii) the current expansion phase (after 2013), characterized by policies such as *RenovaBio* and net metering. Currently, Brazil is in the take-off phase, with projected advancement to the breakthrough stage by 2033 in an optimistic scenario or 2043 in a realistic one. The third article compared Brazil and Spain: Spain follows a “top-down” model, with 70% of plants focused on sanitation, while Brazil adopts a “bottom-up” model, with 73% in the agricultural sector and only 13% in sanitation. Cases such as El Prat (Spain) and Franca (Brazil) demonstrate that the integration of technology, public policies, and territorial governance is crucial for success. The thesis concludes that consolidating biogas use in WWTPs is feasible and strategic, requiring integrated policies, economic incentives, and innovation.

Keywords – Biogas, methane, bioenergy, wastewater.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Descrição da relação entre as questões de trabalho, as análises e as fontes de dados neste estudo.....	21
Tabela 2-2 Critérios para seleção e exclusão de documentos utilizados na revisão bibliométrica.	23
Tabela 2-3 Descrição das etapas, “strings” de busca e o número de documentos obtidos no processo de filtragem dos documentos usados na revisão bibliométrica.....	23
Tabela 2-4 Ranking de citações, títulos, ano de publicação, jornal, palavras-chave (se aplicável) e número de citações das 22 publicações mais citadas (entre as selecionadas para este estudo).....	33
Tabela 3-1 Quadro Analítico dos Níveis Sociotécnicos, Elementos Investigados e Fontes Documentais Utilizadas na Pesquisa.....	57
Tabela 4-1 Representatividade Relativa dos Setores na Produção de Biogás no Brasil e na Espanha.	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Fluxograma dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo	20
Figura 2-2 Número de publicações e número acumulado de publicações no período entre 1974 e 2020 na base de dados Scopus, com base nos artigos pesquisados na área de recuperação de energia do biogás obtido no tratamento de águas residuais domésticas.	25
Figura 2-3 Rede de coocorrência de palavras construída com os 217 artigos selecionados, elaborada a partir das palavras presentes nos títulos, resumos, palavras-chave e informações gerais dos dez principais recursos das cinco décadas de documentos publicados entre	28
Figura 2-4 Proporção de contribuição entre universidades, centros de pesquisa, órgãos governamentais e empresas para a pesquisa sobre recuperação de energia do biogás obtido no tratamento de águas residuais domésticas.....	30
Figura 2-5 Visão em escala planetária da colaboração coautoria para países creditados com pelo menos uma publicação sobre recuperação de energia do biogás obtido do tratamento de águas residuais domésticas entre 1974 e 2020.....	31
Figura 2-6 Redes de palavras-chave (citadas em títulos, resumos e pelos autores) construídas a cada dez anos representando a evolução das conexões estabelecidas e a riqueza de termos (com um mínimo de uma ocorrência por termo) na recuperação de energia do biogás	32
Figura 2-7 Número total de publicações e citações dos periódicos que estão entre as 22 publicações mais citadas (entre as selecionadas para este estudo).	38
Figura 2-8 Fluxo do foco na recuperação de energia em pesquisas sobre recuperação de energia do biogás no tratamento de esgoto doméstico em ETEs.....	39
Figura 3-1 Esquema metodológico para a caracterização da transição tecnológica (TT) na recuperação de biogás em ETEs no Brasil.....	57
Figura 3-2 Série histórica da dependência energética no Brasil (1970-2020).	60
Figura 3-3 Produção de biogás até 2020 por unidade em operação e volume produzido em Nm ³ /ano.....	66
Figura 3-4 Oferta de energia no Brasil por fonte geradora – Ano base 2023	72
Figura 3-5 Evolução da Transição Tecnológica (TT) do Biogás em ETEs no Brasil.....	75

Figura 3-6 Nível de evolução da transição tecnológica (TT) do biogás em ETEs brasileiras	76
Figura 4-1 Evolução da capacidade instalada em MW/ano em fontes de energia renováveis na Espanha. Dados numéricos públicos obtidos da plataforma de dados da Agência Internacional de Energia Renovável – ©IRENA (IRENA, 2024).	98
Figura 4-2 Evolução da capacidade instalada em MW/ano em fontes de energia renováveis no Brasil.	101
Figura 4-3 Potência elétrica acumulada (KW) de diferentes fontes de biogás na Espanha.	103
Figura 4-4 Capacidade instalada (milhão de Nm ³ /ano) de diferentes fontes de biogás no Brasil.	104
Figura 4-5 Estações de tratamento de águas residuárias urbanas (equivalente a 100.000 habitantes) em Espanha, com presença de fase de tratamento digestão anaeróbia (dados registados até 2022).	107
Figura 4-6 Produção de biogás até 2020 por unidade em operação e volume produzido em Nm ³ /ano.	111
Figura 4-7 Sistemas de Tratamento da ETE El Prat del Llobregat	114
Figura 4-8 Sistema de beneficiamento de biogás da ETE Franca.	116
Figura 4-9 Perspectiva multinível sobre transições	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás - Associação Brasileira de Biogás

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (BR)

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (BR)

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa (BR)

CBIOS - Créditos de Descarbonização

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (BR)

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais (BR)

DSEAR - Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización
(Plano Nacional de Tratamento, Saneamento, Eficiência, Economia e Reutilização) (ES)

EBA - European Biogas Association (UE)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (BR)

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

EU - União Europeia

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos (BR)

GNR- Gás Natural Renovável

GEE- Gases de Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (BR)

IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (ES)

INCT ETEs SUSTENTÁVEIS- Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações
Sustentáveis de Tratamento de Esgoto

IRENA - International Renewable Energy Agency

MBR - Membrane Bioreactor (Biorreator de Membranas)

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (BR)

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (ES)

MME - Ministério de Minas e Energia (BR)

PATEN - Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), estabelecido pela Lei nº 15.103/2025

PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia (ES)

PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico (BR)

PNE2030 - Plano Nacional de Energia 2030 (BR)

PROBIOGAS - Programa Nacional de Produção e Uso do Biogás

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (BR)

E- PRTR - Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia del Gobierno de España

PUREFA - Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (BR)

RCEs - Reduções Certificadas de Emissões

REE - Red Eléctrica de España

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (BR)

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná (BR)

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BR)

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente)

ÁGUA RESIDUÁRIA: Água proveniente de atividades domésticas, industriais ou agrícolas que contém poluentes e necessita de tratamento adequado antes de ser lançada no meio ambiente (Lettinga et al., 1980).

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: Método quantitativo de análise de produção científica, que utiliza indicadores como número de publicações, citações, redes de coautoria e coocorrência de termos para identificar padrões, tendências e relações em um campo de pesquisa (Waltman, L., Eck, N. J. V, Noyons, E. C, 2008).

BIOGÁS: Mistura de gases, principalmente metano e dióxido de carbono, produzida por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, que pode ser utilizada como fonte renovável de energia (Chernicharo et al., 2015).

BIOMETANO: Biogás purificado, com composição e qualidade equivalentes ao gás natural, adequado para uso como combustível veicular ou para injeção nas redes de distribuição de gás natural (COSTA, 2006).

BIOSSÓLIDO (lodo tratado e estabilizado): Material remanescente da digestão anaeróbia, rico em nutrientes, que pode ser utilizado como condicionador de solo (Sperling, 1996).

“BREAKTHROUGH”: Terceira fase da transição sociotécnica na qual mudanças estruturais significativas são impulsionadas por transformações socioculturais, econômicas e institucionais interligadas (Rotmans et al., 2001; Geels & Schot, 2007).

DIGESTÃO ANAERÓBIA: Processo biológico em que microrganismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio (Chernicharo, 1997).

ECONOMIA CIRCULAR: Modelo econômico que busca reduzir desperdícios, reutilizar materiais e otimizar o uso de recursos naturais, buscando o máximo aproveitamento em ciclos de vida mais longos (Arruda et al., 2021).

MAPAS BIBLIOMÉTRICOS: Representações visuais de dados bibliométricos, como redes de coautoria, coocorrência de palavras-chave ou citações, que facilitam a identificação de tendências e relações em um campo científico (Waltman, L., Eck, N. J. V, Noyons, E. C, 2008).

METANO (CH₄): Gás inflamável e principal componente do biogás e do gás natural, produzido pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica (Chernicharo et al., 2015).

MLP (MULTI-LEVEL PERSPECTIVE): Abordagem teórica para o estudo de transições sociotécnicas, que analisa as interações entre nichos tecnológicos, regimes sociotécnicos e a paisagem sociotécnica (Geels, 2017).

NICHO TECNOLÓGICO: Espaço protegido para o desenvolvimento e a experimentação de inovações (Rip A. & Kemp R., 1998).

ODS (OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL): Conjunto de 17 objetivos globais estabelecidos pela ONU para erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e promover prosperidade, vinculados a Agenda 2030.

PAISAGEM SOCIOTÉCNICA: Contexto amplo e estável que influencia regimes e nichos tecnológicos, incluindo fatores macroeconômicos, culturais, políticos e ambientais (Geels & Schot, 2007).

“PREDEVELOPMENT”: Primeira fase da transição sociotécnica em que o sistema permanece em equilíbrio dinâmico sem mudanças visíveis (Rotmans et al., 2001; Geels & Schot, 2007).

REDE DE COOCORRÊNCIA: Representação das relações entre palavras-chave ou termos em publicações científicas, com base na frequência com que aparecem juntos, utilizada para identificar áreas de pesquisa interligadas (Waltman, L., Eck, N. J. V, Noyons, E. C, 2008).

REDE ESPACIAL DE COAUTORIA: Representação geográfica das colaborações entre autores ou instituições em publicações científicas, evidenciando a distribuição espacial e a intensidade dessas parcerias (Waltman, L., Eck, N. J. V, Noyons, E. C, 2008).

REGIME SOCIOTÉCNICO: Conjunto de regras, práticas, tecnologias e estruturas estabelecidas que moldam e estabilizam sistemas sociotécnicos (Geels, 2004).

REVISÃO SISTEMÁTICA: Método de pesquisa que compila e avalia de forma rigorosa e transparente estudos relevantes sobre um tema específico, utilizando critérios predefinidos para seleção e análise (Liberati et al., 2015; Munn et al., 2018).

“STABILIZATION”: Quarta fase da transição sociotécnica, em que o novo sistema tecnológico se estabiliza e substitui o anterior como padrão dominante (Rotmans et al., 2001; Geels & Schot, 2007).

“TAKE-OFF”: Segunda fase da transição sociotécnica, quando o processo de transformação se inicia com alterações perceptíveis no sistema (Rotmans et al., 2001; Geels & Schot, 2007).

TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA (TT): Processo de mudança de longo prazo em sistemas sociotécnicos, envolvendo transformações tecnológicas, institucionais, culturais, econômicas e ambientais (Geels, 2002, 2011; Elzen et al., 2012; Jørgensen, 2012; Bergek et al., 2015; Reyes et al., 2020).

TRATAMENTO PRIMÁRIO/SECUNDÁRIO/TERCIÁRIO: Etapas sequenciais no tratamento de águas residuárias, cada uma com técnicas e objetivos específicos para remoção de poluentes (Sperling, 1996).

VOSVIEWER: Software utilizado para construção e visualização de mapas bibliométricos, incluindo redes de coautoria, coocorrência e citações sistema se consolida e atinge um novo equilíbrio com menor velocidade de mudança (Waltman, L., Eck, N. J. V, Noyons, E. C, 2008).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO	7
1.1. INTRODUÇÃO	7
1.2. OBJETIVOS	10
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i>	10
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	10
1.3. PUBLICAÇÕES	11
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	12
 CAPÍTULO 2: RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS EM ETE DOMÉSTICAS NAS ÚLTIMAS CINCO DÉCADAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. INTRODUÇÃO	16
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
2.2.1. <i>Fase 1- Estratégia de Pesquisa</i>	20
2.2.2. <i>Fase 2- Análise Bibliométrica</i>	24
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
2.3.1. <i>Microanálise</i>	32
2.4. CONCLUSÕES.....	39
 CAPÍTULO 3: RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL: UMA PERSPECTIVA MULTINÍVEL SOBRE A TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA.....	50
3.1. INTRODUÇÃO	50
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.2.1. <i>Caracterização da área de estudo</i>	54
3.2.2. <i>Métodos</i>	55
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
3.3.1. <i>Fase 1 - Energia Alternativa Urgente: Combatendo a Crise de Demanda no Brasil</i>	60
3.3.2. <i>Fase 2 - Biogás e a batalha climática: foco nas emissões e energia subutilizada</i>	61
3.3.3. <i>Fase 3 – Biogás 360°: potencial energético, sustentabilidade e valorização de subprodutos</i>	63
3.3.4. <i>Nível de Evolução da Transição Tecnológica do Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil</i>	76
3.4. IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS.....	77
3.5. CONCLUSÕES.....	78
 CAPÍTULO 4: TRANSIÇÕES SOCIOTÉCNICAS NO SANEAMENTO: A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL E NA ESPANHA	90
4.1. INTRODUÇÃO	91

4.2.	METODOLOGIA.....	93
4.2.1.	<i>Abordagem Geral</i>	93
4.2.2.	<i>Fontes de Dados</i>	95
4.2.3.	<i>Estrutura Analítica</i>	96
4.2.4.	<i>Procedimentos de Análise</i>	96
4.2.5.	<i>Limitações do Estudo</i>	96
4.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.3.1.	<i>Paisagem e Regime Sociotécnico</i>	97
4.3.2.	<i>Distribuição Regional e Tecnologias do Biogás</i>	102
4.3.3.	<i>O Papel das ETes na produção de biogás</i>	105
4.3.4.	<i>Casos de Sucesso</i>	112
4.3.5.	<i>Análise Cruzada</i>	117
4.4.	CONCLUSÃO	121
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES		ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
MATERIAL SUPLEMENTAR		ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional desordenado nas áreas urbanas tem exacerbado a pressão sobre os sistemas de infraestrutura, resultando na geração de grandes volumes de esgoto doméstico. Entende-se por esgoto, também denominadas águas residuárias ou efluente, os resíduos de origem residencial, comercial e industrial, provenientes de atividades como higiene pessoal, preparo de alimentos e necessidades fisiológicas (Lettinga et al., 1980).

Esse aumento populacional, somado à escassez de infraestrutura adequada, reflete-se diretamente nas condições de saneamento básico, que, por sua vez, impactam de forma significativa a gestão e o tratamento de esgoto.

O setor de saneamento no Brasil enfrenta grandes desafios, incluindo a universalização do acesso à água potável e aos serviços de coleta e tratamento de esgoto (ABiogás, 2021). Embora avanços tenham sido registrados ao longo das últimas décadas, dados indicam que uma parcela significativa da população ainda carece de acesso a esses serviços essenciais. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), aproximadamente 32,7 milhões (15,1%) de brasileiros ainda não têm acesso à água potável, e cerca de 100 milhões (44%) vivem sem acesso à coleta de esgoto (BRASIL, 2023). Essas lacunas são mais pronunciadas nas regiões Norte e Nordeste (de Souza et al., 2020), assim como em áreas periféricas e rurais, onde a falta de infraestrutura adequada compromete a qualidade de vida e a saúde pública (Brasil, 2024).

Nas áreas periféricas dos centros urbanos, a precariedade das redes de abastecimento e esgotamento sanitário reflete problemas estruturais históricos, incluindo a expansão urbana desordenada, a insuficiência de investimentos públicos e a ausência de políticas integradas de planejamento urbano e ambiental. Nessas localidades, o acúmulo de resíduos e a disposição inadequada de esgoto frequentemente resultam em contaminação de corpos hídricos, aumentando os riscos de doenças de veiculação hídrica tanto doenças virais (diarreia, hepatite e poliomielite), bacterianas (campilobacteriose, cólera, legionelose, leptospirose, *E. coli* patogênica e salmonelose como febre tifoide e paratifoide), assim como por protozoários, dentre as quais destaca-se a esquistossomose, doença endêmica diretamente relacionada à falta de saneamento básico em diversas regiões do país (Gomes; et al., 2020; Brasil, 2024).

Além disso, a urbanização acelerada, exerce pressão sobre os sistemas existentes, que muitas vezes operam acima de sua capacidade projetada. Isso é particularmente preocupante quando se considera o impacto ambiental das emissões de gases de efeito estufa provenientes de estações de tratamento ineficientes ou do lançamento de esgoto não tratado em corpos d'água (Chernicharo et al., 2015; Eijo-Río et al., 2015; Zhang et al., 2021).

Embora sejam concebidas principalmente para remover poluentes e proteger a saúde pública, as ETE também geram subprodutos do tratamento, como lodo, nutrientes, água tratada e biogás. Esses materiais, quando adequadamente processados, possuem valor de mercado e podem contribuir para reduzir custos operacionais ou mesmo subsidiar investimentos na expansão das redes de abastecimento e coleta.

Nesse contexto, a recuperação de recursos no setor de saneamento surge como uma estratégia promissora (Salomon & Silva Lora, 2009), ao passo que poderia não apenas reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), mas também contribuir significativamente para a geração de eletricidade, atingindo níveis de baixo carbono ou mesmo neutralidade de carbono (Aguilar-Benitez & Blanco, 2018; Lam & Van Der Hoek, 2020).

A reutilização de água tratada, a recuperação de nutrientes e o aproveitamento energético do biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) promovem sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, transformando resíduos em recursos (McCarty et al., 2011). Essas práticas ampliam fontes renováveis, reduzem emissões (Chernicharo et al., 2015; Eijo-Río et al., 2015; Zhang et al., 2021) e custos de disposição, além de gerar oportunidades econômicas, como créditos de carbono e receita, (Salomon & Silva Lora, 2009) impulsionando a universalização dos serviços básicos.

Entre os subprodutos do processo de tratamento do esgoto, o biogás se destaca pelo seu alto valor agregado, sendo uma fonte potencial para a geração de energia elétrica devido ao seu poder calorífico (Crone et al., 2016; Chrispim et al., 2021). Além disso, o biogás pode ser utilizado em outras aplicações, como combustível para veículos, produção de calor em processos industriais e, após sua purificação, como biometano injetado em redes de gás natural ou utilizado como matéria-prima para produção de hidrogênio (COSTA, 2006; Bhatia et al., 2020; Chrispim et al., 2021).

O biogás é amplamente utilizado como fonte de energia em escala global. Nos Estados Unidos, até 2011, 106 em ETEs utilizavam o biogás gerado no processo para produzir eletricidade e/ou energia térmica (McCarty et al., 2011). Na Dinamarca, foi implementado o programa “Beyond Energy Neutrality” com metas de cinco anos, destacando-se como um caso de sucesso a estação de

tratamento de Ejby Mølle, que alcançou a autossuficiência energética (Chrispim et al., 2021). Na Índia, mais de 2 milhões de unidades de biogás domésticas estão em operação, permitindo que mais de 200.000 famílias por ano substituam o uso de fogueiras tradicionais pelo biogás para cozinhar e aquecer (Bhatia et al., 2020). A Alemanha lidera com as maiores plantas de biogás do mundo, enquanto China e Japão se destacam por sua forte presença em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias no setor. Outros países apresentam menor atividade no cenário global, mas contribuem para a expansão do uso do biogás (Guimarães & Galvão, 2014).

Na Europa, a Espanha vem se destacando na valorização energética do biogás proveniente de estações de tratamento de esgoto, amparada por políticas públicas e instrumentos regulatórios que estimulam seu aproveitamento. O país apresenta unidades operacionais de recuperação de biogás distribuídas de forma geograficamente homogênea, sustentadas por legislação específica. A experiência espanhola foi utilizada como benchmark internacional na presente pesquisa, resultado da colaboração científica com o Instituto de Procesos Sostenibles da Universidad de Valladolid (ISP-UVA), o que possibilitou a análise detalhada de um caso de sucesso, integrando aspectos técnicos, regulatórios

O Brasil possui vastos recursos naturais e uma grande diversidade de biomassa com potencial energético (Paula et al., 2024). Além do biogás gerado em ETEs, destacam-se resíduos de origem agroindustrial, como vinhaça, palha e bagaço de cana-de-açúcar, resíduos sólidos urbanos e dejetos de animais (Pereira et al., 2023). O país também abriga o maior parque de reatores anaeróbios UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente) do mundo (Rietow et al., 2023). Esse tipo de reator promove o tratamento de esgoto por meio de processos biológicos anaeróbios, nos quais microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás como subproduto. A tecnologia UASB, além de apresentar baixo consumo energético e menor produção de lodo em comparação a sistemas aeróbios, possibilita a captura e o aproveitamento do biogás gerado, viabilizando sua conversão em eletricidade ou biometano (Chernicharo et al., 2015).

Esse cenário revela um expressivo potencial para ampliar a recuperação energética no saneamento brasileiro. Segundo a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), o setor de saneamento básico do Brasil poderia produzir cerca de 493 milhões Nm³ anuais de biogás ou 375 milhões Nm³ de biometano anualmente ou 1,18 milhão MWh de eletricidade seriam provenientes (ABiogás, 2021).

Nesse cenário, a recuperação de recursos provenientes do tratamento de esgoto, como o biogás, apresenta-se como uma oportunidade estratégica para alavancar melhorias no setor, tanto em termos econômicos quanto ambientais. No entanto, o reaproveitamento energético do biogás no Brasil ainda é incipiente, e a maior parte é simplesmente queimada, sem qualquer aproveitamento do seu potencial (Rosa et al., 2016; Cardoso & Borschiver, 2018; ABiogás, 2021).

Diante desse panorama, esta tese busca explorar os avanços e desafios relacionados à recuperação energética de biogás em ETEs brasileiras. Para tanto, propõe uma análise abrangente, que aborda aspectos históricos, tecnológicos e comparativos, além de discutir aplicações práticas e oportunidades para ampliar o aproveitamento desse recurso no contexto nacional. Esta tese busca responder à seguinte questão: quais fatores institucionais, tecnológicos e socioeconômicos influenciam as trajetórias de valorização do biogás em ETEs no Brasil? Hipotetiza-se que a consolidação do uso do biogás em ETEs brasileiras é viável e estratégica, mas depende fortemente da presença de políticas públicas estruturadas, incentivos econômicos, avanços tecnológicos e da articulação entre atores institucionais e privados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar os avanços e desafios na implementação da recuperação energética de biogás em ETEs brasileiras, considerando contextos históricos, tecnológicos, comparativos e aplicados.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Compreender a evolução do reaproveitamento energético do biogás a partir de águas residuárias domésticas ao longo das últimas cinco décadas, com base em tendências tecnológicas e científicas globais.
- Analisar a transição do sistema sociotécnico brasileiro no âmbito de reaproveitamento energético de biogás em ETE a partir de uma perspectiva multinível.
- Analisar as boas práticas espanholas e brasileiras na transição para o uso de biogás em ETEs.

1.3. PUBLICAÇÕES

A investigação sobre os avanços e desafios na implementação da recuperação energética de biogás em ETEs brasileiras é articulada por meio de três objetivos específicos, cada um representado por um artigo que aborda uma dimensão essencial do problema. Juntos, esses artigos constroem uma visão integrada e fundamentada, explorando aspectos históricos, tecnológicos, comparativos e aplicados.

Porto, P. M. B. V., de Oliveira Anício, S., Vasconcelos, R. N., Malheiros, T. F., & Rocha, W. de J. S. da F. (2023). Energy Recovery from Biogas in Domestic Waste Water Treatment Plant in the Last 5 Decades: A Bibliometric Analysis. *Journal of Scientometric Research*, 12(2), 343–356. <https://doi.org/10.5530/jscires.12.2.031>. Este primeiro artigo lança as bases históricas do estudo, analisando a evolução do reaproveitamento energético do biogás ao longo das últimas cinco décadas. Por meio de uma análise bibliométrica, ele revela as principais tendências tecnológicas e científicas relacionadas ao tema, destacando os avanços em processos anaeróbicos e o impacto na redução de emissões de gases de efeito estufa. Essa perspectiva fornece o contexto global para entender como o biogás passou de um subproduto negligenciado a um recurso estratégico, conectando diretamente ao objetivo de compreender a evolução histórica da recuperação energética.

Porto, P. M., Leroy-Freitas, D., Cohim, E., Vasconcelos, R., Franca-Rocha, W., Muñoz, R., & Molinos-Senante, M. (2025). Biogas energy recovery in brazilian wastewater treatment plants: A multi-level perspective on technological transition. *Energy Reports*, 13, 4691-4704. Este artigo amplia o escopo da análise ao investigar, por meio da abordagem multinível (MLP), como a transição tecnológica ocorre no Brasil. Ele mapeia as mudanças sociotécnicas, desde a crise energética dos anos 1970 até os avanços mais recentes, destacando os desafios e oportunidades enfrentados no contexto brasileiro. Essa análise complementa o primeiro artigo ao posicionar o Brasil dentro do cenário global, destacando particularidades e avanços locais no uso do biogás. O estudo identifica três fases-chave da transição: (i) experimentação inicial (décadas de 1970 a 1990), (ii) projetos-piloto impulsionados por regulamentações (décadas de 2000 a 2010) e (iii) fase atual de expansão (pós-2013), caracterizada por incentivos políticos como o RenovaBio e o sistema de compensação de energia (net metering). A originalidade do estudo reside na avaliação sistemática da transição tecnológica (TT) do biogás nas ETEs brasileiras, oferecendo insights empíricos sobre seu atual estágio de “take-off” e uma linha do tempo que indica que, em um cenário otimista, o país poderia atingir a fase de aceleração até 2033; em um cenário mais realista, até 2043.

Artigo 3: "Transições Sociotécnicas no Saneamento: A Recuperação Energética do Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil e na Espanha" (Preparando para submissão)

Este estudo compara a recuperação energética do biogás em estações de tratamento de esgoto no Brasil e na Espanha, evidenciando trajetórias distintas entre os países. Enquanto a Espanha avança com uma abordagem “top-down”, baseada em políticas públicas estruturadas e metas claras, o Brasil segue uma dinâmica “bottom-up”, com iniciativas descentralizadas e projetos-piloto em nichos locais. A distribuição do biogás na Espanha é mais homogênea e integrada, apoiada por legislação específica, ao passo que no Brasil há maior fragmentação regional e foco em contextos rurais. Casos de sucesso em ambos os países demonstram que a integração entre tecnologia, políticas públicas e governança local é fundamental. Para o avanço da recuperação energética, são necessárias articulação interinstitucional, alianças entre atores diversos e políticas públicas consistentes, além de maior valorização do biometano. Trabalhos futuros devem focar no mapeamento das ETEs e na análise das redes de inovação e parcerias público-privadas.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

A presente investigação, dedicada a analisar os avanços e desafios na implementação da recuperação energética do biogás em ETEs brasileiras, está estruturada em torno de três objetivos específicos, cada um materializado em um artigo que explora uma dimensão essencial do tema. Em conjunto, esses artigos compõem uma visão integrada e fundamentada, abrangendo aspectos históricos, tecnológicos, comparativos e aplicados.

O Capítulo 1 apresenta a tese, trazendo a contextualização do problema, o objetivo geral, os objetivos específicos, a relação das publicações e a descrição da estrutura do trabalho. Os três capítulos seguintes correspondem, cada um, a um artigo que responde a um dos objetivos específicos. O Capítulo 2 é constituído pelo primeiro artigo, que contextualiza o tema sob uma perspectiva histórica. Na sequência, o Capítulo 3 compõem-se pelo segundo artigo, dedicado à análise das transições tecnológicas no Brasil. E então o terceiro artigo é apresentado no Capítulo 4, o qual discute lições de um modelo internacional em rápida expansão, estabelecendo comparações com o cenário brasileiro. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e as perspectivas para pesquisas futuras.

Referências:

ABiogás. (2021). Nota técnica - Potencial de produção de biogás a partir do tratamento de esgoto. 33.

Aguilar-Benitez, I., & Blanco, P. A. (2018). Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, 9(2), 86–111. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>.

Erick Hungaro Arruda, Rosângela Andrade Pita Brancalhão Melatto, Wilson Levy, Diego de Melo Conti, *Circular economy: A brief literature review (2015–2020)*, *Sustainable Operations and Computers*, Volume 2, 2021, 79-86, ISSN 2666-4127, <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>.

Bhatia, R. K., Ramadoss, G., Jain, A. K., Dhiman, R. K., Bhatia, S. K., & Bhatt, A. K. (2020). Conversion of Waste Biomass into Gaseous Fuel: Present Status and Challenges in India. *Bioenergy Research*, 13(4), 1046–1068. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10137-4>

Brasil. (2024). Brasil registra grande número de doenças relacionadas à água sem tratamento. Assembleia Legislativa Do Estado Do Piauí. <https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/brasil-registra-grande-numero-de-doencas-relacionadas-a-agua-sem-tratamento>

BRASIL. (2023). Diagnóstico Temático: Visão Geral do Saneamento no Brasil 2023. https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf

Cardoso, F., & Borschiver, S. (2018). Roadmap Tecnológico da Biometanização da Palha. 1596–1611.

Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. Vol. 5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>

Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72(May), 103033. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103033>

COSTA, D. F. DA. (2006). GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DO TRATAMENTO DE ESGOTO. In MSc work – Program of Post-Graduation in Energy. University of São Paulo, São Paulo (pp. 1–176).

Crone, B. C., Garland, J. L., Sorial, G. A., & Vane, L. M. (2016). Significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: A review. *Water Research*, 104, 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.019>

de Souza, H. P., de Oliveira, W. T. G. H., dos Santos, J. P. C., Toledo, J. P., Ferreira, I. P. S., de Sousa Esashika, S. N. G., de Lima, T. F. P., & de Sousa Delácio, A. (2020). Infectious and parasitic diseases in Brazil, 2010 to 2017: Considerations for surveillance. *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health*, 44, 1–7. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2020.10>

Eijo-Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M. E., Marin, D., Amores, M. J., Aldea, X., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2015). Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 2084–2094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>

Gomes, F. M. da S., Maria Cristina Carvalho do Espírito Santo, Ronaldo César Borges Gryschek, Maria Rita Bertolozzi, & Francisco Oscar de Siqueira França. (2020). Access to drinking water and sewage treatment in Brazil: a challenge for the control of waterborne infectious diseases. *International Journal of Phytoremediation*, 20(1), 135–136. <https://doi.org/http://doi.org/10.1590/S1678-9946202062071>

Guimarães, C. M. M., & Galvão, V. (2014). PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS (Issue November 2013). <https://doi.org/10.13140/2.1.2790.7200>

Lam, K. L., & Van Der Hoek, J. P. (2020). Low-Carbon Urban Water Systems: Opportunities beyond Water and Wastewater Utilities? *Environmental Science and Technology*, 54(23), 14854–14861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05385>

Lettinga, G., Velsen, A. F. M. V. A. N., & Hobma, S. W. (1980). Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment , Especially for Anaerobic Treatment. XXII, 699–734.

McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45(17), 7100–7106. <https://doi.org/10.1021/es2014264>

Paula, A., Luisa, A., Carvalho, G. De, Aparecida, T., Silva, C., João, N., & Bonomo, B. (2024). ENERGIAS VERDES : A BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA NO BRASIL Leandro Teófilo Pinto dos Reis 3 Luiz Daniel Albuquerque Dias 7. 1–9.

Pereira, E., Santos, J., Gabriel, E., Sousa, M. H. De, Dutra, E. D., Samuel, A., & Sales, A. T. (2023). Northeast Region. 1–18.

Rietow, J. C., Aisse, M. M., Baréa, L. C., Andreoli, C. V., & Possetti, G. R. C. (2023). Consolidation of the technology UASB reactors in the state of Paraná for the treatment of sanitary sewage. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 28, 1–12. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220298>

Rosa, A. P., Lobato, L. C. da S., Borges, J. M., de Melo, G. C. B., & Chernicharo, C. A. de L. (2016). Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: Estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(2), 315–328. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>

Salomon, K. R., & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33(9), 1101–1107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>

Sperling, Marcos von. *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 1).

Waltman, L., Eck, N. J. V, Noyons, E. C. A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics* 4 (2010) 629–635

Zhang, Q., Smith, K., Zhao, X., Jin, X., Wang, S., Shen, J., & Ren, Z. J. (2021). Greenhouse gas emissions associated with urban water infrastructure: What we have learnt from China's practice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(4), 1–24. <https://doi.org/10.1002/wat2.1529>

CAPÍTULO 2: RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS EM ETE DOMÉSTICAS NAS ÚLTIMAS CINCO DÉCADAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

RESUMO: O biogás, subproduto do tratamento de efluentes, vem deixando de ser visto como um passivo para assumir o papel de ativo. Este trabalho realizou um estudo bibliométrico da produção mundial de biogás a partir de águas residuárias domésticas, com foco na evolução do conhecimento ao longo das décadas. Para isso, foi realizada uma busca por artigos científicos na base de dados Scopus e, a partir dos documentos obtidos, desenvolveu-se uma revisão de literatura para acessar informações e revelar padrões de quantificação. A análise dos gráficos e redes gerados mostrou-se eficiente no estudo exploratório da evolução científica e tecnológica do biogás proveniente do esgoto doméstico, permitindo observar um destaque para a recuperação do metano dissolvido, bem como para os ganhos na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa a partir do reaproveitamento do biogás, além do foco na recuperação de nutrientes e energia, o que reforça a importância dos processos anaeróbios para a obtenção de energia e a conservação de nutrientes, bem como seu potencial de contribuição para o alcance das metas relacionadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Biometano, bioenergia, esgoto, águas residuárias, bibliometria, VOSviewer

2.1. INTRODUÇÃO

Devido ao rápido crescimento populacional, a demanda por energia e a taxa de geração de águas residuárias têm aumentado de forma desordenada (Crone et al., 2016; Ijaz et al., 2016). Nas últimas quatro décadas, os combustíveis fósseis de origem carbônica atenderam predominantemente ao consumo mundial de energia (84,7%) (Ghasemian, S., Faridzad, A., Abbaszadeh, P., Taklif, A., Ghasemi, A., & Hafezi, 2020). As estações de tratamento de esgoto (ETEs) são sistemas responsáveis por consumir uma parcela considerável da energia utilizada na maioria das cidades de países desenvolvidos (McCarty et al., 2011; Gandiglio et al., 2017; Daneshgar, S., Callegari, A., Capodaglio, A., & Vaccari, 2018). Uma alternativa que pode ajudar a minimizar esses dois problemas é o uso das águas residuárias para a produção de novos produtos que possam ser posteriormente aproveitados, como energia renovável, fertilizantes e água limpa (Crone et al., 2016; Chrispim et al., 2021).

A recuperação de energia no tratamento de águas residuárias contribui para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) vinculados à Agenda 2030, assinada pela Organização das Nações Unidas (ONU). Entre os 17 ODS, pelo menos quatro podem ter efeitos positivos mais diretos devido à adoção de sistemas de tratamento de esgoto com soluções sustentáveis: o ODS 6 (água e saneamento), devido ao manejo mais sustentável do tratamento de esgoto e de seus subprodutos; o ODS 7 (energia acessível e limpa), devido à redução do uso de combustíveis fósseis; o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima), pela redução das emissões de gases de efeito estufa; e o ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis), pela possibilidade de fornecer energia para essas regiões e criar uma estratégia de economia circular (ONU, 2015b).

O uso de águas residuárias urbanas como fonte de energia tem uma longa história, principalmente por meio da conversão anaeróbia (McCarty et al., 2011; Chernicharo et al., 2015). Com o surgimento da tecnologia de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) na década de 1980 (Lettinga et al., 1980), diversos países, principalmente na América Latina e na Índia, passaram a adotar essa tecnologia de tratamento anaeróbio de esgoto em suas ETEs (Chernicharo et al., 2015). Essa adoção permitiu evoluir para a compreensão de que as ETEs podem desempenhar um papel essencial e central do ponto de vista energético, contribuindo para viabilizar cidades circulares (Chrispim et al., 2021). Isso pode ser feito utilizando a energia química do biogás produzido por processos anaeróbios (Noyola et al., 2006), que, após purificação e conversão, pode ser transformado em energia térmica e elétrica (Lipińska, 2018; Chang et al., 2019) e em biometano (Adnan et al., 2019; Haider et al., 2019; Kiselev et al., 2019; Koonaphapdeelert et al., 2020).

Os artigos de revisão sobre tratamento de esgoto encontrados na literatura geralmente abordam diversos tópicos em diferentes cenários e níveis de complexidade. Entre eles, a maior parte se concentra em pesquisas relacionadas à recuperação de nutrientes e energia, impulsionadas principalmente pelo aumento do custo da energia e do valor dos nutrientes, destacando-se a importância da digestão anaeróbia nesses processos de recuperação (McCarty et al., 2011; Crone et al., 2016; Bhatia, Sakhuja, et al., 2020; Chrispim et al., 2020). O trabalho de Chrispim, Scholz e Nolasco (Chrispim et al., 2021), Soares et al. (Soares et al., 2019) e Muñoz e Guieysse (Muñoz & Guieysse, 2006) discute avanços tecnológicos relacionados à recuperação de biogás no tratamento de efluentes, destacando o uso de técnicas para melhorar a produção de biogás, como sistemas de codigestão com microalgas para recuperação de energia. Battista et al. (Battista et al., 2020) revisaram o estado da arte da codigestão de resíduos alimentares e lodo de esgoto, produzindo biocombustíveis e recuperando nutrientes sob a abordagem da “economia circular”. Chernicharo et

al. (Chernicharo et al., 2015) revisaram programas voltados à recuperação de CH₄ dissolvido, cuja emissão na atmosfera, quando efluentes são descarregados, é preocupante. Essas perdas não representam apenas perda de potencial energético, mas também contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Outros trabalhos de revisão abordam emissões gasosas e Gases de Efeito Estufa (GEE) relacionados aos processos de digestão anaeróbia em estações de tratamento, como Zhang et al. (Zhang et al., 2021) e Eijo-Río et al. (Eijo-Río et al., 2015), apresentando suas implicações globais para o desenvolvimento sustentável. Azizi et al. (Mohammad Mirsoleimani Azizi et al., 2021) revisaram a literatura sobre a interferência de (nano)microplásticos na digestão anaeróbia, destacando os riscos ambientais potenciais do uso de biossólidos contaminados com (nano)microplásticos. Bragança et al. (Bragança et al., 2020) avaliaram a literatura sobre impurezas no biogás, resumindo metodologias para remoção de compostos indesejáveis. Salomon e Silva (Salomon & Silva Lora, 2009) determinaram o potencial de geração de eletricidade a partir de biogás proveniente de diversas fontes, como resíduos sólidos urbanos, esgoto doméstico, vinhaça e dejetos animais. As revisões de Shin e Bae (Shin & Bae, 2017) e Crone et al. (Crone et al., 2016) apresentaram resultados sobre sistemas de tratamento AnMBR no contexto de criação ambientalmente sustentável e tratamento de águas residuárias domésticas com recuperação de energia. Arespacochaga et al. (Arespacochaga et al., 2015) revisaram os efeitos dos siloxanos na recuperação de energia do biogás de esgoto. Nnaji (2013) e Chong et al. (Chong et al., 2012) revisaram avanços no desenvolvimento de tecnologias de digestores anaeróbios de alta taxa, com ênfase nos reatores UASB.

Existem desafios para a implementação da recuperação de energia a partir de águas residuárias, como a necessidade de ampliar o conhecimento dos atores envolvidos nesses sistemas sobre as tecnologias existentes e os efeitos positivos dessas estratégias (Ammenberg et al., 2018). Além disso, a geração de biogás no tratamento de esgoto e os dados relacionados à sua recuperação energética são temas pouco explorados na literatura disponível (Stazi & Tomei, 2018). Portanto, é fundamental incentivar estudos sobre a recuperação energética do biogás e como as tecnologias podem ser bem integradas aos sistemas de tratamento existentes e a novas instalações (Chrispim et al., 2021).

O aprofundamento desse tema é essencial para promover o desenvolvimento tecnológico. Para isso, uma compreensão precisa do estado da arte é fundamental. Entre os meios de compreender a evolução científica e tecnológica, os estudos prospectivos se baseiam na elaboração de indicadores a partir de métricas bibliométricas. A abordagem de revisão bibliométrica pode ser entendida como o conjunto de métodos analíticos utilizados para examinar a produção de

publicações acadêmicas. Por meio de técnicas estatísticas de forma quantitativa, essa abordagem também inclui o potencial de identificar e rastrear tendências de pesquisa quanto à produção (Yuji Shi, Simon Blainey, Chao Suna, 2020). Além disso, a bibliometria é utilizada para identificar padrões ao longo do tempo e fornecer uma visão sobre a dinâmica da área ou campo de estudo (MATHANKAR, 2018).

Os indicadores utilizados em análises bibliométricas podem basear-se na produção de artigos científicos e patentes, considerando sua dinâmica de citações e seus vínculos (coautoria, cocitação, entre outros) (Van Eck et al., 2006; Eck & Waltman, 2007; Jan & Ludo, 2010).

Devido à importância de considerar o desenvolvimento de estudos sobre o biogás obtido a partir de resíduos orgânicos e seu papel no subsídio a futuros desenvolvimentos tecnológicos, discussões e políticas públicas (Salomon & Silva Lora, 2009), justificam-se os objetivos do presente estudo. Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliométrica da literatura sobre o reaproveitamento energético do biogás em ETEs domésticas nas últimas cinco décadas.

As questões respondidas neste manuscrito foram: Quais países contribuíram para a pesquisa sobre recuperação energética do biogás obtido de ETEs domésticas? Quais são as tendências de publicação sobre recuperação energética de biogás obtido de ETEs domésticas ao longo das décadas? A tríplice hélice (empresa, universidade, governo) está suficientemente envolvida? Qual é a participação de redes institucionais (governamentais, privadas)? Que tipos de financiamento estão envolvidos na pesquisa? Quais são as principais fontes de investimento? Quais são as publicações mais relevantes sobre biogás obtido de ETEs domésticas? Quais são os periódicos influentes na área de biogás obtido de ETEs domésticas?

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 2-1 apresenta a análise integrada realizada para alcançar os objetivos do presente estudo.

A análise inclui: (i) a estratégia de busca na literatura sobre a produção de biogás a partir de águas residuárias domésticas, (ii) a revisão bibliométrica dos documentos identificados, com verificação das tendências ao longo dos últimos 46 anos, e uma microanálise baseada em um recorte de 10% dos artigos mais citados.

Este estudo baseia-se em uma revisão bibliométrica. A bibliometria é um método comumente utilizado para estabelecer o estado da arte em uma determinada área de pesquisa, sendo conduzida a partir de análises quantitativas e estatísticas que visam compreender padrões nas

publicações selecionadas. Dessa forma, é possível analisar as relações entre as pesquisas para obter conclusões sobre o conhecimento da área estudada (Dereli et al., 2011). Em geral, estudos desse tipo analisam aspectos como informações sobre os autores, número de citações, títulos, palavras-chave e dados dos resumos (Mallik & Mandal, 2014; Lee et al., 2016; De Rezende et al., 2018; Han et al., 2020; Medina-Mijangos & Seguí-Amórtegui, 2020).

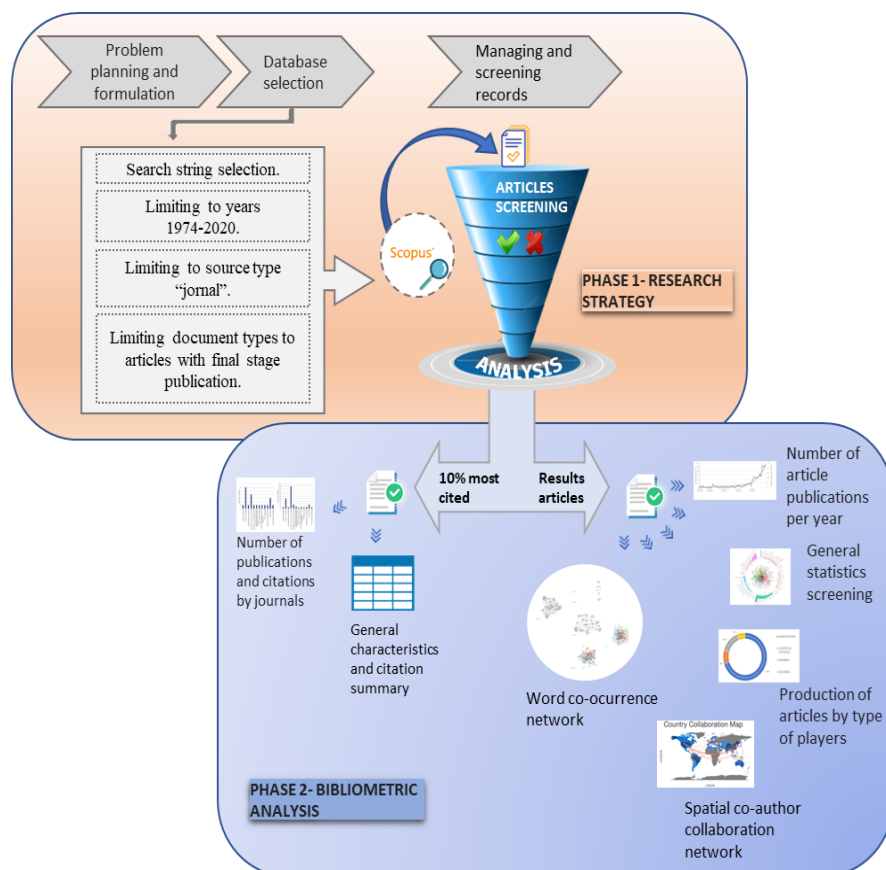


Figura 2-1 Fluxograma dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo

2.2.1. Fase 1- Estratégia de Pesquisa

Para a seleção das publicações que participaram deste trabalho, foram utilizados elementos da revisão sistemática, a qual segue um processo estruturado com critérios de elegibilidade previamente especificados, a fim de garantir que os resultados obtidos sejam confiáveis e relevantes para os usuários finais (Liberati et al., 2015; Munn et al., 2018). A revisão sistemática é composta por determinadas fases para a seleção das publicações, sendo elas (Rf et al., 2007): definição das questões científicas; definição das bases de dados e palavras-chave, bem como das estratégias

utilizadas para a busca; estabelecimento dos critérios de filtragem dos estudos; realização da busca nas bases de dados; filtragem dos estudos de acordo com os critérios estabelecidos; análise dos estudos.

Assim, o presente trabalho foi conduzido seguindo uma estratégia de pesquisa que utilizou evidências sobre fontes de dados, critérios de seleção e análise, realizada de acordo com as duas fases apresentadas na Figura 2-1, conforme detalhado a seguir.

Na primeira etapa, o problema é delimitado para definir o escopo da pesquisa. Dessa forma, é necessário definir claramente as questões de pesquisa propostas, os critérios de exclusão para a seleção final dos documentos essenciais e a definição dos resultados esperados (Samambaiaumandez et al., 2020).

Cada método apresenta questões intrínsecas (Tabela 1) que abordam a relação entre os problemas de pesquisa, a análise proposta associada e a fonte de dados utilizada.

Tabela 2-1 Descrição da relação entre as questões de trabalho, as análises e as fontes de dados neste estudo

Questões	Análise	Fonte de Pesquisa
Quais são os principais países que contribuem para a pesquisa sobre recuperação de energia do biogás obtido de ETEs domésticas?	Estatísticas gerais / Rede espacial de coautoria	Todos os artigos
Quais são as tendências de publicação sobre recuperação de energia do biogás obtido de ETEs domésticas ao longo das diferentes décadas?	Estatísticas gerais / Rede de coocorrência de palavras	Todos os artigos
Qual é a relação de contribuição entre universidade/centro de pesquisa/governo/empresa para pesquisas sobre recuperação de energia do biogás obtido de ETEs domésticas?	Estatísticas gerais / características gerais	Todos os artigos
Quais são os principais tipos de financiamento envolvidos na pesquisa?	Estatísticas gerais / características gerais	Todos os artigos
Quais são as publicações influentes na área sobre recuperação de energia do biogás obtido de ETEs domésticas?	Características gerais e tabelas de citações	10% dos artigos mais citados
Quais são os periódicos influentes na área sobre recuperação de energia do biogás obtido de ETEs domésticas?	Estatísticas gerais / características gerais e tabelas de citações	10% dos artigos mais citados

Os registros bibliográficos foram obtidos da base de dados SCOPUS, que pertence à Elsevier. SCOPUS é uma plataforma digital bibliográfica reconhecida internacionalmente entre pesquisadores por possuir padrões de alta qualidade, a maior base de dados focada em ciência e tecnologia e uma ampla variedade de documentos técnicos revisados por pares.

O acesso ao Scopus foi realizado por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) em agosto de 2021.

A partir da definição da base de dados utilizada, procedeu-se à definição das “strings” de busca. Os termos únicos de busca para compor esta pesquisa foram identificados através de uma busca preliminar na base SCOPUS, utilizando as palavras “biogas and sewage*”. Os termos mais usados em títulos, resumos ou palavras-chave foram observados nos documentos obtidos.

Em seguida, foram realizados testes manuais, incluindo os termos identificados, com o objetivo de coletar os termos que recuperassem o maior número de artigos com o menor viés negligenciável, resultando no conjunto mais adequado de palavras-chave para a busca. Com isso, finalmente, os termos de busca escolhidos foram interligados em uma única pesquisa, unidos por meio de conectores booleanos do tipo AND e OR, estabelecendo-se: ((domestic or urban) and ("wastewater treatment plant*" or "wastewater treatment plant*" or sewage* or sewage* or effluent* or waste waterwastewater* or "wastewater*")) and (biogas or "biogas" or biomethane* or methane)).

Para este estudo, portanto, foram considerados apenas documentos em estágio final de publicação, do tipo artigo, publicados em periódicos de 1970 a 2020. Portanto, documentos publicados no ano de 2021 foram excluídos.

Os resultados gerados na base SCOPUS obtidos por meio da busca única, apresentada acima, correspondem ao universo global da pesquisa.

Para a elegibilidade dos resultados, foi realizada uma triagem dos documentos obtidos para elegibilidade dos resultados. Essa etapa consistiu na leitura dos títulos, resumos e/ou textos completos para excluir artigos que não abordassem questões sobre recuperação de energia do biogás proveniente de efluentes domésticos.

A “strings” utilizada nesta pesquisa recuperou documentos sobre produção de biogás, incluindo várias abordagens como recuperação de energia. Portanto, para não distorcer os resultados da pesquisa, decidiu-se, com base no tema central (produção de biogás), identificar os documentos

que apresentavam discussões sobre recuperação de energia, por meio de triagem manual. Assim, trabalhos que não atenderam a esse requisito foram excluídos (Tabela 2.II).

Tabela 2-2 Critérios para seleção e exclusão de documentos utilizados na revisão bibliométrica.

Critérios para inclusão:	Critérios para Exclusão:
1. Biogás obtido de ETEs domésticas em regiões urbanas 2. Trabalhos que abordaram recuperação de energia	1. Trabalhos que não abordaram o uso de águas residuárias domésticas como substrato 2. Trabalhos focados em biogás obtido de ETEs rurais 3. Documentos cujo tema central foram tratamentos descentralizados

Entre as palavras que compuseram a “strings” desta pesquisa, não foram utilizados termos relacionados a “energia”, pois existem diversos tipos de energias potenciais, assim como vários sinônimos/expressões que podem exemplificar e representar o conceito de recuperação de energia, assim como tipos de energia associados.

Como resultado do processo de seleção, foi obtida uma soma de artigos (Tabela 3).

Tabela 2-3 Descrição das etapas, “strings” de busca e o número de documentos obtidos no processo de filtragem dos documentos usados na revisão bibliométrica.

Descrição	“Strings” de busca	Número de artigos obtidos
Identificação	TITLE-ABS-KEY-AUTH (((domestic OR urban) AND ("EFFLUENT TREATMENT STATION*" OR "EFFLUENT TREATMENT PLANT*" OR sewage* OR sewer* OR effluent* OR wastewater* OR "WASTER* WATER*")) AND (biogas OR "BIO GAS" OR biomethan* OR methane))	946
Elegibilidade	TITLE-ABS-KEY (((domestic OR urban) AND ("EFFLUENT TREATMENT STATION*" OR "EFFLUENT TREATMENT PLANT*" OR sewage* OR sewer* OR effluent* OR wastewater* OR "WASTER* WATER*")) AND (biogas OR "BIO GAS" OR biomethan* OR methane)) AND (EXCLUDE (PUBYEAR, 2021)) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, "j"))	649
Triagem	Leitura de todos os títulos e/ou resumos dos artigos retornados na busca, identificando e excluindo possíveis artigos que não se enquadram no objetivo.	217

2.2.2.Fase 2- Analise Bibliométrica

Conforme definido anteriormente, a bibliometria utiliza métodos estatísticos e de visualização para explorar as estruturas e padrões de um campo de estudo. A análise bibliométrica foi desenvolvida utilizando todos os artigos científicos conforme o método de definição descrito na Tabela 3.

A partir da busca realizada, foi gerado um arquivo no formato “.csv” na base de dados SCOPUS, que foi importado para a plataforma VOSVIEWER® para a construção de mapas de redes. O VOSVIEWER® é um software gratuito que utiliza seu algoritmo para analisar a similaridade de termos, cujos principais passos são a identificação de termos e filtragem dos mais relevantes, mapeamento e agrupamento dos termos, assim como agrupamento e visualização por meio de mapas de uma rede (Jan & Ludo, 2010). Essa plataforma permite gerar diferentes panoramas de visualização científica, dentre os quais foram escolhidos os seguintes mapas: rede por coautoria por país, rede por coautoria por autores e rede semântica.

Mapas bibliométricos, também chamados mapas de rede, possuem dois atributos fundamentais: distância e dimensão. A distância refere-se ao comprimento da linha contínua que une os nós, indicando o grau de proximidade entre dois ou mais itens; a dimensão é caracterizada pelo tamanho do item, que expressa proporcionalmente sua importância, dada pelo número de ocorrências. As distâncias e dimensões dos itens representados produzem diferentes agrupamentos no mapa. Também chamados de clusters, essas concentrações expressam níveis de similaridade, geralmente representados por esferas.

A segunda etapa desta fase compreendeu a análise do desenvolvimento científico ao longo das décadas. Para isso, utilizou-se a busca exata apresentada anteriormente, incluindo no filtro de ano apenas os anos que compõem as décadas de interesse, gerando arquivos “CSV” separados para cada década estudada. Os resultados da busca gerados na base SCOPUS corresponderam ao universo dos anos 1970, 1980, 1990, 2000 e 2010 da pesquisa. Eles foram analisados usando os dados bibliométricos da plataforma VOSVIEWER® para construir mapas de rede para cada década.

Além da análise de padrões realizada pelo método de revisão bibliométrica, foi conduzida uma análise em nível micro por meio da seleção de parte dos artigos para uma investigação qualitativa. Esse processo tem como objetivo responder ao conjunto de questões que este trabalho

busca solucionar (Tabela 1), as quais não podem ser respondidas apenas pela investigação dos metadados obtidos na análise bibliométrica.

Assim, dos artigos obtidos após a triagem final, foi estabelecido que uma parcela correspondente a 10% seria utilizada para essa análise qualitativa. Primeiro, todo o grupo de publicações foi ranqueado de acordo com o número de citações. Em seguida, a décima parte mais citada foi definida como o grupo de artigos destinados à microanálise. O número de citações utilizado para o ranqueamento é constante na base de dados utilizada neste estudo.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A busca na base de dados SCOPUS retornou 649 artigos científicos, dos quais, após a filtragem, 432 artigos foram excluídos, resultando em um volume de 217 artigos, que compõem o universo global da pesquisa, abrangendo artigos científicos publicados entre 1974 e 2020 (Figura 2-2).

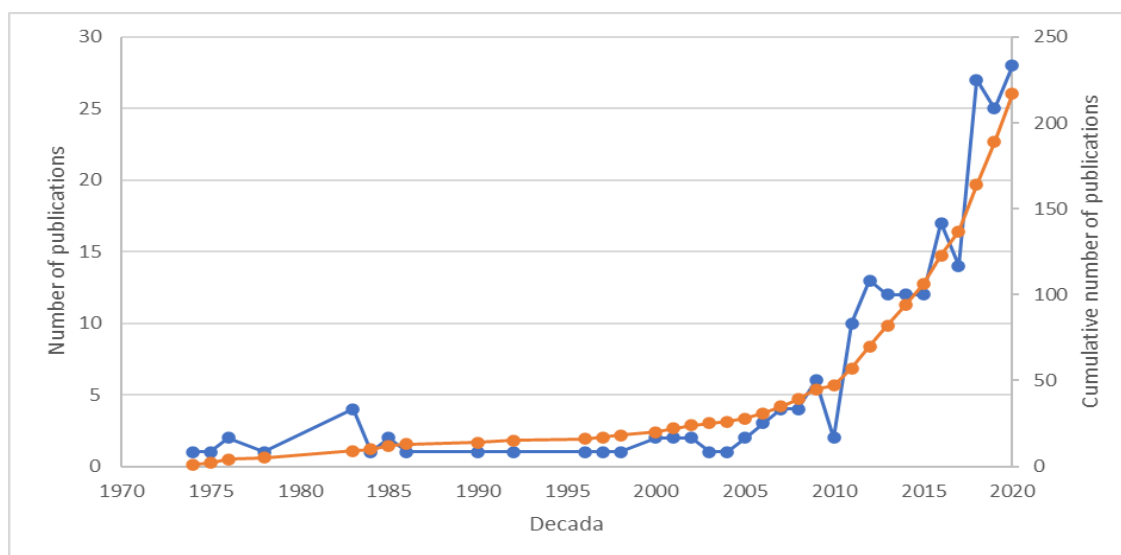


Figura 2-2 Número de publicações e número acumulado de publicações no período entre 1974 e 2020 na base de dados Scopus, com base nos artigos pesquisados na área de recuperação de energia do biogás obtido no tratamento de águas residuais domésticas.

A compreensão do número de publicações por década (Figura 2-2) pode ser feita em três fases com análises diferentes: a primeira, centrada nas três primeiras décadas, mostra que a produção de artigos científicos apresentou um crescimento suave e relativamente homogêneo, com uma média igual a 0,7 artigos por ano. A segunda fase, referente aos dez anos seguintes, revela que o crescimento apresentou uma forte tendência ascendente, com uma média de 2,7 artigos por ano. A

terceira fase, referente à 5ª década, na qual se observa um crescimento mais vertiginoso no início dessa década, seguido por um crescimento intenso principalmente no ano de 2020, que acumula 28 publicações, sendo a média anual dessa década igual a 17 artigos.

O primeiro bloco, compreendendo as três primeiras décadas (1970, 1980 e 1990), representa um período com pouca pesquisa publicada. No entanto, a década de 1990 mostra um aumento nos trabalhos devido à necessidade de mitigar as mudanças climáticas, gerando ações para combater os efeitos adversos das atividades antrópicas. A possível explicação para isso é que foi impulsionado por acordos mundiais, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (ONU, 1992b) e o Protocolo de Kyoto (ONU, 1998).

Como reflexo da convenção UNFCCC-92, foi criada a Agenda 21, que não possui um espaço específico para energia, mas que, entre outras abordagens, trata da questão da mudança nos padrões de consumo, focando em vários pontos, especialmente energia, transporte e resíduos. Também apresenta a abordagem do desenvolvimento sustentável, incentivando o uso de fontes de energia novas e renováveis. Além disso, o capítulo 21 destaca a gestão de resíduos sólidos e efluentes e a necessidade de aumentar o financiamento para programas de pesquisa-piloto para testar diferentes opções de reúso e reciclagem de resíduos. Entre esses, destacam-se pequenas indústrias artesanais de reciclagem, produção de fertilizantes orgânicos, irrigação com águas residuais tratadas e recuperação de energia de resíduos (ONU, 1992a).

O Protocolo de Kyoto representa o primeiro acordo jurídico internacional sobre emissões de gases de efeito estufa. Este protocolo estabelece uma das formas de reduzir emissões pelo uso de formas de energia novas e renováveis, tecnologias para o sequestro de dióxido de carbono e tecnologias ambientalmente adequadas que são avançadas e inovadoras. Outro ponto é a limitação e/ou redução das emissões de metano por meio da sua recuperação e uso no tratamento de resíduos, assim como na produção, transporte e distribuição de energia (ONU, 1998).

Posteriormente, vários outros acordos foram lançados, como os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) em 2000 (ONU, 2015a) e, em 2015, a publicação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015b), nos quais o objetivo 7 de cada documento trata da energia sustentável.

A Figura 2-3 mostra os dez principais países, fundos, periódicos, afiliações e autores que publicaram o maior número de artigos sobre recuperação de energia do biogás obtido do esgoto, assim como a rede de coocorrência de palavras-chave com no mínimo 1 ocorrência por termo.

Entre essas afiliações, as dez que mais publicaram são todas universidades, das quais 70% são públicas e 30% privadas. A universidade com o maior número de publicações foi a Universidade Técnica da Dinamarca (seis artigos). Essa universidade privada dinamarquesa possui uma infraestrutura de inovação vital, com diversos projetos incentivadores, como um centro de pesquisa e programas focados em empreendedorismo como ponte entre indústria e academia, parque tecnológico, incubadora e projetos em energias renováveis e cidades circulares. Em seguida, vem a Universidade de Newcastle (cinco artigos), uma universidade privada sediada no Reino Unido. Logo após, a Universidade de São Paulo (cinco artigos), uma universidade pública brasileira; o Instituto de Tecnologia de Harbin (cinco artigos), uma universidade pública chinesa; a Universidade de Queensland (cinco artigos), uma universidade privada sediada na Austrália; a Universidade de Arquitetura e Tecnologia de Xi'an (cinco artigos), universidade pública na China; a Universidade de Cranfield (quatro artigos), localizada no Reino Unido, de caráter público; a Universidade Federal de Minas Gerais (quatro artigos), universidade pública brasileira; a Universiteit Gent (quatro artigos), uma universidade pública da Bélgica; e a Universitat de València (três artigos), sediada na Espanha, de caráter público. Os 242 termos na rede mostrada na Figura 2-3 foram agrupados em 4 clusters. As dez palavras com maior número de ocorrências foram: “wastewater” (143 ocorrências), “wastewater treatment” (140), “biogas” (126), “methane” (110), “anaerobic digestion” (94), “bioreactor” (93), “waste disposal” (71), “sludge” (70), “cod” (58) e “wwtp” (58) (Fig. 3). A alta ocorrência desses termos indica um maior foco das pesquisas devido à sua relação geral com a recuperação de energia do biogás. Deve-se destacar também a grande ocorrência do termo “sludge”, que demonstra, além da questão energética, uma preocupação com a gestão de resíduos sólidos e, portanto, o uso do lodo como matéria-prima para a digestão anaeróbia.

O maior cluster encontrado contém 74 palavras, representadas pela cor vermelha. Nesse cluster, os termos mais frequentes possuem abordagens conceituais relacionadas a produtos energéticos e instalações físicas das ETEs. Os termos de destaque foram: “wastewater” (143), “wastewater treatment” (140); “biogas” (143 — soma de “biogas” (126) e “biogas production” (17)) e “energy” (170 — soma de “energy” (41), “energy balance” (15), “energy conversion” (6), “energy demand” (5), “energy efficiency” (10), “energy resource” (15), “renewable energy” (10), “electricity” (12), “electrical production” (12)). Esse cluster também concentra outros termos bastante frequentes relacionados a emissões e questões ambientais, como “greenhouse effect” (24), “CO2” (22); “emission” (19), “sustainability” (15), “carbon footprint” (7). Há uma correlação entre a minimização dos impactos ambientais por meio da redução das emissões de GEE e a recuperação de energia do biogás que seria perdido. Estudos como Smith A.L et al. (Smith et al., 2014), Sanchis-

Perucho P. (Sanchis-Perucho et al., 2020) e Robles Á. et al. (Robles et al., 2020) mostram a redução dos impactos do aquecimento global associados às emissões de metano dissolvido em efluentes usando metodologias baseadas no tratamento de águas residuais domésticas com AnMBR, que alcançaram maior produção líquida de energia e redução das emissões de gases de efeito estufa.

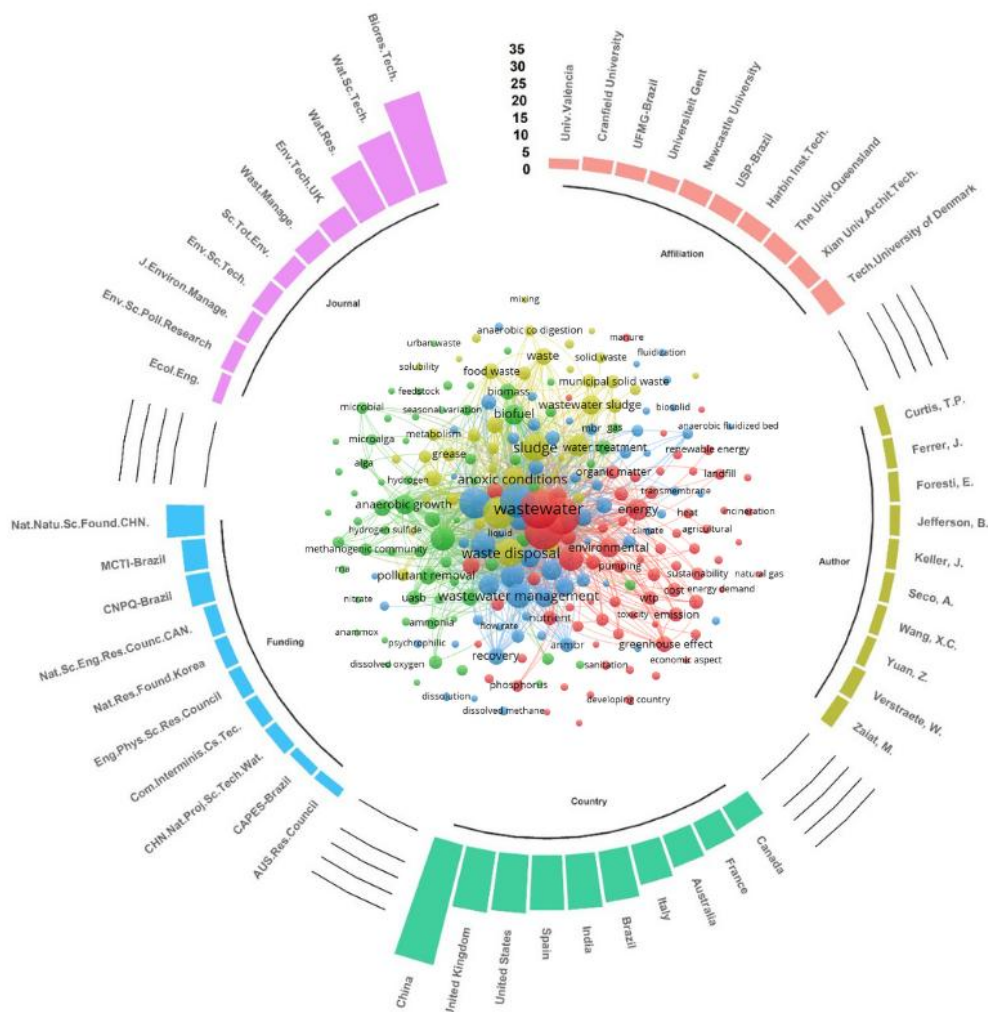


Figura 2-3 Rede de coocorrência de palavras construída com os 217 artigos selecionados, elaborada a partir das palavras presentes nos títulos, resumos, palavras-chave e informações gerais dos dez principais recursos das cinco décadas de documentos publicados entre

Outro estudo que aborda a redução das emissões de GEE foi o trabalho de Chan Gutierrez E. et al. (Chan Gutiérrez et al., 2018). Os resultados indicam que foi verificada a viabilidade econômica de uma planta de biometano para uma cidade mexicana usando dois cenários. O que utilizou a co-digestão de resíduos alimentares e lodo de esgoto resultou em um desempenho econômico positivo baseado no valor presente líquido (VPL). O autor também afirma que,

substituindo o diesel por biometano proveniente de resíduos alimentares, é possível reduzir 17,91 MtCO₂ e 6,06% da meta de emissões de GEE para 2050.

Os termos mais proeminentes associados ao tratamento biológico foram: limpeza e processo de digestão, reunidos no cluster verde (65 termos), destacando-se “anaerobiosis” (55), “biofuel” (39), “anaerobic growth” (35), “bacteria” (27), “biomass” (31), “nitrogen” (24), “methanogenesis” (22) e várias espécies de bactérias relacionadas aos processos de dessulfurização e desnitrificação.

O cluster azul (61 termos) apresentou uma posição mais centralizada, agrupando termos predominantemente associados a tecnologias (equipamentos e reatores) e parâmetros de processo. As tecnologias listadas nesse cluster com maior número de ocorrências são “bioreactor” (93), “membrane” (33), “anmbr” (19), e outras menos exploradas, como “transmembrane” (9), “anaerobic fluidized bed” (5), “deflector anaerobic reactor” (5). O cluster associado aos parâmetros de processo destacou termos como: “cod” (58), “process parameter” (38), “temperature” (37), “bod” (31), “hrt” (22), outros menos explorados, como “low temperature” (10), “dissolved methane” (9), “psychrophilic” (7), “flow” (7) e “fluidization” (6). Sistemas de biorreator de membrana anaeróbia (AnMBR) vêm sendo propostos como tecnologia promissora para o tratamento de efluentes domésticos, pois podem gerar efluentes de alta qualidade durante a operação em tempos hidráulicos de retenção razoáveis e temperaturas baixas. Contudo, embora processos com AnMBRs economizem energia por não requererem mecanismos de aeração, é necessário um consumo considerável de energia para evitar o incrustamento de resíduos na membrana (Smith et al., 2014).

A análise da distância espacial dos clusters revela que o cluster azul forma uma interface entre os três outros clusters, reforçando que o desenvolvimento tecnológico é a principal base para o avanço dos processos de recuperação de energia do biogás.

O cluster amarelo (41 termos) compreende questões relacionadas aos processos de “anaerobic digestion” (94), “anaerobic co-digestion” (24), associadas aos termos “food waste” (24), “food” (17), “waste disposal” (71), “waste treatment” (41), “waste” (28), “municipal solid waste” (18), “solid waste” (12), “municipal waste” (5). A co-digestão tende a concentrar pesquisas pois favorece o equilíbrio das cargas de nutrientes, refletindo uma degradação maior da matéria orgânica e recuperação de mais metano. Além disso, é um aspecto essencial da gestão integrada de resíduos. Comparada à monodigestão, a co-digestão de múltiplos substratos oferece vantagens significativas, incluindo um fornecimento mais equilibrado de nutrientes, efeito diluidor de compostos tóxicos e inibidores e um aumento geral na produção de biogás devido ao fornecimento ampliado de

compostos orgânicos (Mata-Alvarez et al., 2014). Dos documentos que focam em processos de co-digestão, a maioria aborda processos que utilizam resíduos alimentares com lodo de esgoto (Rizk et al., 2007; Fitamo et al., 2016, 2017; Koch et al., 2016; Becker et al., 2017; Mu et al., 2020).

Quanto às afiliações que publicaram os 217 artigos que compõem o objeto deste estudo, foram identificadas cento e sessenta afiliações diferentes, das quais 70% são universidades, 15% empresas, 9% centros de pesquisa e 6% órgãos governamentais (Figura 2-4).

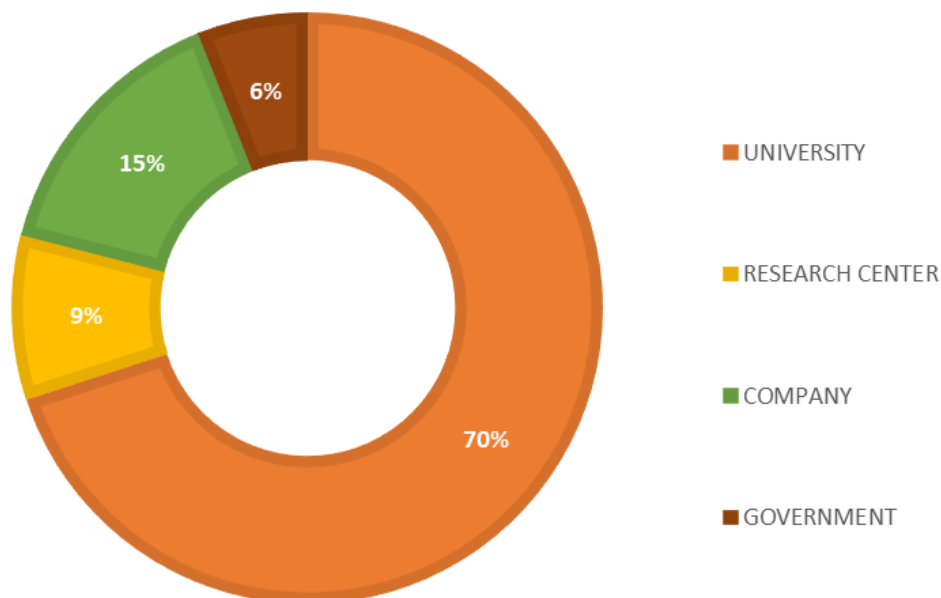


Figura 2-4 Proporção de contribuição entre universidades, centros de pesquisa, órgãos governamentais e empresas para a pesquisa sobre recuperação de energia do biogás obtido no tratamento de águas residuais domésticas.

As publicações analisadas neste trabalho envolveram financiamento de 139 entidades diferentes. A Figura 2-3 apresenta os dez fundos financiadores que mais financiaram pesquisas. A Fundação Nacional de Ciências Naturais da China é um fundo governamental chinês que subsidiou onze dos artigos considerados, a cooperação mais significativa do mesmo fundo identificada neste trabalho. A China também financiou outras quatro pesquisas do Projeto Nacional Crítico da China para Ciência e Tecnologia em Prevenção e Controle da Poluição da Água. É interessante destacar que, entre os dez que mais financiaram pesquisas, três entidades públicas brasileiras apoiam pesquisas, que ocupam, neste ranking: o segundo lugar, representado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (7 artigos); o terceiro lugar, representado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (7 artigos); e o décimo, representado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (3 artigos).

Figura 2-5 revela o fluxo da distribuição geográfica global da colaboração dos países que se destacam na publicação de artigos sobre recuperação de energia a partir do biogás obtido do esgoto. O mapa lista cinquenta e oito conexões diferentes estabelecidas entre trinta e três países. A China teve o maior número de conexões, treze no total, compostas por nove países, com três colaborações estabelecidas com o Japão. Em sequência, o Reino Unido, com dez colaborações assinadas entre oito países diferentes, e tanto a Alemanha quanto o Japão, estabeleceram oito colaborações. A China e o Japão têm significativa representação na inovação tecnológica neste setor, sendo responsáveis por várias empresas que produzem insumos para o tratamento químico de esgoto e água, bem como equipamentos e reatores para o tratamento primário e secundário. A Alemanha é pioneira no uso de técnicas para o reuso do biogás do esgoto.

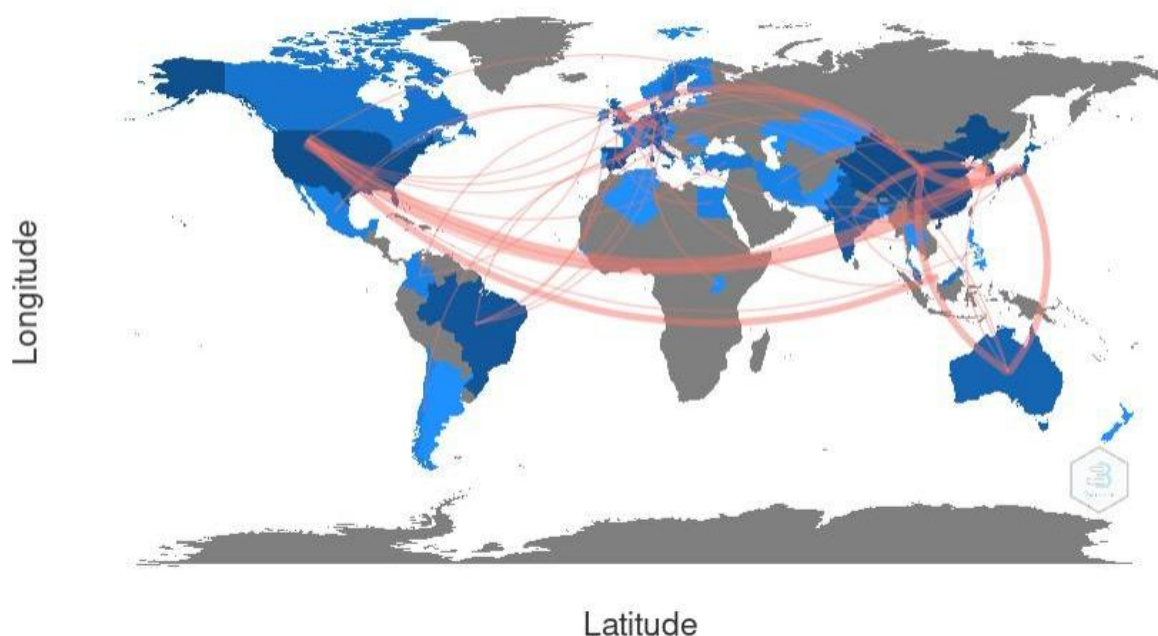


Figura 2-5 Visão em escala planetária da colaboração coautoria para países creditados com pelo menos uma publicação sobre recuperação de energia do biogás obtido do tratamento de águas residuais domésticas entre 1974 e 2020.

A Figura 2-6 mostra a evolução das palavras-chave ao longo de cinco décadas, entre as quais se destaca o aumento expressivo no número de termos. Na década de 1970, por exemplo, apenas 14 termos foram usados uma ou três vezes pelos autores em resumos, palavras-chave ou títulos. Portanto, a rede foi caracterizada por uma baixa riqueza e baixa frequência de termos, entre os quais se destacam os termos “wastewater” e “methane”. Essa rede também possui um termo que não tem conexão com os outros, “industrial gas”. A década seguinte (anos 1990) resultou na construção de uma rede semântica com 67 palavras que ocorreram no máximo seis vezes, entre as

quais os termos “wastewater treatment”, “biogas”, “methane”, “wastewater”, “anaerobic digestion” e “economic aspect”. O mapa da rede dos anos 1990 permite a visualização de 72 palavras que ocorreram no máximo cinco vezes, incluindo tópicos relacionados a equipamentos e reatores, gestão ambiental, recuperação de nutrientes e termos relacionados à energia. O ano 2000 representa um marco na expansão da pesquisa. A rede desta década possui 288 termos, abordando questões variadas como gestão ambiental, recuperação de recursos naturais, energia alternativa, emissões e microalgas. Na década de 2010, a rede tem 1000 palavras com um número máximo de repetições de 114 vezes.

Figura 2-6 Redes de palavras-chave (citadas em títulos, resumos e pelos autores) construídas a cada dez anos representando a evolução das conexões estabelecidas e a riqueza de termos (com um mínimo de uma ocorrência por termo) na recuperação de energia do biogás

À medida que foram definidos 217 artigos que se enquadravam nos critérios estabelecidos, os 10% mais citados – estabelecidos como um corte para a microanálise – resultaram em 22 artigos. Os títulos desses artigos e suas respectivas posições no ranking de citações são mostrados na Tabela 4.

Tabela 2-4 Ranking de citações, títulos, ano de publicação, jornal, palavras-chave (se aplicável) e número de citações das 22 publicações mais citadas (entre as selecionadas para este estudo).

Rank	Título	Ano de publicação	Jornal	Palavras-chave (se aplicável)	Número de citações
1	Tratamento de águas residuais domésticas como produtor líquido de energia – isso pode ser alcançado?	2011	Environmental Science and Technology		1106
2	Biorreator de membrana fluidizada anaeróbia para tratamento de águas residuais	2011	Environmental Science and Technology		340
3	Produção de biohidrogênio a partir de águas residuais de processamento de alimentos e domésticas	2005	International Journal of Hydrogen Energy	Águas residuais de processamento de alimentos; Produção de hidrogênio	326
4	Sistema de célula de combustível microbiana em dois estágios e biorreator de membrana fluidizada anaeróbia (MFC-AFMBR) para tratamento eficaz de águas residuais domésticas	2014	Environmental Science and Technology		198
5	Tratamento em escala piloto em clima temperado de águas residuais domésticas com biorreator de membrana fluidizada anaeróbia em etapas (SAF-MBR)	2014	Bioresource Technology	Anaeróbio; Águas residuais domésticas; Energia; Leito fluidizado; Biorreator de membrana	175
6	Biomethanação aprimorada de resíduos de	2011	Bioresource	Processo anaeróbio; Resíduos	165

	cozinha por diferentes pré-tratamentos		Technology	alimentares; Hidrólise; Liquefação; Ácidos graxos voláteis	
7	ZeroWasteWater: Ciclagem curta de recursos de águas residuais para cidades sustentáveis do futuro	2011	International Journal of Sustainable Development and World Ecology	Telhado algal; fim da tubulação; microalgas; OLAND; recuperação; reciclagem; reuso; sustentabilidade	156
8	Navegando estratégias de recuperação de energia de águas residuais: comparação de ciclo de vida entre biorreator de membrana anaeróbio e sistemas convencionais com digestão anaeróbia	2014	Environmental Science and Technology		155
9	Otimização e análise da comunidade microbiana da co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e lodo de esgoto baseada em pré-tratamento por micro-ondas	2016	Bioresource Technology	Co-digestão anaeróbia; comunidade arqueana; comunidade bacteriana; resíduos alimentares; lodo de esgoto	143
10	Tratamento de lodo em fluxo lateral usando ácido nitroso livre elimina seletivamente bactérias oxidantes de nitrito e alcança a via do nitrito	2014	Water Research	Denitrificação; ácido nitroso livre; nitrificação; via do nitrito; tratamento de lodo	139
11	Tratamento anaeróbio de águas residuais municipais com sistema de biorreator de membrana fluidizada anaeróbia em etapas (SAF-MBR)	2012	Bioresource Technology	Anaeróbio; biossólidos; leiteo fluidizado; biorreator de membrana; águas residuais municipais	139
12	Otimização da adição de resíduos alimentares	2003	Waste	Anaeróbio; co-digestão;	121

	como co-substrato na digestão anaeróbia de lodo de esgoto		Management and Research	resíduos alimentares; condições mesofílicas e termofílicas; taxa de produção de metano (MPR); proporção ótima de mistura; lodo de esgoto; Wmr 694-8	
13	Co-digestão anaeróbia em escala total de resíduos orgânicos e lodo municipal	2008	Biomass and Bioenergy	Digestão anaeróbia; produção de biogás; resíduos orgânicos; digestão de lodo	113
14	Tratamento do biogás produzido em reatores anaeróbios para águas residuais domésticas: controle de odor e recuperação de energia/recursos	2006	Reviews in Environmental Science and Biotechnology	Tratamento anaeróbio de esgoto; biogás; utilização de biogás; desnitrificação; sulfeto de hidrogênio; protocolo de Kyoto; metano; controle de odor	111
15	Potencial de redução a longo prazo de gases de efeito estufa não CO ₂	2007	Environmental Science and Policy	Potencial de abatimento; cenários de mitigação; não CO ₂ ; desenvolvimento tecnológico	109
16	Quantificação do metano dissolvido em reatores UASB tratando águas residuais domésticas sob diferentes condições operacionais	2011	Water Science and Technology	Biogás; metano dissolvido; águas residuais domésticas; reator UASB	107
17	Efeito do pré-tratamento térmico na produção de biogás e equilíbrio das comunidades microbianas durante digestão anaeróbia de lodo ativado urbano e industrial	2016	Bioresource Technology	Digestão anaeróbia; hibridização fluorescente in situ; lodo industrial; equilíbrio microbiano; pré-	98

				tratamento térmico; lodo urbano	
18	Produção em escala total de AGVs a partir de lodo de esgoto por fermentação alcalina anaeróbia para melhorar a remoção biológica de nutrientes em águas residuais domésticas	2018	Bioresource Technology	Fermentação alcalina para produção de AGVs; escala total; remoção de nutrientes; lodo de esgoto; hidrólise térmico-alcalina	96
19	Tratamento anaeróbio de águas residuais municipais em temperatura ambiente: análise da estrutura da comunidade arqueana e recuperação de metano dissolvido	2012	Water Research	Estrutura da comunidade arqueana; membrana de desgasificação; metano dissolvido; águas residuais municipais; condição psicrófila; processo upflow anaerobic sludge blanket	94
20	Co-digestão de resíduos alimentares em estação municipal de tratamento de águas residuais: comparação de testes em batelada e experiências em escala total	2016	Waste Management	Co-digestão; autossuficiência energética; resíduos alimentares; lodo de esgoto; efeito sinérgico	93
21	Dinâmica da população microbiana na co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos urbanos com lodo misto durante mudança na composição do substrato e diferentes tempos de retenção hidráulica	2017	Water Research	16S rRNA; digestão anaeróbia; metanogênese; diversidade microbiana; resíduos orgânicos urbanos	92
22	Produção de biogás a partir de resíduos sólidos municipais com esgoto doméstico	2007	Journal of Hazardous Materials	Digestão anaeróbia; biogás; taxa de alimentação orgânica; resíduos orgânicos	89

O artigo mais citado da lista, cujo número de citações é bastante expressivo e em escala ligeiramente maior que os subsequentes, foca na sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgoto, discutindo a possibilidade do processo produzir mais energia do que consome. Além disso, os artigos número 7 e número 15 também têm como principal objetivo a sustentabilidade. O artigo 7 explora a ideia de estabelecer ciclos curtos para as cidades do futuro baseados nas implicações cradle-to-cradle, como nas definições de economia circular (embora o trabalho não use necessariamente esse termo). Nesse sentido, inclui-se a recuperação de energia (elétrica e térmica) do biogás produzido no tratamento anaeróbio do esgoto. O artigo 15 explora o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa não CO₂, incluindo opções para essa mitigação no tratamento de esgoto. Entre elas, está a recuperação do metano presente no biogás.

A co-digestão com resíduos alimentares é citada por vários artigos (mais precisamente 3, 6, 9, 12, 13, 20, 22) como uma das formas de melhorar o processo de digestão anaeróbia, pela melhor destruição da matéria orgânica. Dessa forma, há uma recuperação mais expressiva do gás metano, o que também é positivo para a produção/recuperação de energia. A co-digestão é comumente considerada uma das alternativas para o processamento do lodo de esgoto combinado com outros resíduos municipais. Considera-se um único passo de processamento para ambos (o que é positivo do ponto de vista econômico).

Há também uma quantidade significativa de trabalhos (posições 9, 17, 19, 21) cujo foco é o estudo da população microbiana responsável pela digestão anaeróbia do esgoto. Otimizar parâmetros relacionados a esses componentes é essencial para melhorar o processo digestivo, gerando mais metano e contribuindo para a recuperação energética. Ainda, há grande ênfase em processos de digestão anaeróbia a partir de reatores biológicos de membrana (MBR). Os artigos 2, 4, 5, 8 e 11 focam neste tema, e é importante observar precisamente os anos de publicação dos trabalhos – 2011, 2014, 2014, 2014 e 2012, respectivamente. MBR é uma tecnologia relativamente nova (assim como são as publicações mais citadas nesse campo) e ainda pouco explorada em escala precisa devido à sua eficiência na digestão e produção de biogás.

A Figura 2-7 apresenta dois gráficos que mostram os periódicos nos quais os 22 artigos da microanálise foram publicados, o primeiro com o número total de publicações, e o segundo, o total de citações.

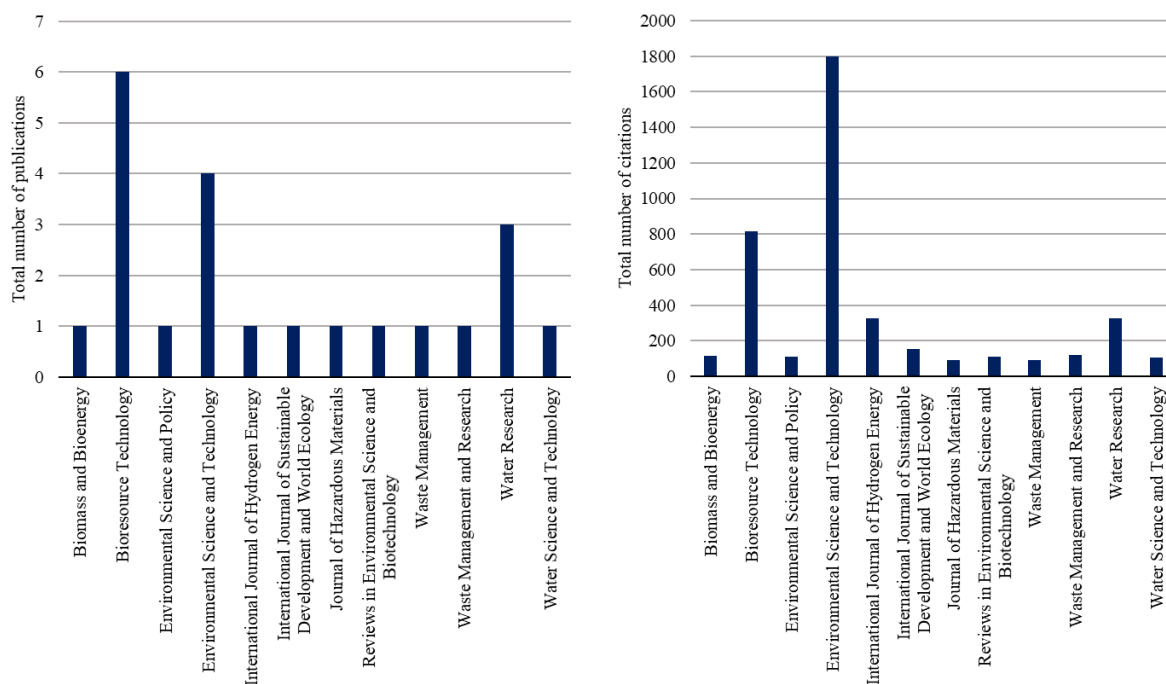


Figura 2-7 Número total de publicações e citações dos periódicos que estão entre as 22 publicações mais citadas (entre as selecionadas para este estudo).

Observa-se que o periódico *Bioresource Technology* possui o maior número de publicações entre os mais citados, sendo o segundo maior no total de citações. Da mesma forma, *Environmental Science and Technology* detém o maior número de citações, ficando em segundo lugar no número de artigos entre os 22 mais citados. Deve-se enfatizar que ambas as revistas são focadas em tecnologias, um dos principais pilares para o desenvolvimento e promoção dos processos de recuperação de energia a partir do biogás.

Os periódicos responsáveis pela publicação de 10% dos artigos mais citados estão relacionados a temas como biomassa e bioenergia, recursos biológicos, ciências e políticas ambientais, desenvolvimento sustentável, ecologia, materiais perigosos, gestão de resíduos, pesquisa e ciências da água.

No entanto, foram observadas poucas palavras com maior foco na recuperação de energia e/ou sustentabilidade nos sistemas estudados. Na maior parte, a recuperação de energia é tratada como um foco secundário, apontada principalmente como um ponto positivo gerado pela melhoria da eficiência do processo. Isso indica que a busca por essa recuperação energética segue um fluxo semelhante ao representado na Figura 2-8.

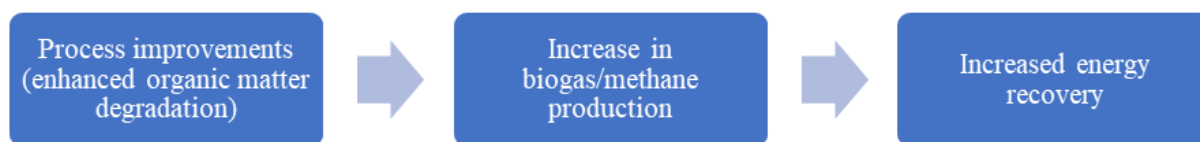


Figura 2-8 Fluxo do foco na recuperação de energia em pesquisas sobre recuperação de energia do biogás no tratamento de esgoto doméstico em ETEs.

Considerando o alarmante cenário de mudanças climáticas, a tendência nos próximos anos deve mudar. Por exemplo, os acordos climáticos mais recentes assinados mundialmente, com ênfase no Global Methane Pledge, assinado em 2021 por 103 países para reduzir as emissões de CH₄ em até 30% até 2030 (EC, 2021). Outro exemplo é o Pacto Climático de Glasgow, documento produzido na Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática de 2021 (COP26), que estabelece que o uso de combustíveis fósseis deve ser gradualmente reduzido, considerando também uma redução de 45% nas emissões de dióxido de carbono até 2050 (UNFCCC, 2021).

Quanto ao dióxido de carbono, deve-se levar em conta que, embora presente em menores quantidades no biogás, este ainda representa uma parte significativa do produto gerado pela digestão anaeróbia. Além disso, grande parte do biogás produzido nos sistemas de tratamento de esgoto é queimado, transformando o metano em CO₂, que é então liberado na atmosfera, contribuindo para o aumento das emissões de gases.

2.4. CONCLUSÕES

Com base em uma revisão bibliométrica, este trabalho teve como objetivo analisar a literatura científica sobre a recuperação de energia do biogás proveniente do esgoto em ETEs domésticas nas últimas cinco décadas. Sob os aspectos práticos, alguns pontos se destacam.

Embora o MBR se apresente como uma tecnologia relativamente nova e ainda pouco explorada em escala precisa, destaca-se em termos de pesquisa científica, tendo potencial de uso devido à eficiência no processo de digestão, bem como na produção de biogás. Também há uma tendência significativa em pesquisas relacionadas à recuperação de biogás a partir da co-digestão do esgoto com outros resíduos, com ênfase em resíduos sólidos domésticos, pecuária e podas de jardim. Outro destaque é o desenvolvimento de pesquisas voltadas à recuperação de metano dissolvido, o que é preocupante, pois o gás é emitido para a atmosfera quando os efluentes são descarregados. Essas perdas não representam apenas perda de energia, mas também contribuem para as emissões de GEE.

A recuperação de nutrientes e energia é principalmente motivada pelo aumento do custo da energia e do valor dos nutrientes, destacando a importância dos processos anaeróbios para a recuperação energética e conservação de nutrientes para futuras recuperações.

Embora muitos estudos tenham sido encontrados, o foco principal está na melhoria da eficiência dos processos, sendo a recuperação de energia tratada majoritariamente como um foco secundário. No entanto, observa-se uma tendência ascendente de pesquisas sobre este tema, dado o alarmante cenário das mudanças climáticas e os últimos acordos climáticos assinados mundialmente, que conferem grande foco à redução das emissões de GEE.

REFERENCES

- ABiogás. (2021). *Nota técnica - Potencial de produção de biogás a partir do tratamento de esgoto*. 33.
- Agencia Andaluza de la Energia. (2011). Estudio básico del biogás. In *Consejería de Economía Innovación y Ciencia (CEIC)*.
- Aguilar-Benitez, I., & Blanco, P. A. (2018). Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, 9(2), 86–111. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>
- AMB, À. M. de B. (2022). EDAR del Prat de Llobregat. *AMB – Medi Ambient*. <https://www.amb.cat/web/medi-ambient/aigua/instalacions-i-equipaments/detall/-/equipament/edar-del-prat-de-llobregat/276285/11818>
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., & Conti, D. de M. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2(November 2020), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>
- Battista, F., Frison, N., Pavan, P., Cavinato, C., Gottardo, M., Fatone, F., Eusebi, A. L., Majone, M., Zeppilli, M., Valentino, F., Fino, D., Tommasi, T., & Bolzonella, D. (2020). Food wastes and sewage sludge as feedstock for an urban biorefinery producing biofuels and added-value bioproducts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95(2), 328–338. <https://doi.org/10.1002/jctb.6096>
- Bergek, A., Hekkert, M., Jacobsson, S., Markard, J., Sandén, B., & Truffer, B. (2015). Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and interaction. *Environmental Innovation and Societal Transitions*.

<https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.003>

- Bertolino, A. M., Giganti, P., dos Santos, D. D., & Falcone, P. M. (2023). A matter of energy injustice? A comparative analysis of biogas development in Brazil and Italy. *Energy Research and Social Science*, 105(May). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103278>
- Bhatia, R. K., Ramadoss, G., Jain, A. K., Dhiman, R. K., Bhatia, S. K., & Bhatt, A. K. (2020). Conversion of Waste Biomass into Gaseous Fuel: Present Status and Challenges in India. *Bioenergy Research*, 13(4), 1046–1068. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10137-4>
- Borges, C. P., Sobczak, J. C., Silberg, T. R., Uriona-Maldonado, M., & Vaz, C. R. (2021). A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138(August). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110518>
- Brasil. (2024). *Brasil registra grande número de doenças relacionadas à água sem tratamento*. Assembleia Legislativa Do Estado Do Piauí. <https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/brasil-registra-grande-numero-de-doencas-relacionadas-a-agua-sem-tratamento>
- BRASIL. (2023). *Diagnóstico Temático: Visão Geral do Saneamento no Brasil 2023*. https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf
- Brazil. (2007a). *Balanço Energético Nacional 2007*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-136/topico-112/Versão Completa 2007.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-136/topico-112/Versão_Completa_2007.pdf)
- Brazil. (2007b). *Plano Nacional de Energia 2030*.
- Brazil. (2020a). Atlas Esgotos. ANA - Agência Nacional de Águas.
- Brazil. (2020b). *Plansab - Relatório de Avaliação Anual 2020- Ministério do Desenvolvimento Regional*. 118.
- Brazil. (2022). *Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050*.
- Brazil. (2023a). *BEN_Relatório Síntese_2024_Ano base 2023*. 1–71.
- Brazil. (2023b). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)*. Ministério Das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: SNSA/Ministério Das Cidades.

- Calero, M., Godoy, V., Heras, C. G., Lozano, E., Arjandas, S., & Martín-Lara, M. A. (2023). CURRENT STATE OF BIOGAS AND BIOMETHANE PRODUCTION AND ITS IMPLICATIONS FOR SPAIN. *Energy & Fuels*, 15(7), 3584–3602.
- Capellán-Pérez, I., Campos-Celador, Á., & Terés-Zubiaga, J. (2018). Renewable Energy Cooperatives as an instrument towards the energy transition in Spain. *Energy Policy*, 123(May), 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.064>
- Cardoso, F., & Borschiver, S. (2018). *Roadmap Tecnológico da Biometanização da Palha*. 1596–1611.
- Cardoza, D.; Romero, I. ., Martínez, T.; Ruiz, E.; Gallego, F. J. ., López-Linares, J.C.; Manzanares, P. ., & Castro, E. (2021). Location of Biorefineries Based on Olive-Derived Biomass in Andalusia, Spain. *Energies*, 14, 3052. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en14113052>
- CETAQUA. (2020). *LIFE NIMBUS: Wastewater treatment plant as a nexus of integrated and sustainable management of water, energy and mobility*.
- Chan Gutiérrez, E., Wall, D. M., O'Shea, R., Novelo, R. M., Gómez, M. M., & Murphy, J. D. (2018). An economic and carbon analysis of biomethane production from food waste to be used as a transport fuel in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 196, 852–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.051>
- Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72(May), 103033. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103033>
- CIBiogas. (2021). *O biogás na produção de energia elétrica*. <https://cibiogas.org/blog/o-biogas-na-producao-de-energia-eletrica/>
- CIBiogas Energias Renováveis. (2025). *Panorama do Biogas 2024*.
- Cosmen Junceda, V. (2023). *Impacto de la Guerra Rusia - Ucrania en el sector energético de España*.
- COSTA, D. F. DA. (2006). GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DO TRATAMENTO DE ESGOTO. In *MSc work – Program of Post-Graduation in Energy. University of São Paulo, São Paulo* (pp. 1–176).

- Crone, B. C., Garland, J. L., Sorial, G. A., & Vane, L. M. (2016). Significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: A review. *Water Research*, 104, 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.019>
- De Oliveira, L. G. S., & Negro, S. O. (2019). Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107(December 2017), 462–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.030>
- de Souza, H. P., de Oliveira, W. T. G. H., dos Santos, J. P. C., Toledo, J. P., Ferreira, I. P. S., de Sousa Esashika, S. N. G., de Lima, T. F. P., & de Sousa Delácio, A. (2020). Infectious and parasitic diseases in Brazil, 2010 to 2017: Considerations for surveillance. *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health*, 44, 1–7. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2020.10>
- DIRECTIVA (UE) 2024/3019 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, 0345 (2024).
- EEA- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2023). *Greenhouse gases – viewer*. Greenhouse Gases – Viewer.
- Eijo-Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M. E., Marin, D., Amores, M. J., Aldea, X., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2015). Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 2084–2094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>
- Elzen, B., Mierlo, B. Van, & Leeuwis, C. (2012). Environmental Innovation and Societal Transitions Anchoring of innovations: Assessing Dutch efforts to harvest energy from glasshouses. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 5, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2012.10.006>
- European Commission. (2023). BIOMETHANE FICHE – Spain (2021). *2023 Biomethane Country Fiches*, 2021, 2021–2023. https://energy.ec.europa.eu/document/download/c917c23a-a962-42ef-91b0-91a8b161feb3_en?filename=Biomethane_fiche_ES_web.pdf
- EUROPEAN COMMISSION. (2025). *NON IMPACT BUS – Demonstration of a biological methanation plant for sustainable urban transport. LIFE Project – LIFE19 ENV/ES/000191*.
- Fernandez, R. M. (2018). Conflicting energy policy priorities in EU energy governance. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 8(3), 239–248. <https://doi.org/10.1007/s13412-018-0499->

- Fetting, C. (2020). The European Green Deal. *ESDN Office*, 35, 44–67. [https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705\(35\)2024.ic-03](https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705(35)2024.ic-03)
- Gadirli, G., Pilarska, A. A., Dach, J., Pilarski, K., Kolasa-Więcek, A., & Borowiak, K. (2024). Fundamentals, Operation and Global Prospects for the Development of Biogas Plants—A Review. *Energies*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/en17030568>
- Geels, F. W. (2002). *Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes : a multi-level perspective and a case-study*. 31, 1257–1274.
- Geels, F. W. (2011). Environmental Innovation and Societal Transitions The multi-level perspective on sustainability transitions : Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). *Typology of sociotechnical transition pathways*. 36(August 2003), 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Gomes, F. M. da S., Maria Cristina Carvalho do Espírito Santo, Ronaldo César Borges Gryscek, Maria Rita Bertolozzi, & Francisco Oscar de Siqueira França. (2020). Access to drinking water and sewage treatment in Brazil: a challenge for the control of waterborne infectious diseases. *International Journal of Phytoremediation*, 20(1), 135–136. <https://doi.org/http://doi.org/10.1590/S1678-9946202062071>
- Guimarães, C. M. M., & Galvão, V. (2014). *PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS* (Issue November 2013). <https://doi.org/10.13140/2.1.2790.7200>
- Hidalgo, D., & Martín-Marroquín, J. M. (2015). Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y León Region (Spain). *Food Research International*, 73(2015), 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.044>
- IAGUA. (2019). *A doble vida de la gran depuradora del Llobregat: depurar y reutilizar*. <https://www.iagua.es/blogs/xavi-duran-ramirez/doble-vida-gran-depuradora-llobregat-depurar-y-reutilizar>
- IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y Potencial de Generación de Biogás - Estudio Técnico PER 2011-2020*.
- IEA Bioenergy. (2021). Implementation of bioenergy in Brazil – 2021 update. *IEA Bioenergy*, 12.
- IRENA. (2024). Renewable Capacity Statistics 2024. In *International Renewable Energy Agency*.

- Jørgensen, U. (2012). Mapping and navigating transitions — The multi-level perspective compared with arenas of development. *Research Policy*, 41(6), 996–1010. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.03.001>
- Lam, K. L., & Van Der Hoek, J. P. (2020). Low-Carbon Urban Water Systems: Opportunities beyond Water and Wastewater Utilities? *Environmental Science and Technology*, 54(23), 14854–14861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05385>
- Lauer, M., & Thrän, D. (2018). Flexible biogas in future energy systems-sleeping beauty for a cheaper power generation. *Energies*, 11(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en11040761>
- Lettinga, G., Velsen, A. F. M. V. A. N., & Hobma, S. W. (1980). *Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment , Especially for Anaerobic Treatment. XXII*, 699–734.
- López-Aguilera, A., Morales-Polo, C., Victoria-Rodríguez, J., & Cledera-Castro, M. del M. (2025). Assessment of Biomethane Production Potential in Spain: A Regional Analysis of Agricultural Residues, Municipal Waste, and Wastewater Sludge for 2030 and 2050. *Sustainability (Switzerland)*, 17(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su17104742>
- Madrid Council. (2024). Annual Report VALDEMINGÓMEZ TECHNOLOGY PARK 2022. In *Madrid Environment and Mobility*.
- Markard, J., Suter, M., & Ingold, K. (2016). Socio-technical transitions and policy change - Advocacy coalitions in Swiss energy policy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18, 215–237. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.05.003>
- Max Alberto López-Maciel, Meireles, M., José Villar, André Oliveira, Edimar Ramalho, Fátima Lima...Alves, M. R. (2024). Impact of COVID-19 and Ukraine-Russia Conflict on the National Energy and Climate Strategies of Portugal and Spain. In *2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1–7.
- McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer- can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45(17), 7100–7106. <https://doi.org/10.1021/es2014264>
- Miki, R. E. (2017). XI-079 - PROJETO DE BENEFICIAMENTO DE BIOGÁS PARA USO VEICULAR NA ETE FRANCA DA SABESP: ESTÁGIO ATUAL E ETAPAS FUTURAS. *Congresso ABES-FENASAN, I*, 1–12.

- Miki, R. E. (2018). Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso como combustível veicular. *Revista DAE*, 66. <https://doi.org/10.4322/dae.2017.021>
- Miki, R. E., Reami, L., & Cason, M. M. de A. (2019). Produção de biometano de biogás de Estação De Tratamento De Esgoto : Implantação do projeto e resultados preliminares. *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1, 1–13.
- MITECO. (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. *Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico, Gobierno de España*, 25. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
- MITECO. (2021). *Hoja de ruta del biogas*. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-miteco-saca-a-información-pública-la-propuesta-de-hoja-de-ruta-del-biogás-/tcm:30-529298>
- MITECO. (2025). *Inventario de instalaciones de Tratamiento de Águas Residuales en España capacidade acima de 100.000 H.E.* PRTR España- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Poluentes. <https://prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>
- Montoya, F. G., Aguilera, M. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Renewable energy production in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33(May), 509–531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.091>
- Morales-Polo, C., Cledera-Castro, M. D. M., Revuelta-Aramburu, M., & Hueso-Kortekaas, K. (2021). Bioconversion process of barley crop residues into biogas—energetic-environmental potential in Spain. *Agronomy*, 11(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040640>
- Mukeshimana, M. C., Zhao, Z. Y., Ahmad, M., & Irfan, M. (2021). Analysis on barriers to biogas dissemination in Rwanda: AHP approach. *Renewable Energy*, 163, 1127–1137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.051>
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. A. (2021). Recent advances in renewable energy technology for the energy transition. *Renewable Energy*, 179, 877–884. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.111>
- Paula, A., Luisa, A., Carvalho, G. De, Aparecida, T., Silva, C., João, N., & Bonomo, B. (2024). *ENERGIAS VERDES: A BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA NO BRASIL Leandro Teófilo Pinto dos Reis 3 Luiz Daniel Albuquerque Dias 7*. 1–9.
- Peral, D., Sánchez, J., López, P., Vallés, F., & Fernández, P. (2023). Promoting sustainable growth and self-production of energy through the water industry, as key elements for climate change

- action. In *Natural Resources Forum, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.*, 47(4), 747–771.
- Pereira, E., Santos, J., Gabriel, E., Sousa, M. H. De, Dutra, E. D., Samuel, A., & Sales, A. T. (2023). *Northeast Region*. 1–18.
- PRTR España. (2014). *EDAR El Prat de Llobregat*. Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=6444
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., & Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7(JAN), 23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106>
- Raven, R. P. J. M., & Geels, F. W. (2010). Socio-cognitive evolution in niche development: Comparative analysis of biogas development in Denmark and the Netherlands (1973-2004). *Technovation*, 30(2), 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.08.006>
- REE. (2024). *Red Eléctrica Española. Informe del Sistema Eléctrico – Informe resumen de energías renovables 2023*. 1–2. https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2024-03/Informe_Renovables_2023.pdf
- Reyes, L., Zwagers, W. A., & Mulder, I. J. (2020). *Considering the Human-Dimension to Make Sustainable Transitions Actionable*.
- Rietow, J. C., Aisse, M. M., Baréa, L. C., Andreoli, C. V., & Possetti, G. R. C. (2023). Consolidation of the technology UASB reactors in the state of Paraná for the treatment of sanitary sewage. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 28, 1–12. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220298>
- Rip A; Kemp R. (1998). Technological Change. In *Rayner S, Malone L (eds.). Human choice and climate change. Volume II Resources and Technology. Washington D.C: Batelle Press* (Issue June, p. 74).
- Rosa, A. P., Lobato, L. C. da S., Borges, J. M., de Melo, G. C. B., & Chernicharo, C. A. de L. (2016). Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: Estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(2), 315–328. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>
- Rotmans, J., Kemp, R., & Van Asselt, M. (2001). Emerald Article: More evolution than revolution: transition management in public policy Jan Rotmans, René Kemp, Marjolein van Asselt. *Foresight*, 3(1), 15–31.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2019). *Portal Tratamento*

de Água. Sabesp conquista prêmio do BID por projeto de economia circular em Franca/SP.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2022). *Fertilizante SABESP FÉRTIL*. <https://www.sabesp.com.br/assets/images/folhetos/sabesp-fertil.pdf>

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2023). Anexo Técnico II – Contrato de Programa do Município de Franca (versão completa). *Franca, SP: Sabesp*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxbhq.9>

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2024). *Relatório de sustentabilidade 2023*.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2025). *Relatório de Sustentabilidade 2024*.

Salomon, K. R., & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33(9), 1101–1107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>

Sedigas. (2023). *Estudio De La Capacidad De Producción De Biometano En España*.

SEMIL, Secretaria de Meio Ambiente, I. e L. do E. de S. P. (2024). *Semil realiza visita técnica na única estação que gera energia do esgoto de SP*. <https://semil.sp.gov.br/2024/03/semil-realiza-visita-tecnica-na-unica-estacao-de-tratamento-de-sao-paulo-que-gera-energia-do-esgoto/>

Smith, A., Stirling, A., & Berkhout, F. (2005). *The governance of sustainable socio-technical transitions*. 34, 1491–1510. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.07.005>

SNIRH, S. N. de I. sobre R. H. (2015). *ATLAS ESGOTOS: DESPOLUIÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS – SISTEMA EXISTENTE - FRANCA*. https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/São_Paulo/Sistema_Atual/Franca.pdf

Urbina, A. (2014). Solar electricity in a changing environment: The case of Spain. *Renewable Energy*, 68, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.005>

Urrea Vivas, M. A., Seguí-Amórtégui, L., & Guerrero-García-Rojas, H. (2025). Analysis of greenhouse gas production at the El Prat del Llobregat wastewater treatment plant, Spain: the decarbonization challenge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10415–10432. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06338-z>

Venkatesh, G., & Elmi, R. A. (2013). Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case

study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). *Energy*, 58, 220–235.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.025>

Welfle, A. (2017). Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*, 105(2017), 83–95.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>

Zhang, Q., Smith, K., Zhao, X., Jin, X., Wang, S., Shen, J., & Ren, Z. J. (2021). Greenhouse gas emissions associated with urban water infrastructure: What we have learnt from China's practice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(4), 1–24.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1529>

Zhen Xin Phuang, Zuchao Lin, Peng Yen Liew, Marlia Mohd Hanafiah, K. S. W. (2022). The dilemma in energy transition in Malaysia: A comparative life cycle assessment of large scale solar and biodiesel production from palm oil. *Journal of Cleaner Production*, 350.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131475>

CAPÍTULO 3: RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL: UMA PERSPECTIVA MULTINÍVEL SOBRE A TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA

Resumo: As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) possuem significativo potencial para a recuperação energética do biogás, contribuindo tanto para a sustentabilidade ambiental quanto para a viabilidade econômica. Este estudo aplica o arcabouço da Perspectiva Multinível (Multi-Level Perspective), abordagem amplamente utilizada nos estudos de transição que conceitua a mudança tecnológica em três níveis interdependentes: a paisagem sociotécnica (pressões externas que moldam as transições), o regime sociotécnico (sistemas e regulamentações estabelecidos) e os nichos tecnológicos (inovações emergentes). Por meio de análise documental, o estudo examina a transição tecnológica da recuperação energética do biogás no Brasil, desde a década de 1970 até o presente. Os resultados indicam que o potencial de produção de biogás das ETEs brasileiras alcança 493 milhões de Nm³/ano, com capacidade de conversão de 1,18 milhão de MWh de eletricidade ou 375 milhões de Nm³ de biometano. Apesar desse potencial, a adoção do biogás tem ocorrido de forma lenta devido a barreiras regulatórias, econômicas e de infraestrutura. O estudo identifica três fases-chave da transição: (i) experimentação inicial (1970–1990), (ii) projetos-piloto impulsionados por regulamentações (2000–2010) e (iii) a fase atual de expansão (após 2013), caracterizada por incentivos políticos como o RenovaBio e a compensação de energia elétrica (net metering). A novidade deste estudo reside na avaliação sistemática da transição tecnológica do biogás nas ETEs brasileiras, oferecendo evidências empíricas sobre seu atual estágio de “decolagem” e apresentando um cronograma que indica que, em um cenário otimista, o país poderia alcançar a fase de aceleração até 2033, enquanto, em um cenário mais realista, isso ocorreria até 2043.

Palavras-chave: Bioenergia, Biomassa, Economia Circular, Metano, Transições Tecnológicas.

3.1. INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) podem desempenhar um papel fundamental na geração de bioenergia, oferecendo soluções viáveis para questões urgentes, como a crise energética, a redução de custos associados à destinação final de resíduos orgânicos, a expansão de fontes renováveis de energia e a promoção da descarbonização. Além disso, o aproveitamento de resíduos orgânicos para a produção de energia representa oportunidades de negócios significativas, com potenciais receitas e economia de custos, seja por meio do mercado de créditos de carbono

(Salomon & Silva Lora, 2009; Fine & Hadas, 2012; Hua et al., 2018; World Bank, 2019), da recuperação de combustíveis para o setor energético (Puyol et al., 2017) ou da geração de eletricidade (World Bank, 2019).

Nesse contexto, estudos recentes reforçam a importância do tema. Por exemplo, Aguilar-Benitez e Blanco (2017) demonstraram que a recuperação de energia a partir da digestão anaeróbia do lodo de esgoto pode não apenas reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas ao tratamento de lodo, mas também contribuir significativamente para a geração de eletricidade. O metano recuperado poderia suprir 14% da eletricidade consumida pelas ETEs, aumentando, assim, sua eficiência energética. De forma semelhante, Lam e Van Der Hoek (2020) exploram as possibilidades de as companhias de abastecimento urbano de água e tratamento de esgoto atingirem baixos níveis de carbono ou até mesmo neutralidade carbônica. Essas possibilidades incluem melhorias na eficiência energética operacional, maior aproveitamento do biogás, captura de emissões fugitivas, otimização de processos de tratamento e integração de fontes renováveis na geração de eletricidade.

Apesar do crescente corpo de pesquisas sobre recuperação de energia em ETEs, o tema frequentemente recebe atenção secundária, e seu potencial é subestimado (Porto et al., 2023). Além disso, quase uma década se passou desde a publicação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e do Acordo de Paris, mas as tendências atuais permanecem predominantemente moldadas por atores estabelecidos e fortemente influenciadas por mecanismos de “lock-in” que perpetuam trajetórias insustentáveis (Loorbach et al., 2017).

Richardson et al. (2023) examinaram os riscos associados à transgressão das fronteiras planetárias, que delimitam os limites de perturbação antrópica que a Terra pode tolerar sem comprometer os sistemas de suporte à vida. Os autores alertam que ignorar essas fronteiras compromete os esforços para atender aos objetivos climáticos globais estabelecidos no Acordo de Paris (Richardson et al., 2023), cujo objetivo mais crítico é a redução das emissões de GEE (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Isso reforça a urgência de uma transição energética para sistemas de baixo carbono, voltada a reduzir emissões e promover mudanças transformacionais (Geels, 2017). Nesse sentido, Creutzig et al. (2018) destacaram a importância de soluções no lado da demanda, como a alteração de padrões de consumo e o aumento da eficiência energética, para mitigar as mudanças climáticas e alcançar as metas globais de sustentabilidade.

Diante desses desafios, é fundamental repensar a abordagem tradicional da produção de biogás em ETEs. Em vez de ser considerado um aspecto marginal do processo de tratamento, a produção de biogás deve ser reconhecida como uma oportunidade estratégica que oferece benefícios

duplos. Ao priorizar a recuperação de energia como um componente central, as ETEs podem se transformar em unidades de produção de energia renovável, contribuindo assim para a transição energética e impulsionando a economia circular (Salomon & Silva Lora, 2009; Fine & Hadas, 2012; Puyol et al., 2017; Hua et al., 2018). Essa abordagem visa não apenas reduzir emissões em setores críticos, mas também aumentar a eficiência energética por meio da substituição de fontes poluentes (Brignol et al., 2016; Ítalo Freire et al., 2023), alinhando-se, assim, às fronteiras planetárias e promovendo um desenvolvimento mais sustentável.

A presença de diversos fatores que poderiam facilitar a recuperação de energia a partir do biogás em ETEs, quando comparados aos cenários operacionais atuais, levanta a questão: quais são as lacunas existentes entre o potencial teórico e a implementação prática nessa área? Em outras palavras, parece haver um distanciamento entre os sistemas de pesquisa idealizados e as condições reais nas quais eles deveriam ser aplicados (Trickett, 2009). Essa lacuna tem levado vários estudiosos a investigar, sob diferentes perspectivas, os fatores que influenciam os processos de transição tecnológica (TT), buscando identificar estratégias que revelem as interconexões entre os componentes tecnológicos e os contextos sociais, culturais, econômicos e políticos mais amplos — elementos que, juntos, formam o sistema sociotécnico (Geels, 2002, 2011; Elzen et al., 2012; Jørgensen, 2012; Bergek et al., 2015; Reyes et al., 2020). Compreender essas dinâmicas permite formular padrões que fornecem subsídios valiosos para a tomada de decisão, impulsionando efetivamente o processo de TT.

Há diversos estudos anteriores que avaliaram a TT no contexto do biogás, focando em aspectos como a transformação de sistemas de baixo carbono e as interações entre nichos e regimes. Um exemplo é o trabalho de Raven e Geels (2010), que analisou o desenvolvimento do biogás na Dinamarca e nos Países Baixos entre 1973 e 2004, utilizando a perspectiva de evolução sociocognitiva para explicar as diferenças nos padrões de desenvolvimento nesses países. Os autores destacaram como a transição do biogás, com seus altos e baixos, foi influenciada por aspectos sociais e cognitivos, o que pode ser relevante para compreender o processo de adoção de tecnologias de biogás em ETEs. Além disso, Geels (2017) apresentou a Perspectiva Multinível (Multi-Level Perspective – MLP), que oferece um arcabouço mais abrangente para entender transformações em sistemas de baixo carbono, incluindo a interação entre nichos e regimes, e enfatiza desafios atuais da pesquisa em transições sociotécnicas. Já Hoffman (2013) focou na transição para energias renováveis, como a energia eólica na Dinamarca, mostrando como processos de aprendizado e experimentação podem superar barreiras institucionais e gerar soluções inovadoras — conceito que também pode ser aplicado à produção de biogás em ETEs.

Adicionalmente, Ahlborg (2017) explorou o conceito de poder nas transições energéticas, enfatizando a importância de compreender as relações de poder na mudança tecnológica, o que pode ser útil ao investigar como diferentes interesses moldam a adoção do biogás nos sistemas de tratamento de esgoto. Esses estudos sugerem que a transição para a recuperação de biogás em ETEs pode ser vista como parte de um movimento mais amplo de transformação dos sistemas energéticos e ambientais, envolvendo desafios e dinâmicas inerentes às transições sociotécnicas.

A geração de biogás no tratamento de esgoto e os dados associados à recuperação de energia ainda são pouco explorados na literatura (Stazi & Tomei, 2018; Porto et al., 2023). Nesse contexto, avançar as pesquisas sobre recuperação de energia do biogás é urgente, especialmente no que se refere à integração efetiva dessas tecnologias tanto em sistemas de tratamento existentes quanto em novas instalações (Chrispim et al., 2021). Além disso, é essencial analisar desafios como a viabilidade econômica em contextos de baixa produção (Ferrari et al., 2024), a falta de padronização e as dificuldades de integração às redes urbanas de energia (Cortez et al., 2020), bem como barreiras regulatórias que dificultam a expansão do biogás como fonte energética amplamente acessível (Brasil, 2015).

Apesar dos avanços nas discussões sobre esses desafios, ainda existe uma lacuna entre o potencial teórico e a implementação prática nas ETEs, particularmente no Brasil. De acordo com a ABiogás (2022), a rede de esgoto do país tem um potencial estimado de produção de biogás de 493 milhões de Nm³ por ano, mas as ETEs atualmente geram apenas 22,88 milhões de Nm³/ano — apenas 4% desse potencial. Estudos anteriores abordaram aspectos de transições tecnológicas e interações entre nichos e regimes no setor de biogás (Raven & Geels, 2010; Geels, 2017; Hoffman, 2013; Ahlborg, 2017), mas ainda não há uma investigação específica sobre sua aplicação nos sistemas de tratamento de esgoto.

Assim, este estudo tem como objetivo examinar os padrões e mecanismos que dificultam ou impulsionam o desenvolvimento da transição tecnológica (TT) associada à recuperação de energia do biogás, contribuindo para o avanço do conhecimento em um setor crítico para a sustentabilidade energética e ambiental. O objetivo é analisar a TT associada à recuperação de energia do biogás em ETEs a partir de três dimensões distintas que influenciam transições sustentáveis: a paisagem sociotécnica, os regimes sociotécnicos e os nichos tecnológicos. Para ilustrar a utilidade da abordagem metodológica aplicada, o Brasil foi considerado como estudo de caso.

A partir desse estudo de caso, busca-se responder às seguintes questões: Como a TT relacionada à recuperação de energia do biogás em ETEs se desenvolve no contexto brasileiro? Quais são os padrões e mecanismos específicos que impulsionam os processos de TT relacionados à

recuperação de energia do biogás em ETEs no Brasil? Em que estágio de desenvolvimento se encontram os diferentes níveis da TT em relação à recuperação de energia do biogás em ETEs no Brasil? Por fim, a MLP é um arcabouço adequado para analisar o processo de TT no contexto da recuperação de energia do biogás em ETEs no Brasil?

Este estudo contribui para a literatura nas seguintes áreas-chave: Embora o arcabouço MLP já tenha sido aplicado para estudar transições sustentáveis em diversos setores, sua aplicação no contexto da recuperação de energia do biogás é inédita. Ao focar no Brasil como estudo de caso, o artigo oferece percepções empíricas sobre o estado da TT em um contexto de país em desenvolvimento. Isso contribui para o conhecimento regional e fornece recomendações de políticas para países que enfrentam desafios semelhantes, como barreiras institucionais, restrições financeiras e lacunas tecnológicas. O estudo também avalia criticamente se o arcabouço MLP é adequado para analisar a TT na recuperação de energia do biogás em ETEs, contribuindo para avanços metodológicos nos estudos de transição. Finalmente, o trabalho amplia o entendimento sobre como transições sociotécnicas na infraestrutura de saneamento podem apoiar sistemas sustentáveis e circulares, aspecto crucial para o alcance das metas de sustentabilidade no setor de água.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo empregou uma abordagem qualitativa para analisar as TT relacionadas à recuperação energética do biogás em ETEs, utilizando o Brasil como estudo de caso.

3.2.1. Caracterização da área de estudo

O Brasil, com uma população superior a 213 milhões de habitantes, é o maior país da América do Sul e o quinto maior do mundo, abrangendo uma área de aproximadamente 8,5 milhões de quilômetros quadrados (BRASIL, 2022a). No que diz respeito ao saneamento básico, o Brasil ainda enfrenta desafios significativos. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cobertura de água potável alcança 84,9% da população, enquanto a coleta de esgoto está disponível para 56%. Destes, o tratamento de águas residuárias é realizado em apenas cerca de 52% das áreas atendidas (BRASIL, 2023a), evidenciando lacunas na infraestrutura e na eficiência dos sistemas de tratamento. A falta de recursos e as disparidades significativas entre regiões urbanas e rurais dificultam a universalização dos serviços de saneamento no país. Áreas remotas, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, enfrentam dificuldades adicionais, como acesso limitado a serviços básicos de saneamento e dependência de soluções alternativas (ABiogás, 2021). A gestão das águas residuárias no Brasil é predominantemente realizada por empresas

públicas. Em muitos estados, entidades financeiras federais e outras instituições financiam projetos destinados à ampliação da infraestrutura de saneamento.

3.2.2.Métodos

Entre os diversos métodos para análise da TT, o Modelo de Perspectiva Multi-Nível (MLP) foi selecionado devido à sua capacidade de elucidar os processos de transição e inovação dentro de sistemas sociotécnicos. O MLP considera as transições como fenômenos não lineares que emergem das interconexões e interdependências entre três níveis analíticos. O mais amplo desses níveis é a paisagem sociotécnica exógena, que engloba forças externas como políticas globais, mudanças culturais e crises econômicas. Esses fatores exercem pressão sobre os dois níveis sociotécnicos inferiores: o regime e o nicho (Geels & Schot, 2007). O segundo nível, o regime sociotécnico, é definido como um conjunto de regras e práticas que orientam e coordenam as atividades dos grupos sociais. É o nível mais resistente à mudança, pois envolve práticas enraizadas e interesses consolidados que asseguram a estabilidade do sistema sociotécnico existente (Geels, 2004). O nível final é o nicho tecnológico, frequentemente descrito como "espaços protegidos", tais como laboratórios de inovação (Rip A. & Kemp R., 1998), onde inovações radicais são geradas. Os nichos desempenham papel crítico nas transições, pois fornecem as condições iniciais para a mudança sistêmica e oferecem uma plataforma para o desenvolvimento de redes sociais que apoiam e sustentam as inovações (Geels, 2002, 2011; Geels & Schot, 2007).

Geels (2011) apresentou três justificativas chaves para caracterizar as transições sustentáveis como distintas de outros tipos de transições. Primeiro, sua demanda surge da necessidade de enfrentar desafios ambientais persistentes. Segundo seus impactos econômicos frequentemente as tornam menos imediatamente atraentes, pois podem não gerar retornos financeiros rápidos. Terceiro, no que tange aos domínios empíricos, as transições sustentáveis são mais urgentemente necessárias em setores como transporte, energia e agroalimentar, onde grandes corporações predominam. O autor enfatizou que a participação dessas grandes empresas poderia acelerar significativamente o progresso das inovações ambientais, especialmente se elas alavancarem seus ativos e recursos complementares para apoiar tais inovações (Geels, 2011).

Mecanismos de bloqueio que dificultam a adoção de inovações, tais como economias de escala, custos afundados em maquinário e infraestrutura, compromissos institucionais, crenças e discursos arraigados, dinâmicas de poder e lobby político por atores estabelecidos, servem para estabilizar sistemas insustentáveis existentes (Unruh & Einstein, 2000; Loorbach et al., 2017; Köhler et al., 2019). O desafio político, portanto, reside em transformar esses regimes em

configurações mais sustentáveis (Berkhout et al., 2005) e em compreender como as inovações ambientais podem substituir, alterar ou reconfigurar sistemas predominantes (Geels, 2011; Köhler et al., 2019). Nesse contexto, o MLP emerge como um arcabouço valioso para analisar transições sociotécnicas rumo à sustentabilidade (Geels, 2011).

Os níveis sociotécnicos são sistemas interdependentes, conectados por fluxos contínuos e recíprocos de influência (Bergek et al., 2015). A Figura 3-1 ilustra essa interconexão entre os três níveis analíticos por meio de setas bidirecionais, representando as interações dinâmicas entre a paisagem sociotécnica, o regime e o nicho. A pesquisa foi conduzida com base em uma abordagem temporal, na qual os achados foram organizados para construir uma linha do tempo de eventos e transformações.

Nesse processo, destacam-se mecanismos contínuos de feedback entre esses elementos — eventos na paisagem sociotécnica geram desenvolvimentos no regime ou no nicho, e vice-versa. Esses mecanismos são essenciais para entender como as transições ocorrem de maneira não linear, bem como como fatores históricos e contemporâneos interagem para moldar o avanço das tecnologias de biogás em ETEs.

A pesquisa baseou-se em análise documental, focando em eventos-chave e fatores que moldaram o cenário da transição tecnológica. Embora não exaustiva, essa análise foi conduzida seletivamente a partir de diversas fontes, incluindo legislação, documentos governamentais, relatórios técnicos e oficiais, e artigos acadêmicos (Tabela 1). O período de análise abrange de 1970 a 2024, fornecendo um contexto histórico essencial para a compreensão das dinâmicas observadas.

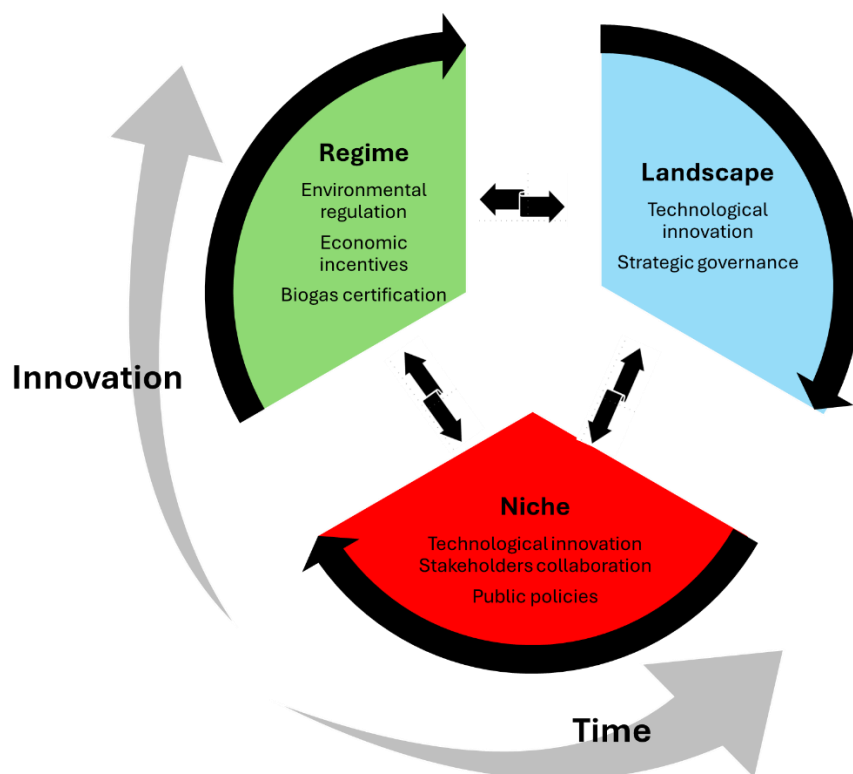


Figura 3-1 Esquema metodológico para a caracterização da transição tecnológica (TT) na recuperação de biogás em ETEs no Brasil.

Nota: Os elementos que compuseram a pesquisa nos níveis sociotécnicos incluem, na paisagem, o surgimento das tecnologias de recuperação de biogás, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, matriz e balanço energético, potencial e dados de produção de biogás, e a capacidade instalada das plantas de recuperação. No regime, foram consideradas leis e regulamentos específicos, programas de apoio às tecnologias de biogás, metas para energias renováveis, subsídios, deduções fiscais, tarifas e certificações de qualidade do biogás. No nicho, foram analisados atores como instituições governamentais e de pesquisa, ONGs, empresas do setor energético, companhias de saneamento e operadores de ETEs.

A Tabela 1 organiza os aspectos essenciais da pesquisa de forma estruturada, destacando os níveis sociotécnicos analisados, os elementos investigados em cada nível e os documentos utilizados para a análise.

Tabela 3-1 Quadro Analítico dos Níveis Sociotécnicos, Elementos Investigados e Fontes Documentais Utilizadas na Pesquisa.

Nível Analítico	Descrição	Elementos do Estudo	Documentos Analisados
Paisagem Sociotécnica	Fatores externos que influenciam a transição tecnológica: políticas globais, crises econômicas e desafios ambientais.	Crises econômicas e seus impactos no setor energético; Incentivos para promoção do biogás; Investimentos em pesquisa e desenvolvimento; Desafios ambientais e suas implicações; Matriz e balanço energético nacional; Potencial de produção de biogás; Capacidade instalada das plantas de recuperação de biogás.	Relatórios de instituições globais de energia; Legislação sobre energias renováveis; Relatórios técnicos e oficiais; Artigos acadêmicos sobre transições tecnológicas.
Regime Sociotécnico	Conjunto de regras, normas e práticas estabelecidas que estruturam o sistema sociotécnico e influenciam sua estabilidade ou mudança.	Leis e regulamentos específicos sobre biogás; Programas de incentivo às tecnologias de biogás; Metas para energias renováveis; Subsídios, incentivos fiscais e tarifas regulatórias; Certificações de qualidade do biogás.	Documentos governamentais e regulatórios; Relatórios técnicos e oficiais; Políticas públicas sobre energia e biogás; Legislação sobre energias renováveis; Acordos ambientais internacionais.
Nicho Tecnológico	Ambientes protegidos de inovação onde novas tecnologias são desenvolvidas e testadas antes da possível integração ao regime dominante.	Papel dos atores-chave no desenvolvimento do setor; Inovações tecnológicas aplicadas ao biogás; Parcerias estratégicas e colaboração intersetorial; Barreiras e desafios operacionais.	Artigos acadêmicos sobre inovação tecnológica; Relatórios de organizações de pesquisa e desenvolvimento; Documentos de ONGs atuantes no setor; Relatórios técnicos e oficiais.

O processo gradual e contínuo de uma transição pode ocorrer com variações na escala da mudança e no período em que essas mudanças acontecem. As transições envolvem uma gama de possíveis caminhos de desenvolvimento, cuja direção, escala e velocidade são influenciadas pelo regime sociotécnico, mas nunca totalmente controladas (Rotmans et al., 2001).

Conceitualmente, podemos distinguir quatro níveis de TT, que são: o nível um, chamado pré-desenvolvimento (“predevelopment”), onde pequenos experimentos com inovações radicais surgem em nichos periféricos, mas sem impacto significativo no regime dominante; no nível dois, denominado decolagem (“take-off”), tecnologias de nicho começam a ganhar atenção e encontram

oportunidades de crescimento; no terceiro nível, avanço decisivo (“breakthrough”), forças internas ao nicho podem levar a melhorias em preço/desempenho, expansão de inserção e escala, com mudanças estruturais no regime sociotécnico; e, finalmente, por meio de ajustes em infraestruturas, políticas e estilos de vida, a nova tecnologia se torna dominante e substitui a anterior, levando ao quarto nível de consolidação ou estabilização (“stabilization”) da TT (Rotmans et al., 2001; Geels & Schot, 2007).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Brasil, o biogás tem sido utilizado para a produção de energia por mais de 50 anos, remontando à sua incorporação ao modelo da "revolução verde" durante a década de 1970, quando a crise do petróleo dessa época impulsionou globalmente a diversificação das fontes energéticas, resultando em uma série de iniciativas voltadas para a melhoria da eficiência energética (CETESB, 2006). Em meio a essa crise energética, o Brasil importava cerca de 70% do petróleo bruto consumido (BRASIL, 2017, 2024a), conforme ilustrado na Figura 3-2. Em resposta, o governo brasileiro implementou uma estratégia de resiliência destinada a reduzir significativamente a dependência do petróleo estrangeiro, ao mesmo tempo em que explorava soluções energéticas alternativas.

Entre as estratégias para reduzir a dependência energética do Brasil, o biogás destacou-se como uma opção viável, devido à significativa produção de biomassa proveniente das atividades agrícolas no país. Consequentemente, em 1977, foi criado o Projeto de Difusão do Biogás, desenvolvido pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) e implementado no Estado de São Paulo e no Distrito Federal (Karlsson et al., 2014). Em novembro de 1979, um dos primeiros biodigestores do país foi construído na Granja do Torto, residência oficial da Presidência da República em Brasília (BRASIL, 1985; Palhares, 2007). Esse projeto pioneiro demonstrou a viabilidade da produção de biogás a partir da fermentação de resíduos animais, o que incentivou o governo a incluir o biogás como alternativa energética no Programa de Mobilização Energética (PME) (BRASIL, 1982). A menção ao biogás no final dos artigos do Decreto nº 87.079 reflete seu status emergente na época. Embora o biogás fosse reconhecido pelo seu potencial para compor uma matriz energética diversificada, ainda se encontrava em estágios iniciais de desenvolvimento, sem o suporte e promoção necessários para alcançar seu pleno potencial.

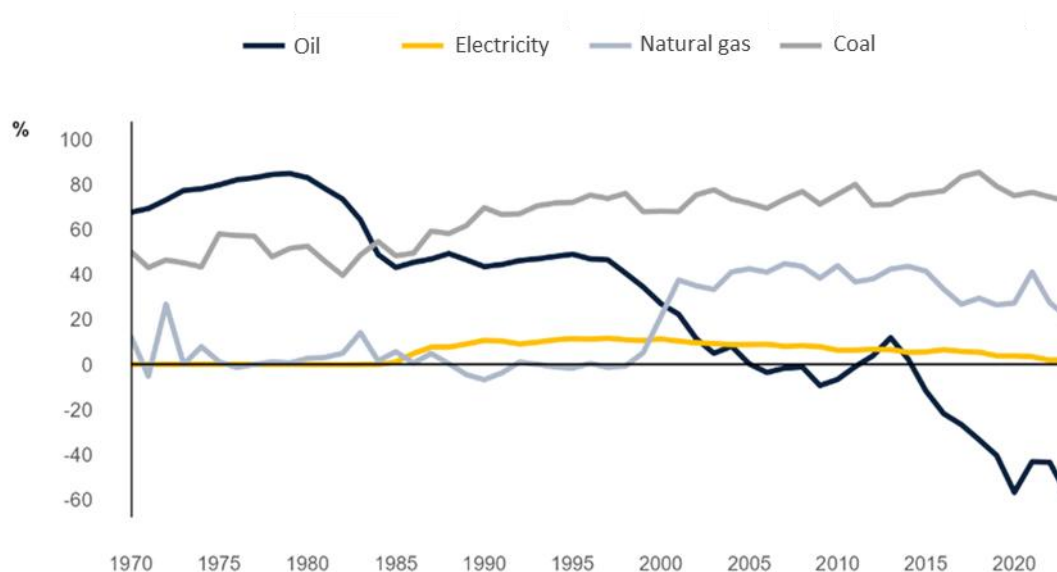


Figura 3-2 Série histórica da dependência energética no Brasil (1970-2020).

Fonte: Relatório Consolidado do Balanço Energético Nacional – BEN.

3.3.1.Fase 1 - Energia Alternativa Urgente: Combatendo a Crise de Demanda no Brasil

Naquele período, milhares de biodigestores foram instalados nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. No entanto, desafios operacionais, especialmente a falta de informação e capacitação, resultaram em baixa eficiência dos sistemas, levando muitos produtores rurais a abandonarem a tecnologia (Palhares, 2007; De Oliveira & Negro, 2019; Abiogás, 2022). Além disso, outros fatores técnicos dificultaram a expansão e competitividade das iniciativas do PME, como a ausência de condensadores para remoção de água e filtros para mitigar gases corrosivos produzidos no processo de biodigestão. Ademais, a desvantagem econômica do biogás — em comparação com a eletricidade e o gás liquefeito de petróleo (GLP), disponíveis a baixo custo — dificultou ainda mais o avanço do projeto (Karlsson et al., 2014).

Na década de 1980, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) tornou-se pioneira no Brasil ao implementar a recuperação energética do biogás em suas ETEs. Na estação Bom Retiro, em Londrina/PR, o biogás produzido era utilizado como combustível para a frota própria da companhia, enquanto em Pirai do Sul/PR, era purificado e usado como gás de cozinha distribuído para os moradores locais. Essas iniciativas demonstraram inovação e o potencial do biogás como fonte de energia sustentável (SANEPAR, 2021). Contudo, esses projetos enfrentaram desafios significativos, como os elevados custos das tecnologias de purificação e compressão disponíveis na época, além dos baixos preços dos combustíveis fósseis, que tornavam o biogás menos competitivo economicamente. O contexto econômico brasileiro — marcado por crises recorrentes, hiperinflação

e instabilidade financeira — também dificultou a continuidade das iniciativas que demandavam longos períodos para retorno financeiro.

Paralelamente às iniciativas com biogás, foi lançado em 14 de novembro de 1975 o Programa Nacional do Alcool (Pró-Alcool), regulamentado pelo Decreto nº 76.593. O programa visava estimular a produção de etanol para atender à crescente demanda interna e externa, além de ser uma resposta estratégica à crise dos combustíveis automotivos. Naquela época, o preço do açúcar no mercado internacional estava em forte queda, tornando economicamente vantajoso o desvio da produção do açúcar para o álcool.

A primeira fase foi marcada pela dificuldade do biogás em superar as barreiras impostas pelo regime vigente, enquanto o etanol recebeu apoio institucional robusto. O etanol conseguiu vencer os obstáculos do regime estabelecido, beneficiando-se de um ambiente político e econômico mais favorável. Isso ocorreu em grande parte devido à convergência de interesses entre o governo e atores-chave da indústria açucareira, que se mobilizaram para apoiar a consolidação da tecnologia. A ampla aceitação do etanol foi facilitada por um conjunto abrangente de incentivos, incluindo subsídios, isenções fiscais, controle de preços e políticas de licenciamento favoráveis (NITSCH, 1991).

3.3.2.Fase 2 - Biogás e a batalha climática: foco nas emissões e energia subutilizada

No final dos anos 1990, o biogás ressurgiu no contexto brasileiro por meio de iniciativas impulsionadas pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), previsto no Protocolo de Kyoto. Esse mecanismo permitiu a aprovação de projetos que geram créditos de carbono para o mercado internacional, com base nas Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). Esses projetos focaram principalmente na captura e queima do biogás para mitigar emissões de metano ou resolver desafios no tratamento de resíduos, sem reconhecer ou explorar plenamente o potencial energético do biogás. Paralelamente ao MDL, o Ministério de Minas e Energia lançou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), instituído pela Lei nº 10.438 de 2002. O PROINFA foi concebido para ampliar o papel das fontes renováveis — como eólica, biomassa e pequenas hidrelétricas — na matriz energética do país, promovendo a diversificação da geração, a redução das emissões e facilitando a emissão de RCEs.

Após a publicação do Decreto nº 5.445 em 2005, que regulamentou a participação do Brasil no MDL, cerca de 1.000 biodigestores foram instalados em todo o país entre 2005 e 2013. Essa expansão foi impulsionada pela integração do Brasil ao mercado internacional de créditos de carbono, que fomentou projetos de redução de emissões e o desenvolvimento de tecnologias

sustentáveis (CIBIOGÁS, 2020). Esse contexto criou oportunidades importantes para projetos-piloto em diversos setores de saneamento. Nesse sentido, em 2002 foi iniciado o projeto ENERG-BIOG na ETE Barueri, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). O projeto objetivava instalar e testar a geração de eletricidade por meio de microturbinas de 30 kW (ISO) acionadas por biogás gerado no processo de tratamento de esgoto. Desenvolvido pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) e pela SABESP, com financiamento da FINEP/CT-ENERG (COELHO et al., 2004), o estudo destacou o potencial da recuperação e utilização do biogás para geração energética, cujo principal benefício ambiental foi a redução das emissões de NOx. Entretanto, a análise tecnológica e econômica revelou desafios ao uso das microturbinas, como a escassez de mão de obra especializada e a necessidade de importação de diversos componentes, tornando a abordagem menos vantajosa (COSTA, 2006).

No mesmo período, a Universidade de São Paulo (USP) desenvolveu o Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA), também financiado pela FINEP, visando à recuperação energética do biogás gerado pelo reator UASB da USP (COELHO et al., 2004). De modo geral, ENERG-BIOG e PUREFA foram iniciativas inovadoras e com impactos positivos, mas tiveram sua expansão e viabilidade a longo prazo limitadas por restrições financeiras e operacionais.

Em 2008, a SANEPAR implementou um sistema de recuperação energética do biogás na ETE Ouro Verde, em Foz do Iguaçu/PR. Essa foi a primeira planta de biogás derivado de esgoto no Brasil a gerar eletricidade e a fornecer o excedente à rede da concessionária local (BRASIL, 2015). No mesmo ano, a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) iniciou a instalação da ETE Arrudas, que entrou em operação em 2011, utilizando o sistema de lodo ativado e cogeração termelétrica. Esses dois casos representaram os primeiros sucessos concretos de recuperação energética do biogás no país.

O avanço dessas iniciativas foi parcialmente impulsionado pela Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, que instituiu o sistema de compensação de energia elétrica (net metering). Essa regulamentação permitiu que as companhias de saneamento injetassem o excedente de energia na rede elétrica, facilitando o acesso aos sistemas de distribuição, promovendo a adoção do sistema de compensação e reduzindo os custos operacionais. Considerando que os custos com eletricidade frequentemente representam o segundo maior custo operacional, e em alguns sistemas até o principal (BRASIL, 2023a), essa norma ampliou a viabilidade econômica dos projetos de recuperação energética em ETEs, permitindo maximizar o uso da energia gerada internamente, reduzir despesas e melhorar a eficiência no consumo energético.

A segunda fase evidenciou que, embora o biogás tenha se beneficiado de avanços regulatórios como a Resolução ANEEL nº 482/2012, a falta de coordenação entre os diversos atores dificultou a expansão ampla do biogás além de projetos isolados. Barreiras como a ausência de infraestrutura local, dependência de equipamentos importados e escassez de mão de obra qualificada agravaram esse desconexão. Assim, apesar de destacada a relevância ambiental e energética do biogás, ficou evidente a necessidade de maior integração e alinhamento entre as políticas de saneamento e energia, fundamental para que o biogás se consolide como solução viável para mitigar emissões de GEE e diversificar a matriz energética.

3.3.3.Fase 3 – Biogás 360°: potencial energético, sustentabilidade e valorização de subprodutos

Entre 2013 e 2017, o PROBIOGÁS foi implementado como projeto de cooperação técnica entre o governo brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o governo alemão, pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). O projeto teve como objetivo ampliar o uso eficiente do biogás no saneamento básico, agricultura e setores agroindustriais, além de facilitar a integração do biogás e do biometano na matriz energética nacional. Entre os benefícios-chave estiveram a criação de uma linha de crédito para operadores brasileiros de saneamento por meio de instituição financeira alemã, o fortalecimento de conexões entre instituições de ensino e pesquisa, órgãos governamentais em todas as esferas, empresários e associações setoriais, além da capacitação de mais de 450 profissionais de diversas áreas. Também foram elaborados 17 relatórios técnicos, disponibilizados no site oficial do Ministério das Cidades (BRASIL, 2016).

Como resultado, o biogás proveniente das ETEs passou a receber maior atenção, ressaltando o potencial energético do saneamento básico. Contudo, foi necessária maior integração entre instituições educacionais e de pesquisa. Em março de 2017, começaram as atividades do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para ETEs Sustentáveis, aprovado no edital INCT – MCTI/CNPq/CAPES/FAPs nº 16/2014, com o objetivo de gerar conhecimento científico nacional e inovações tecnológicas para transferência à sociedade, por meio de rede colaborativa de instituições líderes no saneamento básico brasileiro. O instituto foi coordenado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), junto a outras sete instituições de destaque no país.

A implementação dessas medidas, juntamente com o fortalecimento de marcos regulatórios, como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída em 2017 pela Lei nº 13.576/2017, estimulou significativamente a produção de biogás no Brasil. A integração da produção renovável de biocombustíveis ao sistema de Créditos de Descarbonização (CBIOS)

representa avanço fundamental para promover a adoção do biogás. Em fevereiro de 2024, foram emitidos 326 certificados para produtores de biocombustíveis, incluindo 284 para etanol, 38 para biodiesel e apenas quatro para biometano. No total, esses certificados equivalem a aproximadamente 188 milhões de CBIOs, correspondendo a mais de 118 milhões de toneladas métricas de emissões de CO₂ evitadas (BRASIL, 2024c). No entanto, o programa RenovaBio ainda apresenta características iniciais, havendo oportunidade para aprimoramento, como a construção de um marco regulatório tributário robusto para evitar distorções de preços e fomentar investimentos, além da adoção de um modelo de preço-teto para mitigar ineficiências de mercado (Grangeia et al., 2022).

É importante destacar que o programa RenovaBio enfatizou predominantemente os resíduos agroindustriais. Todavia, para o pleno potencial da tecnologia de biogás ser atingido, é indispensável a colaboração entre setores como gás natural, eletricidade, manejo de resíduos, tratamento de água e agricultura, para reduzir custos de produção e estabelecer condições favoráveis de mercado (Borges et al., 2021). Apesar do Brasil possuir significativo potencial de produção de biogás, ainda não o explorou plenamente (Bertolino et al., 2023). A adoção ampla requer apoio coordenado de múltiplos setores para reduzir custos e criar um ambiente de mercado propício. Essas medidas devem ser implementadas antes de 2030, incluindo alterações na política RenovaBio para obrigar distribuidoras de combustíveis a adquirirem créditos de carbono (Borges et al., 2021).

Em 2015, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) publicou sua primeira resolução definindo normas para o biometano, inicialmente para insumos de origem agroflorestal, produtos orgânicos comerciais e resíduos. Em 2017, essa especificação foi ampliada para incluir biometano produzido em aterros sanitários e ETEs, com atenção especial à regulação de conteúdos de siloxanos e halogênios. Essas resoluções foram substituídas em 2022 pelas Resoluções ANP nº 906 e nº 886, esta última estabelecendo diretrizes completas para produção, comercialização e utilização do biometano proveniente de aterros e ETEs, tratando aspectos críticos de qualidade e segurança. Esse marco regulatório aumentou a confiança de investidores e operadores, impulsionando competitividade e viabilidade econômica de projetos de recuperação energética do biogás nesses setores.

Um avanço legal significativo foi a promulgação do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) (Brasil, 2020), fundamental para o avanço da universalização dos serviços de saneamento. Espera-se que esse avanço aumente a disponibilidade de substratos para produção de biogás e estimule a demanda energética do setor. Essa iniciativa está alinhada com os objetivos nacionais do Plano Nacional de Energia 2050, que prioriza a expansão do uso de renováveis no

saneamento ambiental. Ademais, em 21 de março de 2022, o Decreto nº 11.003 formalizou a Estratégia Federal para Promoção do Uso Sustentável de Biogás e Biometano, consolidando esforços para integrar essas fontes renováveis na matriz energética nacional.

Outro importante mecanismo de incentivo fiscal é o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), instituído pela Lei nº 11.488/2007. Esse regime concede isenções de PIS/COFINS para aquisição de materiais e serviços ligados a projetos de infraestrutura. Em 2022, a Raízen-Geo Biogás Costa Pinto Ltda. foi a primeira empresa de biogás aprovada no REIDI para seu projeto em Piracicaba, focado na produção de biogás a partir de resíduos agrícolas. A isenção fiscal prevista é de aproximadamente R\$ 22 milhões e integra o Programa Methane Zero, lançado pelo Ministério do Meio Ambiente por meio da Portaria nº 71, de 21 de março de 2022, que visa mitigar emissões de metano e transformar produtores em fornecedores de energia limpa e biofertilizantes (BRASIL, 2022d).

As iniciativas nacionais, que já apresentam avanços relevantes, estão fortemente alinhadas às pressões internacionais derivadas dos compromissos brasileiros em acordos climáticos globais. Entre os marcos internacionais, destacam-se os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (2015), que orientam políticas públicas para uso sustentável dos recursos, e o Global Methane Pledge, assinado em 2021 por 111 partes, incluindo o Brasil, que fixa a meta de reduzir emissões de metano em 30% até 2030 em relação a 2020. O Pacto Climático de Glasgow, resultante da COP26 em 2021, reforçou a necessidade de uma transição energética que inclua a redução gradual dos combustíveis fósseis e a meta de corte de 45% das emissões de dióxido de carbono até 2050.

O cumprimento desses compromissos globais exige soluções que ampliem a exploração do potencial energético dos resíduos orgânicos, incluindo o esgoto. A capacidade nacional de identificar, quantificar e utilizar esses recursos renováveis é essencial para alinhar as metas climáticas globais aos desafios e oportunidades locais. Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás), a rede de esgoto do Brasil tem potencial para produzir 493 milhões de Nm³ de biogás por ano, com 70% desse potencial concentrado na região Sudeste. Esse biogás pode ser convertido em 375 milhões de Nm³ de biometano anualmente ou 1,18 milhão de MWh de eletricidade (ABiogás, 2022).

Apesar do interesse crescente em aproveitar essa capacidade, tanto formuladores de políticas quanto pesquisadores enfrentam incertezas significativas quanto às estratégias para concretizar esse potencial, especialmente no contexto de produtores rurais, aterros e estações de tratamento de esgoto (Borges et al., 2021). A literatura atual destaca a falta de metodologias padronizadas para

distinguir entre potencial teórico e viabilidade prática. Modelos de simulação podem suprir essa lacuna, oferecendo abordagens uniformes para quantificação da produção de energia renovável e estratégias para uso eficiente de resíduos orgânicos (Horschig et al., 2018).

De acordo com a Abiogás (2021), até 2020 o país contava com dez plantas que recuperam energia do biogás em ETEs (Figura 3-3).

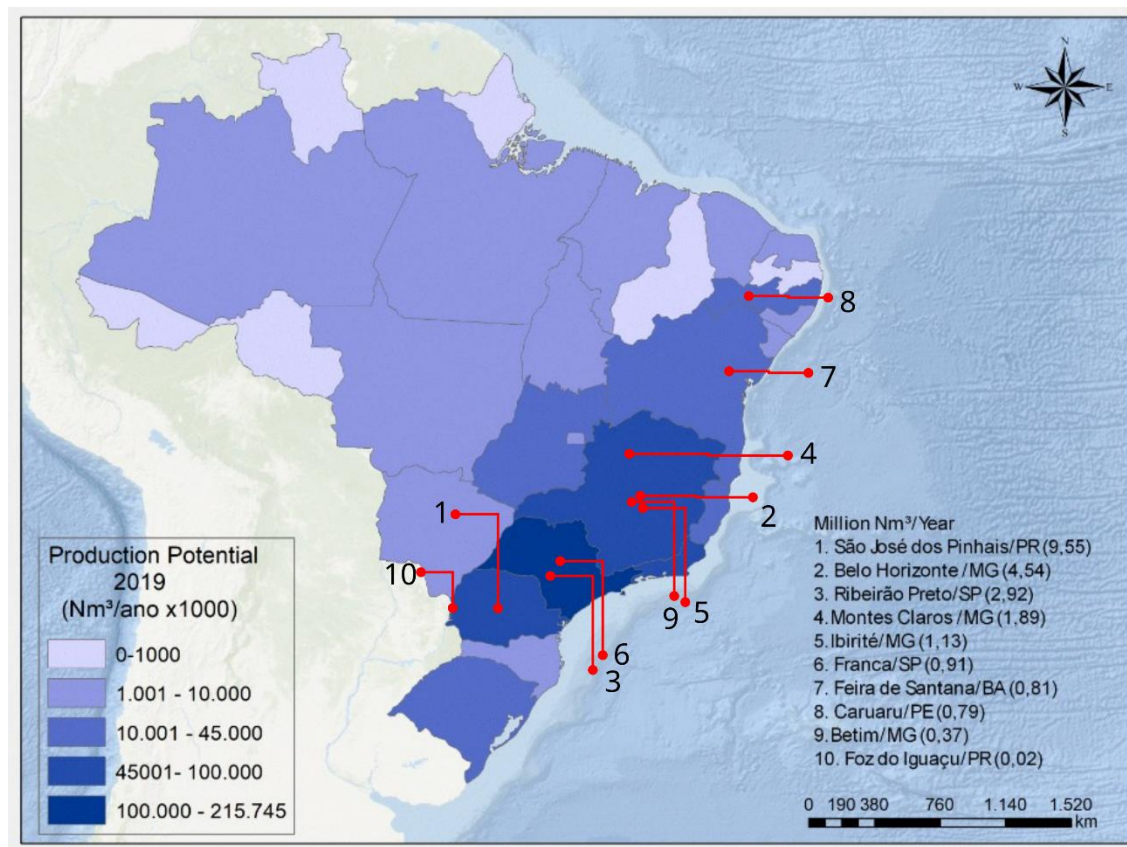


Figura 3-3 Produção de biogás até 2020 por unidade em operação e volume produzido em Nm³/ano.

Fonte: Adaptado de "Potencial para produção de biogás a partir do tratamento de esgoto: perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgoto no Brasil." São Paulo/SP: ABiogás, 2021. 33 p. Segundo informações oficiais sobre os limites dos estados brasileiros fornecidas pelo IBGE, 2019.

Em 2017, Hélinah Cardoso Moreira relatou que a ETE Ouro Verde, gerida pela SANEPAR em Foz do Iguaçu/PR, seguia as diretrizes da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e estava em operação; a ETE Arrudas, operada pela COPASA em Minas Gerais, também estava em

operação, embora enfrentasse problemas de manutenção nas microturbinas; a ETE Ribeirão Preto, gerenciada pelo DAERP em São Paulo, estava em operação e passava por manutenção no digestor de lodo; a ETE Jacuípe II, pertencente à Companhia de Água e Saneamento da Bahia, apresentava problemas de vazamento de biogás, mas continuava em operação; a ETE Ibitiré, também da COPASA em Minas Gerais, ainda não havia iniciado a operação da planta de biogás, enfrentando dificuldades na rede de coleta de efluentes. A ETE Barueri, operada pela SABESP em São Paulo, estava em processo licitatório para implementação e operação de tecnologia de conversão de resíduos em energia.

A ETE Franca, em São Paulo, operada pela SABESP, utiliza biometano como combustível veicular desde 2018, abastecendo 40 veículos da frota da empresa (SABESP, 2023). A SANEPAR atualmente desenvolve projetos para produção de biometano em colaboração com a Companhia Paranaense de Gás (Compagas). Além disso, em novembro de 2023, a SANEPAR firmou uma parceria com a empresa alemã Graforce para estabelecer a segunda maior unidade mundial de produção de hidrogênio renovável. Esta planta utilizará a tecnologia de plasmólise para gerar hidrogênio a partir do biometano derivado dos processos de tratamento de águas residuárias (SANEPAR, 2023).

A Tabela 2 apresenta dados sobre a distribuição de regulamentações de biogás e biometano, depósitos de patentes e investimentos em saneamento por estado nas regiões brasileiras. Os valores são apresentados em termos absolutos e percentuais, fornecendo uma visão detalhada da participação de cada estado nas regulamentações e inovações do setor, bem como do volume de investimentos direcionados ao saneamento, com ênfase no investimento por habitante. Esses dados permitem analisar a concentração e o perfil de desenvolvimento do setor em diferentes partes do Brasil.

A análise dos dados relativos aos depósitos de patentes de biocombustíveis no Brasil, apresentada na Tabela 2, revela que São Paulo, com 32,4%, lidera com ampla margem no número de depósitos, seguido pelo Paraná e pelo Rio de Janeiro, com 15% e 13,2%, respectivamente. A predominância das regiões Sudeste e Sul na geração de patentes está diretamente relacionada à concentração de centros de pesquisa e universidades de alta produtividade nessas áreas, juntamente com um maior nível de investimento público e privado, o que favorece a conversão de invenções em inovações de mercado.

Tabela 2: Distribuição das Regulamentações, Depósitos de Patentes e Investimentos em Saneamento por Estado nas Regiões do Brasil

	Estados	Número de regulamentações de biogás e biometano ¹	Representação das regulamentações (%)	Depósitos de patentes por estado ²	Depósitos de patentes por estado (%)	Investimento em esgoto (R\$ milhões) ³	Investimento (R\$/habitante) ³
Norte	Acre	2	0.5%	0	0.0%	1.14	22
	Amapá	29	6.7%	0	0.0%	0	
	Amazonas	5	1.2%	0	0.0%	8.35	
	Pará	8	1.9%	2	0.4%	38.12	
	Rondônia	7	1.6%	1	0.2%	7.22	
	Roraima	4	0.9%	2	0.4%	31.77	
	Tocantins	5	1.2%	2	0.4%	81.05	
Total		60	13.9%	7	1.5%	168	
Nordeste	Alagoas	14	3.2%	12	2.5%	1.69	54
	Bahia	17	3.9%	15	3.1%	187.43	
	Ceará	19	4.4%	4	0.8%	99.86	
	Maranhão	7	1.6%	2	0.4%	14.97	
	Paraíba	13	3.0%	10	2.1%	38.68	
	Pernambuco	22	5.1%	6	1.3%	338.8	
	Piauí	6	1.4%	3	0.6%	13.11	
	Rio Grande do Norte	10	2.3%	2	0.4%	108.07	
	Sergipe	14	3.2%	5	1.0%	70.38	
Total		122	28.3%	59	12.3%	873.0	
Centro-oeste	Goiás	16	3.7%	1	0.2%	212.95	348
	Mato Grosso	18	4.2%	4	0.8%	103.86	
	Mato Grosso do Sul	28	6.5%	4	0.8%	95.22	
Total		62	14.4%	9	1.9%	412.03	
Sudeste	Espírito santo	23	5.3%	6	1.3%	139.92	320
	Minas Gerais	16	3.7%	41	8.6%	287.43	
	Rio de Janeiro	31	7.2%	63	13.2%	338.29	
	São Paulo	46	10.7%	155	32.4%	2.403.65	
Total		116	26.9%	265	55.3%	3169.29	
Sul	Paraná	21	4.9%	72	15.0%	436.59	335
	Rio Grande do Sul	19	4.4%	39	8.1%	278.96	
	Santa Catarina	31	7.2%	28	5.8%	438.12	
Total		71	16.5%	139	29.0%	1153.67	

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados obtidos do 1º Mapa Regulatório de Biogás e Biometano, desenvolvido pela Associação Brasileira de Biogás (ABIOGÁS, 2024); do 2º Mapeamento de Patentes de Tecnologias Nacionais Relacionadas a Fontes Renováveis:

Biocombustíveis – 2022 (Santos & Gandara, 2022); e do 3º Relatório de Avaliação Anual do Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab 2020 (Brasil, 2020).

Nota: ¹ Disposições legais estaduais, incluindo regulamentações e leis que regem o setor de biogás e biometano no Brasil no período de 1982 a 2025 (ABIOGÁS, 2024). ² Número de pedidos de patentes relacionados a biocombustíveis depositados no Brasil por residentes entre 2010 e 2021, abrangendo etanol, biodiesel, biogás, biocombustíveis sólidos e outras fontes renováveis (Santos & Gandara, 2022). ³ Valores referentes ao total de investimentos em esgotamento sanitário por unidades federativas realizados em 2020, desembolsados por Agentes Federais. Ressalta-se que os recursos provenientes dos agentes federais incluem tanto verbas públicas do Orçamento Geral da União – OGU, quanto recursos de outras fontes (Brasil, 2020).

Quanto ao perfil dos depositantes, 84,8% da amostra é composta por pessoas jurídicas, com uma parcela significativa originada de universidades públicas, incluindo instituições como a Unicamp, a Universidade Federal do Paraná e a Universidade Federal do Rio de Janeiro. Esse cenário reforça a importância do investimento público em ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento sustentável do país. O setor governamental não apenas regula, mas também desempenha um papel essencial no incentivo e apoio a iniciativas sustentáveis (Santos & Gandara, 2022).

Essa concentração de esforços na região Sudeste, particularmente em São Paulo, também é evidente nos investimentos em esgoto, conforme mostrado na Tabela 2. Em contraste, a região Norte recebeu pouco mais de 10% do montante investido no Sudeste, revelando um desequilíbrio significativo na distribuição de recursos (Brasil, 2020). Esses dados indicam a necessidade de revisão do cenário de referência para garantir o acesso universal aos serviços de saneamento.

A correlação entre marcos regulatórios e inovação mostra que os estados com regulamentações mais específicas são aqueles que possuem mais patentes depositadas e, conforme apresentado na Figura 3-3, maior potencial de produção de biogás em ETEs. Esses dados destacam a importância de um ambiente regulatório bem estruturado para incentivar o avanço tecnológico e a sustentabilidade no setor.

O Diagnóstico Temático de Serviços de Água e Esgoto, publicado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em 2023, reforça as desigualdades regionais. No que se refere ao tratamento de esgoto, as regiões Norte e Nordeste ainda recebem investimentos abaixo do necessário para reduzir seus déficits de atendimento. Na Região Norte, a lacuna de infraestrutura é 4,4 vezes maior que o volume investido, enquanto no Nordeste essa proporção é de 2,2 vezes

(BRASIL, 2023a). Diante disso, é fundamental que análises futuras aprofundem essa questão, garantindo que as contribuições financeiras sejam proporcionais às deficiências existentes, promovendo, assim, um desenvolvimento equilibrado e sustentável do setor em todas as regiões do país.

A distribuição desigual dos investimentos em inovação e saneamento agrava as disparidades regionais no Brasil, dificultando o desenvolvimento sustentável. Enquanto algumas regiões recebem incentivos significativos, outras permanecem estagnadas, sem infraestrutura adequada. Essa desigualdade perpetua um ciclo de exclusão e limita o acesso a serviços essenciais. Para reverter esse cenário, é imprescindível adotar políticas públicas que promovam uma alocação mais equitativa dos recursos. Um caminho promissor para reduzir essas disparidades reside no aproveitamento do vasto potencial brasileiro para a geração de energia a partir da biomassa, utilizando resíduos agrícolas, florestais e urbanos. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o país possui um potencial estimado de produção de biogás de 84,6 bilhões de Nm³ por ano. Entretanto, a produção atual é de apenas 2,3 bilhões de Nm³, evidenciando a expressiva subutilização desse recurso (BRASIL, 2023b). O Panorama do Biogás no Brasil indica que, até 2022, 885 plantas de biogás estavam em operação em todo o território nacional, categorizadas em três principais fontes de substratos. Destas, 78% operavam no setor agropecuário, 12% no setor industrial e 10% no setor de saneamento. Em termos de volume total de produção de biogás, o setor de saneamento respondeu por 74%, seguido pelo setor industrial com 16% e pelo setor agropecuário com 10% (BRASIL, 2022c).

A integração do biogás à matriz energética nacional é uma questão crítica destacada por atores do setor, que enfatizam as barreiras persistentes que dificultam a expansão dessa fonte renovável de energia. Estratégias para a incorporação do biogás ao quadro energético nacional foram debatidas recentemente durante uma audiência pública extraordinária realizada pela Comissão Especial de Estudo, Avaliação e Acompanhamento de Iniciativas e Medidas Adotadas para a Transição Energética — Fontes Renováveis e Produção de Hidrogênio Verde no Brasil (ACTA) (BRASIL, 2024c).

A audiência abordou políticas públicas e iniciativas voltadas para ampliar o papel do biogás e de outras fontes renováveis no contexto da transição energética do Brasil, juntamente com estratégias para o avanço da produção de hidrogênio verde no país. Foi dada atenção especial à necessidade premente de enfrentar as deficiências de infraestrutura para produção, transporte e distribuição de biogás. Isso inclui a expansão da rede de gasodutos e a construção de instalações dedicadas ao tratamento e aproveitamento do biogás — requisitos essenciais para garantir sua

viabilidade econômica e maior inserção na matriz energética nacional. A discussão também ressaltou a importância de aperfeiçoar o marco regulatório para facilitar a integração competitiva do biogás no mercado de energia. Entre as propostas, destacou-se a implementação de incentivos financeiros e fiscais para atrair tanto grandes quanto pequenos produtores. Além disso, a sinergia entre biogás e hidrogênio verde foi identificada como uma oportunidade estratégica para o Brasil se posicionar como líder global em energia limpa. Essa integração deverá acelerar a transição energética, ao mesmo tempo em que diversifica e fortalece o portfólio energético nacional (BRASIL, 2024c).

A transição energética brasileira, embora apresente avanços em diversas dimensões, continua enfrentando desafios significativos. Apesar de notáveis progressos em energia renovável, evidenciados por uma matriz elétrica composta por 84% de fontes limpas (BRASIL, 2022b), o Brasil permanece como o sexto maior emissor de carbono do mundo (Edmund Ntom Udemba & Merve Tosun, 2022). Esse paradoxo é agravado pelos profundos efeitos do desmatamento, que constitui um dos principais responsáveis pelas emissões de GEE no país.

No entanto, é importante destacar que a matriz elétrica é um subconjunto da matriz energética, composta pelas fontes utilizadas exclusivamente para geração de eletricidade. Já a matriz energética abrange o conjunto total de fontes empregadas em diversas atividades, como transporte, aquecimento e geração de eletricidade (BRASIL, 2022b). A Figura 3-4 ilustra a matriz energética, que inclui não apenas as fontes renováveis para geração de eletricidade, mas também aquelas utilizadas em outros setores.

Em 2022, o Brasil emitiu 2,3 bilhões de toneladas de GEE, registrando o terceiro maior nível de emissões desde 2005 e evidenciando o desafio persistente do desmatamento. As emissões decorrentes de mudanças no uso da terra, incluindo o desmatamento, representaram 1,12 bilhão de toneladas, correspondendo a 48% do total nacional — a maior parcela entre todos os setores. O setor de resíduos contribuiu com mais 91 milhões de toneladas de CO₂ (4%), sendo 26,6% dessas emissões oriundas do tratamento de efluentes domésticos, o que evidencia o considerável impacto ambiental desse setor.

Comparativamente, o aumento da recuperação de biogás em aterros sanitários já demonstrou benefícios mensuráveis na mitigação das emissões de GEE, ressaltando o potencial para intervenções semelhantes em ETEs. A recuperação de biogás em ETEs não apenas auxilia na redução das emissões, mas também oferece a oportunidade de transformar um passivo ambiental em um ativo energético valioso, contribuindo para os objetivos duplos de sustentabilidade ambiental e diversificação energética (Araújo et al., 2023). Assim, embora o setor energético contribua para a

mitigação climática, o papel do desmatamento e a necessidade urgente de contê-lo permanecem elementos centrais para alinhar o Brasil às metas globais de sustentabilidade e redução de emissões.

O Brasil ocupa uma posição estrategicamente vantajosa para sustentar sua liderança na transição energética global, apesar de enfrentar desafios como a dependência dos recursos hídricos e a necessidade de maior diversificação. No cenário interno, a narrativa de possuir uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo tem, paradoxalmente, funcionado como um fator limitante à expansão do uso do biogás e à superação das lacunas tecnológicas existentes. No entanto, as recentes crises hídricas ressaltaram a necessidade crítica de diversificar o portfólio nacional de fontes renováveis de energia, reforçando a urgência de avançar em soluções alternativas (Bertolino et al., 2023).

Os extensos recursos naturais do Brasil, incluindo abundância de água, solos férteis e elevados índices de energia solar e eólica, sustentam o desenvolvimento de uma matriz energética predominantemente baseada em fontes renováveis (Figura 3-4). Esses atributos conferem vantagens significativas, posicionando a matriz energética brasileira como comparativamente menos dependente de recursos não renováveis. Contudo, apesar dessa configuração favorável, o país enfrenta o desafio premente de reestruturar seu sistema energético.

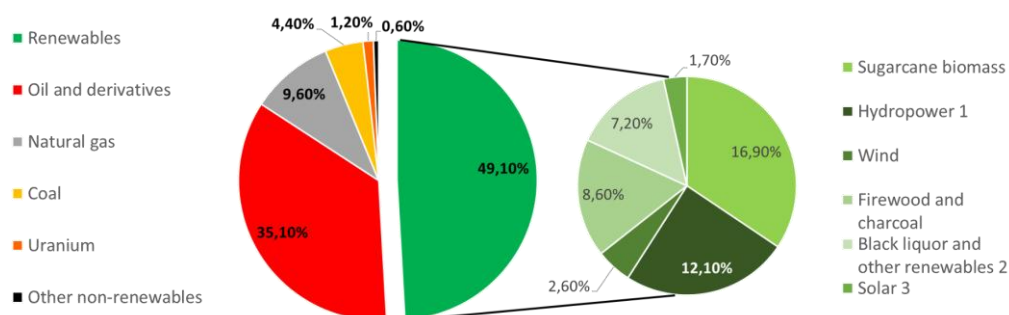


Figura 3-4 Oferta de energia no Brasil por fonte geradora – Ano base 2023

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do *Resumo do Balanço Energético Nacional 2024*. Brasília: MME, 2024.

Nota: ¹ Inclui importações de eletricidade. ² Inclui licor negro, biodiesel, outras biomassas, biogás e gás industrial proveniente do carvão vegetal. ³ Inclui fontes solares fotovoltaicas e solares térmicas.

A dependência de recursos hídricos e petrolíferos como insumos primários para a geração de energia evidencia a necessidade urgente de diversificação da matriz energética brasileira. Eventos

recentes de seca, como os observados em 2021, afetaram gravemente os níveis de água dos reservatórios hidrelétricos (BRASIL, 2021a), comprometendo a produção de energia. Esses períodos prolongados de estiagem levaram a uma queda acentuada na geração hidrelétrica, forçando o país a recorrer a fontes térmicas à base de combustíveis fósseis, mais poluentes e caras, para atender à demanda. De acordo com o Relatório de Escassez Hídrica de 2021, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética, a participação das usinas hidrelétricas na capacidade instalada caiu de 83,3% em 2001 para 60,2% em 2021. No mesmo período, a geração eólica e fotovoltaica passou de níveis praticamente nulos para 11,4% e 2,6%, respectivamente. Entre as fontes térmicas, a capacidade das usinas a combustíveis fósseis aumentou de 11,2% para 16,0%, enquanto as usinas movidas a biomassa passaram de 2,4% para 8,7%. Esse cenário de escassez hídrica evidenciou a necessidade premente de reduzir a dependência da geração hidrelétrica como medida fundamental para enfrentar os desafios observados em 2021 (BRASIL, 2021a).

O significativo potencial brasileiro para geração de energia a partir da biomassa não apenas evidencia a oportunidade de ampliar a geração de biogás, mas também se relaciona à diversidade de substratos que o país pode utilizar para fortalecer sua matriz energética. A presença de abundantes recursos naturais, como a biomassa proveniente de resíduos agrícolas, florestais e urbanos, reforça a atratividade da adoção disseminada do biogás como fonte de energia, possibilitando uma matriz energética mais diversificada e sustentável. Essa sinergia entre o aproveitamento do biogás e a utilização de diferentes substratos é crucial para atender à crescente demanda por fontes renováveis de energia, ao mesmo tempo que promove a economia circular e reduz as emissões de carbono.

Uma recente evolução do marco regulatório, estabelecida pela Lei nº 14.993/2024, que define metas anuais de redução de emissões de GEE no mercado de gás natural, vem impulsionando a inclusão do biometano. A legislação determina que essa redução ocorrerá por meio da participação crescente do biometano no consumo de gás natural, com um percentual inicial de 1% e um limite máximo de 10% a partir de 2026. O descumprimento dessas metas pode resultar em multas que variam de R\$ 100.000,00 a R\$ 50.000.000,00, o que incentiva as empresas a se adaptarem ao novo cenário regulatório.

Em resposta a esse ambiente favorável, algumas iniciativas têm se destacado na ampliação do uso do biometano no país. Em janeiro de 2025, a Petrobras lançou sua primeira chamada pública para aquisição de combustível renovável, com o objetivo de mapear o mercado e reduzir a intensidade de carbono do gás natural a partir de 2026. Além disso, distribuidoras de gás natural, como a Companhia de Gás de Mato Grosso do Sul e a Companhia de Gás da Bahia, juntamente com a Companhia de Gás de Pernambuco, lançaram chamadas públicas para compra de biometano,

com vigência prevista para 2027. Essas ações demonstram um movimento alinhado à nova regulação e ao fortalecimento do biometano como alternativa energética. Ao mesmo tempo, outras iniciativas reforçam a viabilidade do biometano no mercado, como o caso da Companhia de Gás do Ceará, que, durante a pandemia, distribuiu gás proveniente do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, em Fortaleza, representando, em determinados momentos, mais da metade do fornecimento da empresa. Além da Lei nº 14.993/2024, outras iniciativas têm impulsionado a valorização do biogás no país. O Programa de Aceleração da Transição Energética (PATEN), estabelecido pela Lei nº 15.103/2025, inclui o desenvolvimento de projetos de recuperação e valorização energética de resíduos, enquanto o PLANSAB 2020, instituído pela Lei nº 14.026/2020, incentiva a participação do setor privado na modernização das infraestruturas de saneamento, de modo a viabilizar o alcance das metas de universalização dos serviços de saneamento. Essas políticas criam um ambiente favorável para a ampliação da recuperação do biogás, podendo acelerar a transição energética do país.

Essas iniciativas locais, juntamente com as políticas recentemente implementadas, criam um ambiente favorável à expansão do biometano no Brasil. Entretanto, o potencial de produção de biogás das ETEs no país, estimado em 493 milhões de Nm³ por ano, permanece amplamente subutilizado, com apenas um número limitado de projetos de recuperação de energia em grande escala. Em contraste, diversos países europeus, como Alemanha, Suécia e Dinamarca, implementaram políticas robustas de valorização do biogás de forma precoce, integrando com sucesso o biometano às suas redes nacionais de energia (Bauer et al., 2013). A Lei de Energias Renováveis da Alemanha introduziu tarifas feed-in de longo prazo e incentivos financeiros para projetos de conversão de biogás em eletricidade, fomentando o desenvolvimento de mais de 8.000 plantas operacionais de biogás (Theuerl et al., 2019). A Suécia foi pioneira nas tecnologias de purificação de biogás, utilizando o biometano como combustível veicular, com mais de 65% de seu biogás empregado no transporte público (Scarlat et al., 2018). A Dinamarca integrou o biogás a sistemas de aquecimento distrital, garantindo demanda estável e promovendo economias circulares regionais (Budzianowski, 2016). Mais recentemente, no âmbito da iniciativa RePower da União Europeia, o bloco estabeleceu a meta de atingir 35 bilhões de metros cúbicos (bcm) de produção de biometano por ano até 2030, seja na forma de biogás ou em sua versão purificada. O investimento estimado para alcançar esse objetivo é de aproximadamente € 37 bilhões (União Europeia, 2022).

A Figura 3-5 apresenta a linha do tempo da TT do biogás em ETEs no Brasil, destacando marcos regulatórios, avanços institucionais e iniciativas-chave ao longo das décadas. Embora progressos significativos tenham sido alcançados desde os primeiros esforços para a captura e

utilização do biogás, o setor ainda enfrenta desafios e apresenta grande potencial de expansão e aprimoramento.

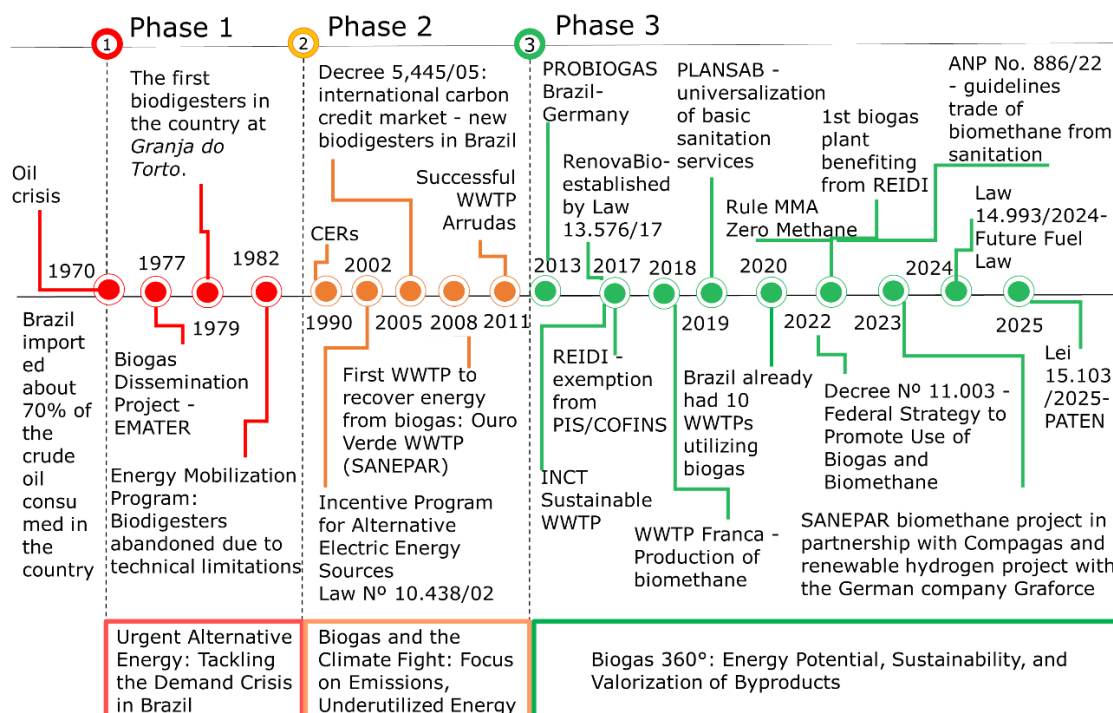


Figura 3-5 Evolução da Transição Tecnológica (TT) do Biogás em ETEs no Brasil

A terceira fase do desenvolvimento do biogás no Brasil é impulsionada pela crise climática, pela recorrência de escassez hídrica e pelos compromissos globais de descarbonização, que estão levando o país a explorar soluções como o biogás, apesar da percepção de uma matriz elétrica predominantemente renovável. Nesse contexto, políticas como o PLANSAB 2020 e programas como o RenovaBio, o Zero Metano, a Lei do Combustível do Futuro e o Programa de Aceleração da Transição Energética fornecem incentivos políticos essenciais para a expansão do setor. No entanto, esses esforços ainda enfrentam desafios significativos, como a insuficiência de infraestrutura e a resistência de setores tradicionais de energia. Projetos-piloto conduzidos por empresas como a SABESP e a SANEPAR já demonstraram a viabilidade técnica e ambiental do biogás, reforçando seu potencial como fonte de energia sustentável. Para que essa transição seja consolidada, será necessário um suporte financeiro robusto, o aprimoramento das estruturas regulatórias e uma colaboração mais intensa entre os agentes do setor, garantindo que as barreiras logísticas e econômicas sejam superadas e que os novos regimes recentemente adotados se consolidem.

3.3.4. Nível de Evolução da Transição Tecnológica do Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil

Considerando os quatro níveis de evolução da Transição Tecnológica apresentados na sessão 2.2 (Metodologia), é possível classificar a realidade brasileira do biogás em ETES dentro desses níveis, conforme ilustrado na Figura 3-6.

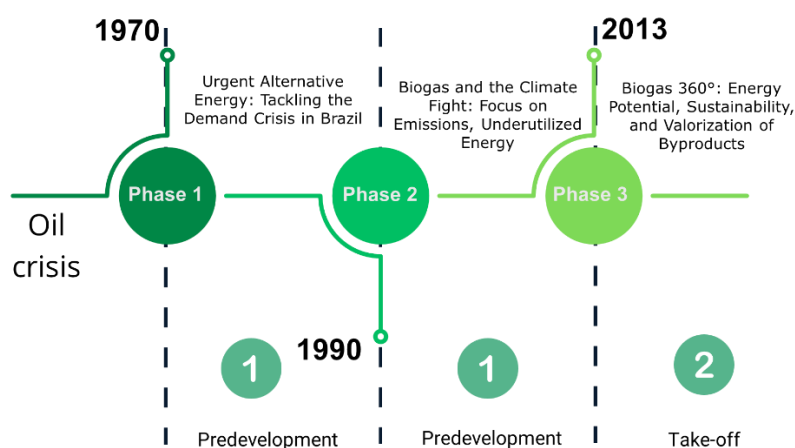


Figura 3-6 Nível de evolução da transição tecnológica (TT) do biogás em ETES brasileiras

Figura 3-6 mostra a evolução do biogás no Brasil segundo o framework da TT, destacando três fases distintas. As duas primeiras fases correspondem a um longo período pré-desenvolvimento, que pode ser subdividido em duas etapas devido a avanços e retrocessos específicos resultantes da ausência de um ambiente institucional e tecnológico consolidado. Atualmente, o Brasil encontra-se em um estágio de decolagem, pois já possui nichos tecnológicos em expansão, incentivos regulatórios emergentes e casos de sucesso que indicam um possível avanço para a próxima fase.

A transição de um nível para outro em uma TT pode levar entre 20 e 30 anos (Rotmans et al., 2001), sendo que 12 anos se passaram desde o início do nível de decolagem em 2013. Assim, é possível prever, em um cenário otimista, que o país poderia atingir o estágio de aceleração em aproximadamente uma década, próximo a 2033. Contudo, considerando as dificuldades históricas do país, em um cenário mais realista, é provável que a transição para o próximo nível ocorra de forma mais lenta e gradual, ou seja, apenas dez anos depois.

Ainda assim, essas iniciativas recentes no nível do regime indicam uma mudança de perspectiva e podem servir como catalisadores para a expansão da recuperação energética do biogás no Brasil. O sucesso dessa transição dependerá do alinhamento entre políticas públicas, incentivos

financeiros e engajamento dos setores produtivos, garantindo que o país avance de forma sustentável rumo à recuperação energética dos resíduos.

3.4. IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

O desenvolvimento sustentável do setor de biogás no Brasil requer um arcabouço político e regulatório robusto para incentivar investimentos, reduzir barreiras de entrada (como desafios de infraestrutura, burocracia, complexidades regulatórias, acesso restrito a recursos ou tecnologia, desinformação e incertezas de mercado) e maximizar os benefícios ambientais e econômicos. Políticas essenciais para promover a produção de biogás e sua integração à matriz energética incluem três pontos principais:

- Fortalecimento da Estabilidade Regulamentar para Expansão de Mercado: A imprevisibilidade regulatória permanece como uma barreira significativa ao crescimento do setor de biogás, desestimulando investimentos de longo prazo e impedindo a implantação de projetos em grande escala. Para fomentar a confiança dos investidores e mitigar falhas de mercado, é essencial implementar mecanismos como modelos regulatórios de taxa fixa ou tarifas feed-in que limitem as variações de preço e assegurem retornos previsíveis sobre os investimentos. Além disso, o desenvolvimento de um marco regulatório transparente que alinhe as políticas de energia, saneamento e meio ambiente facilitaria os processos de aprovação de projetos e reduziria os entraves burocráticos. Essas ações possibilitariam a transição de iniciativas de nicho para adoção em larga escala, fortalecendo a resiliência energética do Brasil e contribuindo para as metas nacionais de descarbonização (Instituto Acende Brasil, 2007; LEI No 14.026, 2020; Grangeia et al., 2022).

- Aproveitamento da Colaboração Multissetorial e Redução de Custos: Embora o marco regulatório do RenovaBio tenha foco principal nos resíduos agroindustriais, apresenta uma oportunidade ainda não explorada para incorporar fontes diversas de biomassa, como resíduos sólidos urbanos e lodo de esgoto. Expandir seu escopo para integrar essas matérias-primas alternativas pode aumentar a eficiência de custos na produção de biogás, reduzindo desafios logísticos e promovendo princípios da economia circular. Parcerias multissetoriais — que conectam os setores de saneamento, energia e gestão de resíduos — são essenciais para atingir esse objetivo (Borges et al., 2021). Ademais, mecanismos de cofinanciamento, incentivos fiscais e programas de capacitação da força de trabalho acelerariam a inovação tecnológica, fortaleceriam o mercado de CBIOs e estimulariam o surgimento de uma cadeia de valor robusta para o biogás. Esses esforços devem ser apoiados por uma estratégia nacional coerente que promova a sinergia de recursos e aborde as lacunas existentes em infraestrutura.

- Definição de Metas Estratégicas e Prazos para a Adoção do Biogás: Estabelecer metas claras e executáveis, bem como prazos para o desenvolvimento do setor de biogás, é fundamental para cumprir os compromissos climáticos do Pacto Climático de Glasgow, da COP26 (2021), que prevê redução gradual no uso de combustíveis fósseis e redução de 45% nas emissões de CO₂ até 2050. Para alcançar esses objetivos, é necessária uma elevação progressiva da contribuição do biogás e do biometano na matriz energética nacional e a introdução da compra obrigatória de créditos de carbono por distribuidoras de combustíveis até 2030, para incentivar a adoção do biogás. Além disso, as políticas energéticas nacionais devem priorizar a integração do biogás como componente estratégico do caminho de descarbonização, assegurando alinhamento com os objetivos mais amplos de diversificação energética e redução de emissões (Borges et al., 2021).

Para garantir a adoção exponencial do biogás até 2030, o Brasil deve promover reformas estruturais que aumentem a estabilidade regulatória, diversifiquem as fontes de matéria-prima e fomentem a colaboração multissetorial. Essas medidas assegurarão que o biogás emergja como um elemento estratégico no portfólio de energias renováveis do país, impulsionando a descarbonização econômica, melhorando a segurança energética e fortalecendo a competitividade global. Priorizar a valorização do biogás em ETES está alinhado aos objetivos nacionais de sustentabilidade, atendendo tanto aos imperativos ambientais quanto aos desafios socioeconômicos do país.

3.5. CONCLUSÕES

O modelo MLP mostrou-se adequado para analisar a TT no contexto da recuperação energética do biogás em ETES. Essa análise revela um panorama multifacetado, destacando o significativo potencial energético inexplorado, que aborda não apenas a necessidade de diversificação da matriz energética, mas também os compromissos com a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Entre os principais elementos identificados nos três níveis do MLP, destaca-se a influência dos contextos, como as mudanças climáticas e a vulnerabilidade do Brasil às crises hídricas, que impactam diretamente as dinâmicas da transição. A crescente dependência de fontes renováveis e a maior conscientização sobre sustentabilidade favorecem a adoção do biogás como solução estratégica para a segurança energética e mitigação das emissões de metano.

No nível do regime, a criação do novo marco regulatório do saneamento (Brasil, 2020), juntamente com as políticas RenovaBio e Metano Zero, criou um ambiente mais favorável à adoção do biogás. Contudo, desafios como infraestrutura inadequada e resistência do setor convencional ainda apresentam obstáculos significativos.

No nível do nicho, projetos-piloto, como os operados pela SABESP e SANEPAR, demonstraram a capacidade do biogás para geração de eletricidade e biocombustíveis, impulsionando a adoção dessa tecnologia em outras regiões. Esses projetos contribuem para a criação de conhecimento e comprovam a efetividade da recuperação energética, apesar das barreiras financeiras e operacionais que ainda persistem.

A evolução do biogás em ETEs no Brasil, segundo o framework MLP, revela três fases distintas: duas fases pré-desenvolvimento, marcadas por avanços e retrocessos devido à ausência de um ambiente institucional e tecnológico consolidado, e a atual fase de decolagem, caracterizada por nichos tecnológicos em expansão, incentivos regulatórios emergentes e casos de sucesso. Enquanto em um cenário otimista o Brasil pode alcançar o estágio de aceleração por volta de 2033, a transição provavelmente será mais lenta, dada a realidade histórica do país.

Como recomendações para pesquisas futuras, sugere-se a realização de um mapeamento mais detalhado do ecossistema brasileiro relacionado à recuperação do biogás em ETEs, identificando os atores-chave e suas interações para promover uma colaboração eficaz. Além disso, é essencial investigar as relações multissetoriais entre os setores de gás natural, eletricidade, gestão de resíduos, tratamento de água e agricultura para consolidar o uso do biogás no Brasil. Um estudo detalhado da cadeia de valor entre esses setores ajudará a identificar pontos de integração que otimizem processos, reduzam custos operacionais e aumentem o impacto positivo do biogás, acelerando a transição energética e promovendo a sustentabilidade.

Embora este estudo foque na TT no Brasil, é importante ressaltar que os processos e mecanismos envolvidos podem variar conforme as particularidades de cada país. Assim, as abordagens e lições extraídas desta análise podem servir como referência para adaptação em diferentes contextos nacionais, considerando desafios e oportunidades específicos. Essa perspectiva permite que outros países, especialmente aqueles com economias emergentes ou na América Latina, reflitam sobre seus próprios caminhos de TT e adaptem as lições brasileiras às suas realidades locais.

O sucesso do biogás depende de soluções sustentáveis adaptadas aos fatores territoriais, alinhadas aos modelos de negócios dos investidores e às necessidades do tratamento de resíduos. Para uma implementação efetiva, é crucial integrar políticas de saneamento com metas de sustentabilidade energética, criando oportunidades que beneficiem ambos os setores e promovam uma economia mais sustentável e eficiente.

Referências

- ABiogás. (2021). *Nota técnica - Potencial de produção de biogás a partir do tratamento de esgoto*. 33.
- Agencia Andaluza de la Energia. (2011). Estudio básico del biogás. In *Consejería de Economía Innovación y Ciencia (CEIC)*.
- Aguilar-Benitez, I., & Blanco, P. A. (2018). Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, 9(2), 86–111. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>
- AMB, À. M. de B. (2022). EDAR del Prat de Llobregat. *AMB – Medi Ambient*. <https://www.amb.cat/web/medi-ambient/aigua/instalacions-i-equipaments/detall/-/equipament/edar-del-prat-de-llobregat/276285/11818>
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., & Conti, D. de M. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2(November 2020), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>
- Battista, F., Frison, N., Pavan, P., Cavinato, C., Gottardo, M., Fatone, F., Eusebi, A. L., Majone, M., Zeppilli, M., Valentino, F., Fino, D., Tommasi, T., & Bolzonella, D. (2020). Food wastes and sewage sludge as feedstock for an urban biorefinery producing biofuels and added-value bioproducts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95(2), 328–338. <https://doi.org/10.1002/jctb.6096>
- Bergek, A., Hekkert, M., Jacobsson, S., Markard, J., Sandén, B., & Truffer, B. (2015). Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and interaction. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.003>
- Bertolino, A. M., Giganti, P., dos Santos, D. D., & Falcone, P. M. (2023). A matter of energy injustice? A comparative analysis of biogas development in Brazil and Italy. *Energy Research and Social Science*, 105(May). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103278>
- Bhatia, R. K., Ramadoss, G., Jain, A. K., Dhiman, R. K., Bhatia, S. K., & Bhatt, A. K. (2020). Conversion of Waste Biomass into Gaseous Fuel: Present Status and Challenges in India. *Bioenergy Research*, 13(4), 1046–1068. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10137-4>
- Borges, C. P., Sobczak, J. C., Silberg, T. R., Uriona-Maldonado, M., & Vaz, C. R. (2021). A

- systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138(August). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110518>
- Brasil. (2024). *Brasil registra grande número de doenças relacionadas à água sem tratamento*. Assembleia Legislativa Do Estado Do Piauí. <https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/brasil-registra-grande-numero-de-doencas-relacionadas-a-agua-sem-tratamento>
- BRASIL. (2023). *Diagnóstico Temático: Visão Geral do Saneamento no Brasil 2023*. https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf
- Brazil. (2007a). *Balanço Energético Nacional 2007*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-136/topico-112/Versão Completa 2007.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-136/topico-112/Versão%20Completa%202007.pdf)
- Brazil. (2007b). *Plano Nacional de Energia 2030*.
- Brazil. (2020a). Atlas Esgotos. ANA - Agência Nacional de Águas.
- Brazil. (2020b). *Plansab - Relatório de Avaliação Anual 2020- Ministério do Desenvolvimento Regional*. 118.
- Brazil. (2022). *Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050*.
- Brazil. (2023a). *BEN_Relatório Síntese_2024_Ano base 2023*. 1–71.
- Brazil. (2023b). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)*. Ministério Das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: SNSA/Ministério Das Cidades.
- Calero, M., Godoy, V., Heras, C. G., Lozano, E., Arjandas, S., & Martín-Lara, M. A. (2023). CURRENT STATE OF BIOGAS AND BIOMETHANE PRODUCTION AND ITS IMPLICATIONS FOR SPAIN. *Energy & Fuels*, 15(7), 3584–3602.
- Capellán-Pérez, I., Campos-Celador, Á., & Terés-Zubiaga, J. (2018). Renewable Energy Cooperatives as an instrument towards the energy transition in Spain. *Energy Policy*, 123(May), 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.064>
- Cardoso, F., & Borschiver, S. (2018). *Roadmap Tecnológico da Biometanização da Palha*. 1596–1611.

- Cardoza, D.; Romero, I. ., Martínez, T.; Ruiz, E.; Gallego, F. J. ., López-Linares, J.C.; Manzanares, P. ., & Castro, E. (2021). Location of Biorefineries Based on Olive-Derived Biomass in Andalusia, Spain. *Energies*, 14, 3052. <https://doi.org/10.3390/en14113052>
- CETAQUA. (2020). *LIFE NIMBUS: Wastewater treatment plant as a nexus of integrated and sustainable management of water, energy and mobility*.
- Chan Gutiérrez, E., Wall, D. M., O'Shea, R., Novelo, R. M., Gómez, M. M., & Murphy, J. D. (2018). An economic and carbon analysis of biomethane production from food waste to be used as a transport fuel in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 196, 852–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.051>
- Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72(May), 103033. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103033>
- CIBiogas. (2021). *O biogás na produção de energia elétrica*. <https://cibiogas.org/blog/o-biogas-na-producao-de-energia-eletrica/>
- CIBiogas Energias Renováveis. (2025). *Panorama do Biogas 2024*.
- Cosmen Junceda, V. (2023). *Impacto de la Guerra Rusia - Ucrania en el sector energético de España*.
- COSTA, D. F. DA. (2006). GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DO TRATAMENTO DE ESGOTO. In *MSc work – Program of Post-Graduation in Energy. University of São Paulo, São Paulo* (pp. 1–176).
- Crone, B. C., Garland, J. L., Sorial, G. A., & Vane, L. M. (2016). Significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: A review. *Water Research*, 104, 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.019>
- De Oliveira, L. G. S., & Negro, S. O. (2019). Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107(December 2017), 462–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.030>
- de Souza, H. P., de Oliveira, W. T. G. H., dos Santos, J. P. C., Toledo, J. P., Ferreira, I. P. S., de

- Sousa Esashika, S. N. G., de Lima, T. F. P., & de Sousa Delácio, A. (2020). Infectious and parasitic diseases in Brazil, 2010 to 2017: Considerations for surveillance. *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health*, 44, 1–7. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2020.10>
- DIRECTIVA (UE) 2024/3019 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, 0345 (2024).
- EEA- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2023). *Greenhouse gases – viewer*. Greenhouse Gases – Viewer.
- Eijo-Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M. E., Marin, D., Amores, M. J., Aldea, X., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2015). Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 2084–2094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>
- Elzen, B., Mierlo, B. Van, & Leeuwis, C. (2012). Environmental Innovation and Societal Transitions Anchoring of innovations: Assessing Dutch efforts to harvest energy from glasshouses. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 5, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2012.10.006>
- European Commission. (2023). BIOMETHANE FICHE – Spain (2021). *2023 Biomethane Country Fiches*, 2021, 2021–2023. https://energy.ec.europa.eu/document/download/c917c23a-a962-42ef-91b0-91a8b161feb3_en?filename=Biomethane_fiche_ES_web.pdf
- EUROPEAN COMMISSION. (2025). *NON IMPACT BUS – Demonstration of a biological methanation plant for sustainable urban transport. LIFE Project – LIFE19 ENV/ES/000191*.
- Fernandez, R. M. (2018). Conflicting energy policy priorities in EU energy governance. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 8(3), 239–248. <https://doi.org/10.1007/s13412-018-0499-0>
- Fetting, C. (2020). The European Green Deal. *ESDN Office*, 35, 44–67. [https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705\(35\)2024.ic-03](https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705(35)2024.ic-03)
- Gadirli, G., Pilarska, A. A., Dach, J., Pilarski, K., Kolasa-Więcek, A., & Borowiak, K. (2024). Fundamentals, Operation and Global Prospects for the Development of Biogas Plants—A Review. *Energies*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/en17030568>
- Geels, F. W. (2002). *Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes : a multi-level perspective and a case-study*. 31, 1257–1274.

- Geels, F. W. (2011). Environmental Innovation and Societal Transitions The multi-level perspective on sustainability transitions : Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). *Typology of sociotechnical transition pathways*. 36(August 2003), 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Gomes, F. M. da S., Maria Cristina Carvalho do Espírito Santo, Ronaldo César Borges Gryscek, Maria Rita Bertolozzi, & Francisco Oscar de Siqueira França. (2020). Access to drinking water and sewage treatment in Brazil: a challenge for the control of waterborne infectious diseases. *International Journal of Phytoremediation*, 20(1), 135–136. <https://doi.org/http://doi.org/10.1590/S1678-9946202062071>
- Guimarães, C. M. M., & Galvão, V. (2014). *PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS* (Issue November 2013). <https://doi.org/10.13140/2.1.2790.7200>
- Hidalgo, D., & Martín-Marroquín, J. M. (2015). Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y León Region (Spain). *Food Research International*, 73(2015), 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.044>
- IAGUA. (2019). *A doble vida de la gran depuradora del Llobregat: depurar y reutilizar*. <https://www.iagua.es/blogs/xavi-duran-ramirez/doble-vida-gran-depuradora-llobregat-depurar-y-reutilizar>
- IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y Potencial de Generación de Biogás - Estudio Técnico PER 2011-2020*.
- IEA Bioenergy. (2021). Implementation of bioenergy in Brazil – 2021 update. *IEA Bioenergy*, 12.
- IRENA. (2024). Renewable Capacity Statistics 2024. In *International Renewable Energy Agency*. www.irena.org
- Jørgensen, U. (2012). Mapping and navigating transitions — The multi-level perspective compared with arenas of development. *Research Policy*, 41(6), 996–1010. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.03.001>
- Lam, K. L., & Van Der Hoek, J. P. (2020). Low-Carbon Urban Water Systems: Opportunities beyond Water and Wastewater Utilities? *Environmental Science and Technology*, 54(23), 14854–14861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05385>
- Lauer, M., & Thrän, D. (2018). Flexible biogas in future energy systems-sleeping beauty for a cheaper power generation. *Energies*, 11(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en11040761>

- Lettinga, G., Velsen, A. F. M. V. A. N., & Hobma, S. W. (1980). *Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment , Especially for Anaerobic Treatment. XXII*, 699–734.
- López-Aguilera, A., Morales-Polo, C., Victoria-Rodríguez, J., & Cledera-Castro, M. del M. (2025). Assessment of Biomethane Production Potential in Spain: A Regional Analysis of Agricultural Residues, Municipal Waste, and Wastewater Sludge for 2030 and 2050. *Sustainability (Switzerland)*, 17(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su17104742>
- Madrid Council. (2024). Annual Report VALDEMINGÓMEZ TECHNOLOGY PARK 2022. In *Madrid Environment and Mobility*.
- Markard, J., Suter, M., & Ingold, K. (2016). Socio-technical transitions and policy change - Advocacy coalitions in Swiss energy policy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18, 215–237. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.05.003>
- Max Alberto López-Maciél, Meireles, M., José Villar, André Oliveira, Edimar Ramalho, Fátima Lima...Alves, M. R. (2024). Impact of COVID-19 and Ukraine-Russia Conflict on the National Energy and Climate Strategies of Portugal and Spain. In *2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1–7.
- McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer- can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45(17), 7100–7106. <https://doi.org/10.1021/es2014264>
- Miki, R. E. (2017). XI-079 - PROJETO DE BENEFICIAMENTO DE BIOGÁS PARA USO VEICULAR NA ETE FRANCA DA SABESP: ESTÁGIO ATUAL E ETAPAS FUTURAS. *Congresso ABES-FENASAN*, 1, 1–12.
- Miki, R. E. (2018). Biometano produzido a partir de biogás de ETes e seu uso como combustível veicular. *Revista DAE*, 66. <https://doi.org/10.4322/dae.2017.021>
- Miki, R. E., Reami, L., & Cason, M. M. de A. (2019). Produção de biometano de biogás de Estação De Tratamento De Esgoto : Implantação do projeto e resultados preliminares. *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1, 1–13.
- MITECO. (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. *Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico, Gobierno de España*, 25. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
- MITECO. (2021). *Hoja de ruta del biogas*. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas->

noticias/el-miteco-saca-a-información-pública-la-propuesta-de-hoja-de-ruta-del-biogás-
/tcm:30-529298

- MITECO. (2025). *Inventario de instalaciones de Tratamiento de Aguas Residuales en España capacidade acima de 100.000 H.E.* PRTR España- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Poluentes. <https://prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>
- Montoya, F. G., Aguilera, M. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Renewable energy production in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33(May), 509–531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.091>
- Morales-Polo, C., Cledera-Castro, M. D. M., Revuelta-Aramburu, M., & Hueso-Kortekaas, K. (2021). Bioconversion process of barley crop residues into biogas—energetic-environmental potential in Spain. *Agronomy*, 11(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040640>
- Mukeshimana, M. C., Zhao, Z. Y., Ahmad, M., & Irfan, M. (2021). Analysis on barriers to biogas dissemination in Rwanda: AHP approach. *Renewable Energy*, 163, 1127–1137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.051>
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. A. (2021). Recent advances in renewable energy technology for the energy transition. *Renewable Energy*, 179, 877–884. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.111>
- Paula, A., Luisa, A., Carvalho, G. De, Aparecida, T., Silva, C., João, N., & Bonomo, B. (2024). *ENERGIAS VERDES: A BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA NO BRASIL Leandro Teófilo Pinto dos Reis 3 Luiz Daniel Albuquerque Dias 7.* 1–9.
- Peral, D., Sánchez, J., López, P., Vallés, F., & Fernández, P. (2023). Promoting sustainable growth and self-production of energy through the water industry, as key elements for climate change action. *In Natural Resources Forum, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.*, 47(4), 747–771.
- Pereira, E., Santos, J., Gabriel, E., Sousa, M. H. De, Dutra, E. D., Samuel, A., & Sales, A. T. (2023). *Northeast Region.* 1–18.
- PRTR España. (2014). *EDAR El Prat de Llobregat.* Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=6444
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., & Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7(JAN), 23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106>
- Raven, R. P. J. M., & Geels, F. W. (2010). Socio-cognitive evolution in niche development:

- Comparative analysis of biogas development in Denmark and the Netherlands (1973-2004). *Technovation*, 30(2), 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.08.006>
- REE. (2024). *Red Eléctrica Española. Informe del Sistema Eléctrico – Informe resumen de energías renovables 2023*. 1–2. https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2024-03/Informe_Renovables_2023.pdf
- Reyes, L., Zwagers, W. A., & Mulder, I. J. (2020). *Considering the Human-Dimension to Make Sustainable Transitions Actionable*.
- Rietow, J. C., Aisse, M. M., Baréa, L. C., Andreoli, C. V., & Possetti, G. R. C. (2023). Consolidation of the technology UASB reactors in the state of Paraná for the treatment of sanitary sewage. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 28, 1–12. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220298>
- Rip A; Kemp R. (1998). Technological Change. In *Rayner S, Malone L (eds.). Human choice and climate change. Volume II Resources and Technology*. Washington D.C: Batelle Press (Issue June, p. 74).
- Rosa, A. P., Lobato, L. C. da S., Borges, J. M., de Melo, G. C. B., & Chernicharo, C. A. de L. (2016). Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: Estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(2), 315–328. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>
- Rotmans, J., Kemp, R., & Van Asselt, M. (2001). Emerald Article: More evolution than revolution: transition management in public policy Jan Rotmans, René Kemp, Marjolein van Asselt. *Foresight*, 3(1), 15–31.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2019). *Portal Tratamento de Água. Sabesp conquista prêmio do BID por projeto de economia circular em Franca/SP*.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2022). *Fertilizante SABESP FÉRTIL*. <https://www.sabesp.com.br/assets/images/folhetos/sabesp-fertil.pdf>
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2023). Anexo Técnico II – Contrato de Programa do Município de Franca (versão completa). *Franca, SP: Sabesp*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxbhq.9>
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2024). *Relatório de sustentabilidade 2023*.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2025). *Relatório de*

- Salomon, K. R., & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33(9), 1101–1107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>
- Sedigas. (2023). *Estudio De La Capacidad De Producción De Biometano En España*.
- SEMIL, Secretaria de Meio Ambiente, I. e L. do E. de S. P. (2024). *Semil realiza visita técnica na única estação que gera energia do esgoto de SP*. <https://semil.sp.gov.br/2024/03/semil-realiza-visita-tecnica-na-unica-estacao-de-tratamento-de-sao-paulo-que-gera-energia-do-esgoto/>
- Smith, A., Stirling, A., & Berkhout, F. (2005). *The governance of sustainable socio-technical transitions*. 34, 1491–1510. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.07.005>
- SNIRH, S. N. de I. sobre R. H. (2015). *ATLAS ESGOTOS: DESPOLUIÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS – SISTEMA EXISTENTE - FRANCA*. https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/São_Paulo/Sistema_Atual/Franca.pdf
- Urbina, A. (2014). Solar electricity in a changing environment: The case of Spain. *Renewable Energy*, 68, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.005>
- Urrea Vivas, M. A., Seguí-Amórtégui, L., & Guerrero-García-Rojas, H. (2025). Analysis of greenhouse gas production at the El Prat del Llobregat wastewater treatment plant, Spain: the decarbonization challenge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10415–10432. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06338-z>
- Venkatesh, G., & Elmi, R. A. (2013). Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). *Energy*, 58, 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.025>
- Welfle, A. (2017). Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*, 105(2017), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>
- Zhang, Q., Smith, K., Zhao, X., Jin, X., Wang, S., Shen, J., & Ren, Z. J. (2021). Greenhouse gas emissions associated with urban water infrastructure: What we have learnt from China's practice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(4), 1–24. <https://doi.org/10.1002/wat2.1529>
- Zhen Xin Phuang, Zuchao Lin, Peng Yen Liew, Marlia Mohd Hanafiah, K. S. W. (2022). The

dilemma in energy transition in Malaysia: A comparative life cycle assessment of large scale solar and biodiesel production from palm oil. *Journal of Cleaner Production*, 350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131475>

CAPÍTULO 4: TRANSIÇÕES SOCIOTÉCNICAS NO SANEAMENTO: A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL E NA ESPANHA

RESUMO:

Nos últimos 20 anos, a transição energética global tem impulsionado o desenvolvimento de soluções sustentáveis. Nesse contexto, o biogás destaca-se como uma alternativa estratégica para a descarbonização e substituição de combustíveis fósseis, nos diversos setores, inclusive no saneamento. No entanto, sua implementação em larga escala nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) ainda enfrenta obstáculos regulatórios, técnicos e financeiros, tanto no Brasil quanto na Espanha. A consolidação dessa tecnologia é desigual e carece de modelos replicáveis e políticas estruturadas. Este estudo analisa comparativamente os caminhos adotados no Brasil e na Espanha na recuperação energética do biogás em ETEs, com foco nos fatores institucionais, técnicos e regulatórios que influenciam a transição energética em cada país. A pesquisa realiza uma revisão bibliográfica, fundamentada na Teoria das Transições Sociotécnicas, organizadas em quatro eixos analíticos: regime e paisagem sociotécnica, distribuição regional e tecnologias do biogás, papel das ETEs e estudos de casos de sucesso. Os resultados indicam que a Espanha segue uma trajetória predominantemente “top-down”, impulsionada por metas regulatórias da União Europeia, enquanto o Brasil apresenta uma dinâmica “bottom-up”, centrada em inovações locais e descentralizadas. Os dois países apresentam barreiras a serem vencidas, e a troca de experiências entre eles pode acelerar a adoção de práticas sustentáveis na valorização do biogás. A pesquisa reforça a importância do planejamento de longo prazo e da articulação entre diferentes atores para consolidar essa rota energética, e contribui para a compreensão dos fatores contextuais que moldam as transições em ambientes urbanos distintos.

Palavras chave - Metano, Bioenergia, Transições Tecnológicas, Energia, Mudanças Climáticas, Economia Circular

4.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos, a necessidade de transição energética global tem impulsionado a busca por soluções tecnológicas sustentáveis, especialmente em países comprometidos em estabelecer metas ambiciosas para acelerar os planos de descarbonização (Venkatesh & Elmi, 2013; Østergaard et al., 2021; Zhen Xin Phuang, Zuchao Lin, Peng Yen Liew, Marlia Mohd Hanafiah, 2022). No campo das alternativas sustentáveis, o biogás tem se consolidado como uma solução estratégica para reduzir emissões (Chernicharo et al., 2015; Chan Gutiérrez et al., 2018), maximizar o uso de recursos renováveis (McCarty et al., 2011; Chrispim et al., 2021) e substituir combustíveis fósseis (Battista et al., 2020). A valorização do biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) tem sido uma abordagem importante para alinhar metas ambientais e econômicas.

Nesse cenário, a União Europeia (UE) destaca-se por políticas robustas voltadas à descarbonização, eficiência energética e promoção de tecnologias limpas, refletindo na sua posição como segunda maior produtora global de energias renováveis, com uma capacidade instalada de 641.478 MW anuais, atrás apenas da Ásia, que lidera com 1.961.099 MW (IRENA, 2024). Na União Europeia, o Conselho Europeu implementou uma nova Diretiva sobre Tratamento de Águas Residuárias Urbanas (DIRECTIVA (UE) 2024/3019 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, 2024) estabelecendo a meta de neutralidade energética em instalações de tratamento acima de 10.000 habitantes-equivalentes até 2040, por meio da recuperação energética do biogás, um possível substituto das importações de gás natural. No contexto europeu, a Espanha tem buscado se posicionar como uma referência na adoção de práticas que promovam a recuperação energética de resíduos, alinhando-se às diretrizes da União Europeia para transição energética. A proposta da Hoja de Ruta del Biogás, elaborada pelo Ministério para a Transição Ecológica, demonstra o desejo da Espanha em impulsionar a produção de biogás, destacando seu papel na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção da economia circular (MITECO, 2021).

Embora o Brasil não possua políticas robustas e específicas para a recuperação energética do biogás em ETEs como na Espanha, o país conta com casos de sucesso que demonstram a viabilidade da tecnologia e servem como referência para futuras expansões. Destacam-se, por exemplo, a ETE Ouro Verde, operada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), e a ETE Franca, gerida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Essas iniciativas evidenciam o potencial de valorização energética do biogás no Brasil, apesar da deficiência de uma política nacional estruturada e de incentivos específicos para essa tecnologia. A falta de um arcabouço regulatório claro ainda representa um entrave, dificultando a atração de

investimentos e a implementação em larga escala (De Oliveira & Negro, 2019; Borges et al., 2021; Bertolino et al., 2023). Além disso, a predominância da matriz hidrelétrica historicamente reduziu a pressão por fontes energéticas alternativas, impactando o ritmo de adoção do biogás no setor de saneamento (Bertolino et al., 2023). No entanto, o Brasil apresenta um vasto potencial para a valorização energética do biogás devido à abundância de biomassa disponível, especialmente em grandes centros urbanos e regiões agroindustriais residuárias (Welfle, 2017; IEA Bioenergy, 2021).

A evolução da valorização do biogás no Brasil e na Espanha reflete um processo de mudanças tecnológicas. Em estudos sobre inovação e sustentabilidade, esse tipo de transformação é frequentemente analisado sob a perspectiva das transições tecnológicas, que resultam da interação dinâmica entre os componentes tecnológicos e os contextos sociais, culturais, econômicos e políticos mais amplos (Geels, 2002, 2011; Elzen et al., 2012; Jørgensen, 2012; Bergek et al., 2015; Reyes et al., 2020). Nesse processo, as inovações emergem, se desenvolvem e eventualmente substituem tecnologias convencionais.

Nos últimos anos, as pesquisas sobre transições tecnológicas e o uso do biogás em diferentes contextos geográficos avançaram significativamente. Estudos clássicos, como a gestão de transições sustentáveis, envolvem aprendizagem e adaptação contínua, essenciais para a implementação eficaz de novas tecnologias (Smith et al., 2005). Raven & Geels, 2010 comparam o desenvolvimento do biogás na Dinamarca e nos Países Baixos, destacando como a aprendizagem e a adaptação são componentes vitais para o desenvolvimento tecnológico em diferentes contextos. Geels, 2002 descreve como as transições tecnológicas são processos evolutivos que envolvem ajustes e reconfigurações contínuas, ressaltando a importância da aprendizagem e da adaptação para o sucesso das novas tecnologias. Bertolino et al., 2023 analisaram o desenvolvimento do biogás no Brasil e na Itália, revelando como políticas públicas e estratégias regulatórias afetam a distribuição dos investimentos e a justiça socioambiental nessas transições.

A recuperação energética do biogás em ETEs representa uma estratégia promissora para ampliar a sustentabilidade do setor de saneamento (Salomon & Silva Lora, 2009; Puyol et al., 2017; Chrispim et al., 2021), mas sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios significativos tanto na Espanha quanto no Brasil. Embora a Espanha tenha avançado na adoção da digestão anaeróbia e na valorização do biogás em algumas regiões, o país ainda não consolidou um modelo plenamente eficiente e amplamente replicável (López-Aguilera et al., 2025; Urrea Vivas et al., 2025). No Brasil, por outro lado, a expansão da recuperação energética do biogás ocorre de forma mais pontual, com iniciativas descentralizadas e experiências inovadoras que podem servir como referência para novos projetos (ABiogás, 2021).

Apesar do crescente interesse no aproveitamento energético do biogás em ETEs, especialmente no contexto das metas globais de descarbonização e economia circular, ainda são escassos os estudos comparativos que integrem dimensões técnicas, regulatórias e sociotécnicas em diferentes contextos nacionais. Em particular, há uma lacuna no entendimento de como trajetórias institucionais e arranjos tecnológicos distintos influenciam a adoção e a difusão dessa tecnologia, dificultando a identificação de estratégias comuns e lições aplicáveis entre países com diferentes níveis de maturidade no setor.

Diante desse contexto, este estudo busca explorar os caminhos para a recuperação energética do biogás nos dois países, reconhecendo que ambos enfrentam desafios distintos e que há oportunidades para troca de conhecimento e adaptação de boas práticas. A análise comparativa entre Brasil e Espanha permite avaliar como o contexto, políticas públicas e o desenvolvimento tecnológico influenciam a transição para o uso do biogás em ETEs. Além disso, busca-se identificar diretrizes que possam ser aplicadas em diferentes contextos, considerando as particularidades de cada país.

Para que a transição tecnológica no setor de biogás seja eficaz, a aprendizagem e a adaptação contínua são essenciais, exigindo ajustes e reconfigurações ao longo do processo. Assim, este artigo investiga as seguintes questões: Como políticas públicas, marcos regulatórios e incentivos financeiros têm influenciado a adoção da recuperação energética do biogás em ETEs na Espanha e no Brasil? Quais são os principais substratos utilizados na produção de biogás na Espanha e no Brasil e como essa diversidade contribui para a consolidação da tecnologia em diferentes setores? De que forma as ETEs funcionam como espaços de experimentação tecnológica e impulsionam a difusão da recuperação energética do biogás? Que lições podem ser extraídas a partir de casos bem-sucedidos de valorização do biogás em ETEs espanholas e brasileiras, e como elas podem ser adaptadas a diferentes contextos regionais?

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. Abordagem Geral

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, exploratório-comparativa, com foco na análise da recuperação energética do biogás em ETEs no Brasil e na Espanha. O trabalho fundamenta-se em três procedimentos principais: revisão documental e bibliográfica, análise de dados secundários provenientes de bases oficiais e públicas e estudos de caso representativos. O enquadramento teórico segue a Teoria das Transições Sociotécnicas, com ênfase no modelo de

Múltiplos Níveis (MLP – Multi-Level Perspective) (Rip A; Kemp R., 1998; Geels, 2002, 2011; Geels & Schot, 2007).

Esse modelo possibilita a análise da evolução de tecnologias sustentáveis a partir da interação entre três níveis: a paisagem sociotécnica (fatores externos e de longo prazo); Regime sociotécnico (normas, práticas e instituições vigentes); Nichos tecnológicos (espaços protegidos para inovação e experimentação).

A abordagem teórica de Geels (2002) sobre transições sociotécnicas oferece uma lente interpretativa adequada. O autor destaca a dinâmica de interação entre os três níveis do MLP, conforme apresenta a Figura 4-1, onde demonstra graficamente os fluxos interdependentes ao longo do tempo. Nesse esquema, a estabilidade do regime sociotécnico é desafiada por pressões descendentes, provenientes tanto do nível da paisagem (“top-down”), quanto das pressões ascendentes, provocadas pelos nichos inovadores (“bottom-up”). A paisagem exerce influência através de fatores exógenos, como mudanças geopolíticas, crises energéticas ou transformações culturais, que podem desestabilizar o regime vigente. Simultaneamente, os nichos funcionam como espaços experimentais onde tecnologias emergentes se desenvolvem e se fortalecem até alcançarem maturidade suficiente para romper ou transformar o regime dominante. O modelo sugere que transições sociotécnicas ocorrem quando há alinhamento entre pressões externas e o fortalecimento interno das inovações, abrindo uma janela de oportunidade para mudanças estruturais. Essa perspectiva permite compreender como diferentes trajetórias de transição podem emergir em contextos distintos, como ilustram os casos do Brasil e da Espanha na recuperação energética do biogás.

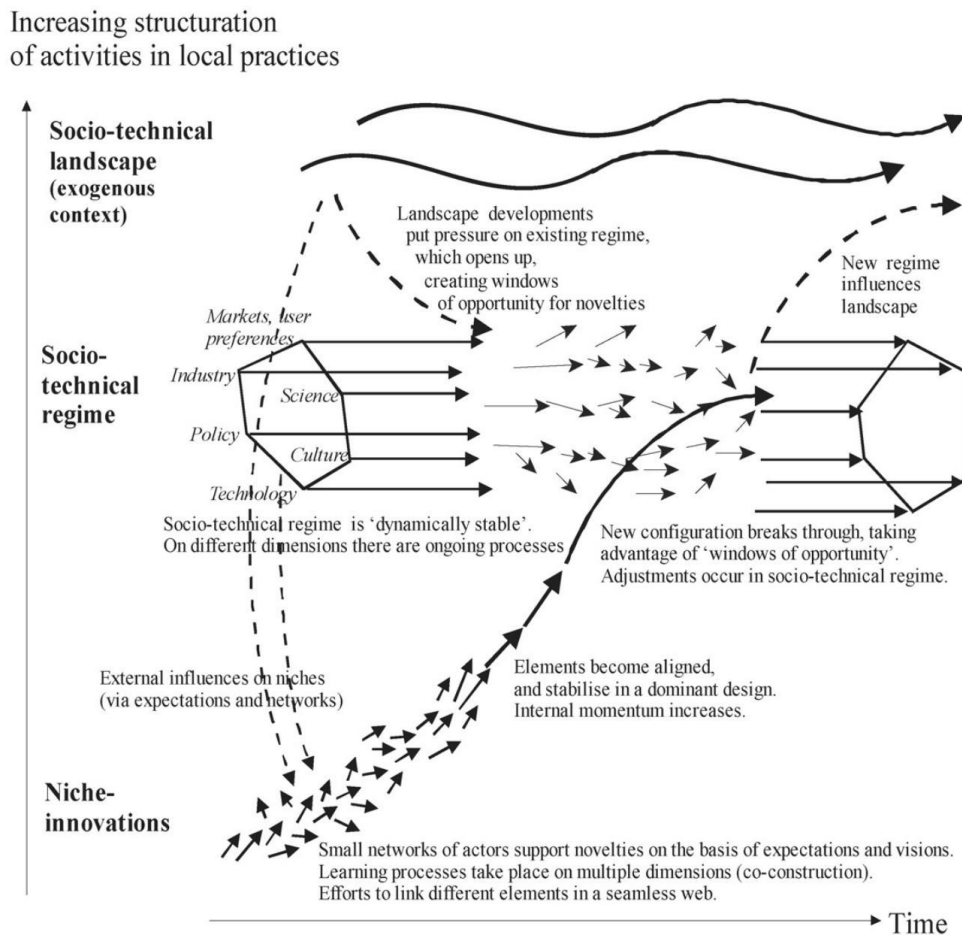


Figura 4-1 Perspectiva multinível sobre transições

Fonte: Geels & Schot, 2007.

4.2.2. Fontes de Dados

As informações foram extraídas a partir de fontes de dados oficiais brasileiras, como o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás), a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); as fontes de dados oficiais espanholas, como o Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), a Red Eléctrica de España (REE) e o PRTR Espanha; assim como as fontes internacionais, como a International Renewable Energy Agency (IRENA), o Eurostat, European Biogas Association (EBA), e a European Environment Agency (EEA), além de artigos científicos com abordagem aplicada sobre biogás e saneamento.

4.2.3.Estrutura Analítica

A comparação entre Brasil e Espanha foi estruturada em quatro eixos temáticos:

1. Paisagem e Regime Sociotécnico: Análise histórica e institucional de como as políticas públicas e o contexto sociotécnico condicionaram o desenvolvimento da recuperação energética do biogás nos dois países, em articulação com o cenário energético e a evolução das políticas ambientais e de saneamento
2. Distribuição Regional e Tecnologias do Biogás: Levantamento da distribuição geográfica das ETEs com recuperação energética, identificando padrões espaciais, substratos predominantes e características regionais que influenciam a adoção tecnológica.
3. Papel das ETEs: Analisa-se o uso de diferentes rotas tecnológicas, tais como digestão anaeróbia, cogeração, purificação e aproveitamento do biogás para transporte ou injeção em rede.
4. Casos de Sucesso: Seleção de um caso brasileiro (ETE Franca) e um espanhol (ETE El Prat de Llobregat). Com critérios de seleção utilizou-se a escala operacional, inovação tecnológica, resultados mensuráveis, replicabilidade e circularidade dos subprodutos.

4.2.4.Procedimentos de Análise

O processo analítico foi realizado de forma dedutiva e interpretativa, buscando evidenciar como os elementos estruturais (eixo 1), as práticas técnicas em ETEs (eixos 2 e 3) e as experiências concretas (eixo 4) se articulam na construção das trajetórias nacionais da recuperação energética do biogás.

Após esta etapa, foi realizada uma análise cruzada das informações dos dois países, com foco nas oportunidades e barreiras à difusão da tecnologia, considerando aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. Os dados foram organizados para identificar padrões, assimetrias e convergências entre Brasil e Espanha.

4.2.5.Limitações do Estudo

O estudo apresenta algumas limitações, entre as quais se destacam as diferenças nos métodos de coleta e agregação de dados entre os países, o que pode restringir a comparabilidade direta de determinados indicadores. Além disso, há a dependência de dados secundários, sujeitos a defasagem temporal e a atualizações desiguais, bem como a ausência de entrevistas primárias com

operadores de ETEs, que poderiam oferecer um aprofundamento maior sobre aspectos práticos da operação.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos a partir dos quatro eixos analíticos definidos na metodologia (paisagem e regime sociotécnico; distribuição regional e tecnologias do biogás; papel das ETEs; e casos de sucesso), de modo a integrar dimensões técnicas, regulatórias e institucionais que influenciam a recuperação energética do biogás no Brasil e na Espanha. A organização por eixos permite compreender tanto as especificidades de cada contexto nacional quanto os pontos de convergência, revelando como diferentes trajetórias e arranjos sociotécnicos moldam a adoção dessa tecnologia. Ao longo da análise, são destacados padrões, assimetrias e interações relevantes para o avanço da recuperação energética no saneamento, relacionando os achados com os conceitos paisagem e regime sociotécnico e de nicho tecnológico, conforme a Teoria das Transições Sociotécnicas.

4.3.1. Paisagem e Regime Sociotécnico

ESPANHA

A transição energética na Espanha nos últimos 30 anos foi marcada por uma mudança em direção à produção de energia renovável, uma redução na dependência do carvão e uma ênfase crescente na sustentabilidade e eficiência. Este movimento reflete não apenas o compromisso espanhol com as metas climáticas internacionais, mas também o esforço para garantir a independência energética (MITECO, 2020). Na década de 1990, preocupações com sustentabilidade e independência energética levaram o governo espanhol a começar a produzir energia a partir de fontes renováveis (Capellán-Pérez et al., 2018). O país se tornou um líder global em energia eólica devido às metas ambiciosas estabelecidas pelo seu Plano de Energias Renováveis (Plan de Energías Renovables - PER) e incentivos governamentais entre 2000-2020 (Montoya et al., 2014; Urbina, 2014). A década de 2020 foi marcada pela aprovação do Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (2021-2030), visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 23% em relação a 1990 (MITECO, 2020).

Em 2023, as instalações de energia renovável representavam 61,3% do parque gerador de eletricidade real na Espanha (REE, 2024). A partir de 2018, houve uma expansão notável da tecnologia solar fotovoltaica, cuja capacidade mais que quadruplicou no período, passando de cerca de 7.000 MW em 2014 para 31.016 MW em 2023 (Figura 4-1). Isto contribuiu significativamente

para aumentar o protagonismo das energias renováveis no contexto espanhol, juntamente com o domínio geral do vento, também manteve crescimento contínuo, alcançando 31.028 MW em 2023. Por outro lado, as demais fontes, como a hidrelétrica (20.140 MW em 2023), biogás (272 MW), resíduos urbanos e bioenergia sólida, mantiveram-se relativamente estáveis (Figura 4-1).

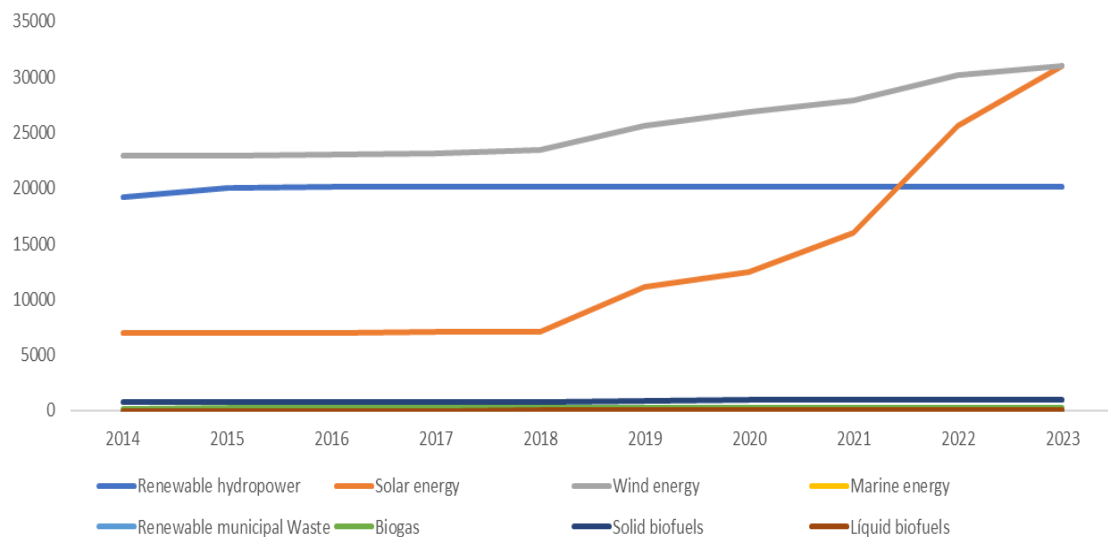


Figura 4-2 Evolução da capacidade instalada em MW/ano em fontes de energia renováveis na Espanha. Dados numéricos públicos obtidos da plataforma de dados da Agência Internacional de Energia Renovável – ©IRENA (IRENA, 2024).

Outras influências de ordem global também podem ter afetado o contexto energético europeu. A saída dos Estados Unidos do Acordo de Paris durante o primeiro mandato de Donald Trump, embora tenha representado um retrocesso global no combate às mudanças climáticas, abriu espaço para que a União Europeia impulsionasse seus esforços rumo à consolidação da liderança em energias renováveis e à transição para uma economia de baixo carbono (Fernandez, 2018). Além disso, a eclosão da guerra entre Rússia e Ucrânia, em 2022, expôs a dependência energética da Europa e impulsionou o interesse por fontes renováveis, em um cenário já desestruturado pela pandemia de COVID-19, que impôs desafios adicionais à gestão de crises globais (López-Maciél et al., 2024). Embora a Espanha tivesse baixa dependência do gás russo (Cosmen Junceda, 2023), foi afetada pela alta nos preços da energia. Como resposta, um efeito secundário desta crise energética foi a rápida ascensão de energias renováveis no país, especialmente a fotovoltaica no período de 2021-2023 (Figura 4-1), impulsionada por políticas públicas como o Real Decreto-Lei 6/2022, que “adota medidas urgentes no âmbito do Plano Nacional para responder às consequências económicas e sociais da guerra na Ucrânia”, tais ações garantiriam a segurança energética e a capacidade de autossuficiência nacional, em concordância com o Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (MITECO, 2020).

Nos últimos 20 anos, a Espanha buscou diversificar suas fontes de energia, fomentando a ascensão da eólica e solar como as duas principais tecnologias renováveis para geração de energia (Urbina, 2014). Apesar do domínio dessas tecnologias no setor de energia renovável, o biogás surgiu como uma ferramenta adicional para aumentar a sustentabilidade, reduzir o desperdício e contribuir para uma economia circular. Desempenhando um papel relativamente modesto, mas crescente, na transição energética espanhola nas últimas duas décadas, o biogás recuperado consiste no produzido principalmente em aterros sanitários e no setor agroindustrial. Nessa época, seu desenvolvimento foi lento, em grande parte devido à falta de estruturas políticas abrangentes ou incentivos para apoiar sua ampla adoção (IDAE, 2011). Entretanto, foi uma época marcada pelo surgimento do primeiro projeto nacional no âmbito da produção de biogás agroindustrial, o projeto PROBIOGAS, de caráter tecno-científico apoiado pelo Ministério de Ciência e Inovação (2007-2010), abrindo as portas para a inserção do biogás como tema chave para a sustentabilidade no meio agroindustrial espanhol.

A publicação de sucessivos Planos Nacionais de Energia Renovável trouxe perspectivas crescentes para o setor de energia de biogás na Espanha. Recentemente, o último PER publicado (2011-2020) estimou um aumento da capacidade instalada de 152 MW em 2005 para 400 MW em 2020 (IDAE, 2011). Na década de 2020 observa-se um interesse renovado no biogás como parte da estratégia mais ampla de transição energética e descarbonização da Espanha. O Acordo Verde Europeu e o Plano Nacional Integrado de Energia e Clima da Espanha 2021-2030 enfatizaram o biogás, particularmente sob a forma de biometano, como um componente importante da transição energética (Fetting, 2020; MITECO, 2020). O biogás é visto desempenhando um papel duplo: reduzindo as emissões e servindo como um combustível renovável; e de forma complementar às energias renováveis intermitentes, como eólica e solar (Lauer & Thrän, 2018; Gadirli et al., 2024). O setor agropecuário espanhol oferece potencial significativo para expansão do biogás, ajudando a gerenciar resíduos de forma sustentável enquanto gera energia (Morales-Polo et al., 2021).

BRASIL

No Brasil, a substituição de fontes fósseis por fontes renováveis é um objetivo estratégico, impulsionado por diversas políticas e metas ao longo das décadas. Um marco histórico fundamental nesse processo foi a criação do Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool), lançado em 14 de novembro de 1975 e regulamentado pelo Decreto Nº 76.593. Desenvolvido em resposta à crise do petróleo, o programa visava substituir a gasolina pelo etanol de cana-de-açúcar, reduzindo a dependência do petróleo importado e promovendo o uso de fontes renováveis no setor de transportes. Pioneiro na produção de biocombustíveis, o Pró-Álcool consolidou a base desse setor

no Brasil, tornando-se referência para outros países. Atualmente, Brasil e Estados Unidos lideram a produção global de biocombustíveis, sendo responsáveis por mais de 80% do etanol e cerca de 37% do biodiesel mundial (Brazil, 2022).

Enquanto isso, no setor elétrico, a transição para fontes renováveis se consolidou de forma mais gradual. Na década de 1990, a maior parte da energia elétrica consumida no país era proveniente de fontes hidrelétricas, com pouca diversificação nas fontes renováveis. No entanto, a partir dos anos 2000, com políticas de incentivo à energia eólica, solar e ainda ampliar a capacidade instalada em hidrelétricas o Brasil começou a expandir sua matriz. A partir da década de 2000, o Brasil começou a estruturar um conjunto de políticas mais amplas para incentivar o uso de fontes renováveis no setor elétrico e expandir a participação dessas fontes no mix energético, em especial a ampliação significativa da capacidade de energia a partir de hidrelétricas. O marco regulatório que consolidou essa abordagem foi a Política Nacional de Energia (PNE), que se desdobrou em documentos como o PNE 2030, implementada em 2007 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para orientar as escolhas do Ministério de Minas e Energia (MME) nas suas políticas e ações (Brazil, 2007b).

O objetivo do PNE 2030 era alcançar 45% de participação de fontes renováveis até 2030, com um aumento na presença de energia solar e eólica. Já o PNE 2050, lançado em 2022, reflete um compromisso mais robusto com a transição energética, visando uma maior ênfase na sustentabilidade e na redução das emissões de gases de efeito estufa, com a ampliação da capacidade instalada de energias renováveis, como a solar e a eólica. Ainda há uma prioridade de avançar na capacidade instalada da hidráulica, isso inclui a meta de atingir uma capacidade total instalada de 14 GW a 16 GW em pequenas usinas hidrelétricas até 2030 (Brazil, 2022).

As iniciativas para ampliação de fontes limpas refletiram no aumento da capacidade instalada de hidrelétricas, a qual avançou de 73.433 MW em 2006 (Brazil, 2007a) para 109.903 MW em 2023 (Brazil, 2023a). A energia solar partiu de apenas 21 MW em 2014 e alcançou 37.449 MW em 2023, demonstrando crescimento exponencial impulsionado pela queda no custo das tecnologias fotovoltaicas e pela criação de marcos regulatórios favoráveis, como a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL e a Lei nº 14.300/2022, que instituiu o Marco Legal da Geração Distribuída. A energia eólica também apresentou expansão expressiva, saindo de 4.888 MW em 2014 para 29.135 MW em 2023, posicionando o Brasil entre os principais produtores da América Latina e ocupando a 7ª posição no ranking mundial de capacidade acumulada (IRENA, 2024). Já a energia hidrelétrica, embora ainda represente a maior parcela da matriz, com 109.903 MW em 2023, tem mostrado sinais de estabilização desde 2019.

Paralelamente, as bioenergias, embora menos visíveis no debate público, também foram apresentadas como um vetor estratégico para a diversificação da matriz energética brasileira. A biomassa, com destaque para o setor sucroenergético, foi priorizada com projeções de acréscimo de 4,75 GW a partir da cana-de-açúcar e 1,3 GW oriundos de resíduos urbanos e outras biomassas entre 2015 e 2030 (Brazil, 2007b). Nesse contexto, a capacidade instalada de biogás cresceu de 178 MW em 2014 para 509 MW em 2023 (Figura 4-2), impulsionada por iniciativas que aproveitam resíduos da agroindústria. Os biocombustíveis sólidos também evoluíram de 12.145 MW para 17.070 MW no mesmo período, reafirmando a relevância histórica da biomassa no setor elétrico nacional.

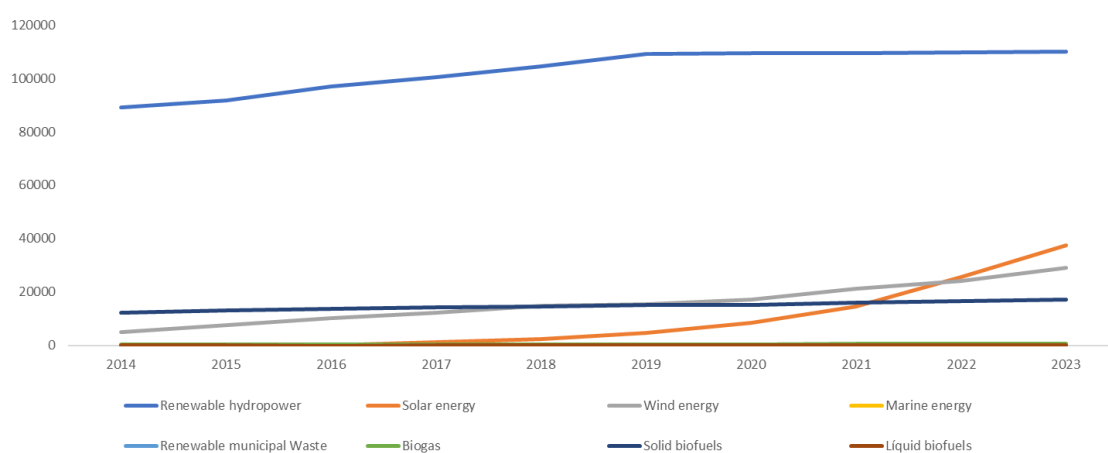


Figura 4-3 Evolução da capacidade instalada em MW/ano em fontes de energia renováveis no Brasil.

Fonte: Dados numéricos públicos obtidos da plataforma de dados da Agência Internacional de Energia Renovável – ©IRENA (IRENA, 2024).

Mas recentemente, foi aprovado o Plano de Ação de Transição Energética Nacional em 2025 (PATEN), que busca alinhar as políticas de energia com os objetivos climáticos do país, promovendo a diversificação e a modernização da matriz energética, e incentivando a inovação tecnológica no setor.

Contudo, o país ainda enfrenta desafios para atingir plenamente suas metas. Embora a política, o ritmo de implementação e a estrutura de incentivos ainda precisam de ajustes para garantir o atendimento das metas climáticas e de matriz energética sustentável até 2030. O Brasil, portanto, caminha para uma maior diversificação de sua matriz energética, mas com desafios a serem superados para garantir que as metas sejam integralmente atendidas.

4.3.2.Distribuição Regional e Tecnologias do Biogás

ESPANHA

A produção de biogás na Espanha é regionalmente diversa, refletindo amplamente as capacidades agrícolas, industriais e de gestão de resíduos em diferentes áreas, cujo desenvolvimento tecnológico foi moldado por estruturas políticas e recursos regionais (Calero, M., et. al., 2023) (Figura 4-3). De acordo com a European Biogas Association (EBA), 0,79 bilhões de metros cúbicos (bcm) de biogás foram produzidos em 2021, com 97% vindos de 250 usinas de biogás e os 3% restantes de 4 usinas de biometano. Uma quinta usina de biometano estava programada para começar a operar em 2022, adicionando 0,5 bcm à produção geral. Além disso, cerca de 30 novas usinas de biometano estavam em construção e deviam entrar em operação antes de 2025 (European Commission, 2023). Em 2020, a maioria das usinas de biogás espanholas eram de tratamento de lodo de águas residuárias (38%), seguidas por aquelas baseadas em resíduos agrícolas (25%), aterros sanitários (19%) e outras fontes (19%) (Sedigas, 2023).

Na região da capital, a produção de biogás se concentra fortemente em ETEs com tecnologias projetadas para maximizar a recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e lodo de águas residuárias (Peral, D., et., al., 2023; Madrid Council, 2024). A Catalunha é uma das regiões líderes na produção de biogás, particularmente a partir de resíduos agrícolas e ETEs.

No sul da Espanha, a Andaluzia se destaca pelo uso de biogás de resíduos agroindustriais, particularmente da produção de azeite de oliva e do processamento de alimentos (Cardoza, D.; Romero et al., 2021). As iniciativas de biogás da região estão intimamente ligadas ao modelo de economia circular, onde resíduos orgânicos da agricultura e do processamento de alimentos são convertidos em energia, reduzindo a pegada ambiental dessas indústrias (Agencia Andaluzia de la Energia, 2011). Castilla y León é outra região espanhola de grande destaque no campo do biogás. Localizada na parte norte do planalto da Península Ibérica, é a maior região da Espanha e tem uma vasta paisagem agrícola que a torna um centro para projetos de biogás agrícola, especialmente aqueles que usam esterco de gado (Hidalgo & Martín-Marroquín, 2015).

De acordo com os dados do Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía – IDAE (2024), a distribuição da potência elétrica acumulada proveniente do biogás na Espanha revela uma predominância clara do aproveitamento energético em aterros sanitários, que representam 164.854 kW, configurando-se como a principal fonte do setor. Em seguida, destacam-se as estações de

tratamento de águas residuárias (WWTP), responsáveis por 46.621 kW, e os substratos de origem pecuária (27.399 kW) e agrícola (23.461 kW). A menor contribuição é observada nos resíduos orgânicos municipais, com 9.235 kW. Os dados foram sistematizados em uma tabela (Material Suplementar 01 em anexo) e estão representados no gráfico da Figura 4-3 que ilustra a heterogeneidade da contribuição dos diferentes substratos para a geração elétrica a partir do biogás.

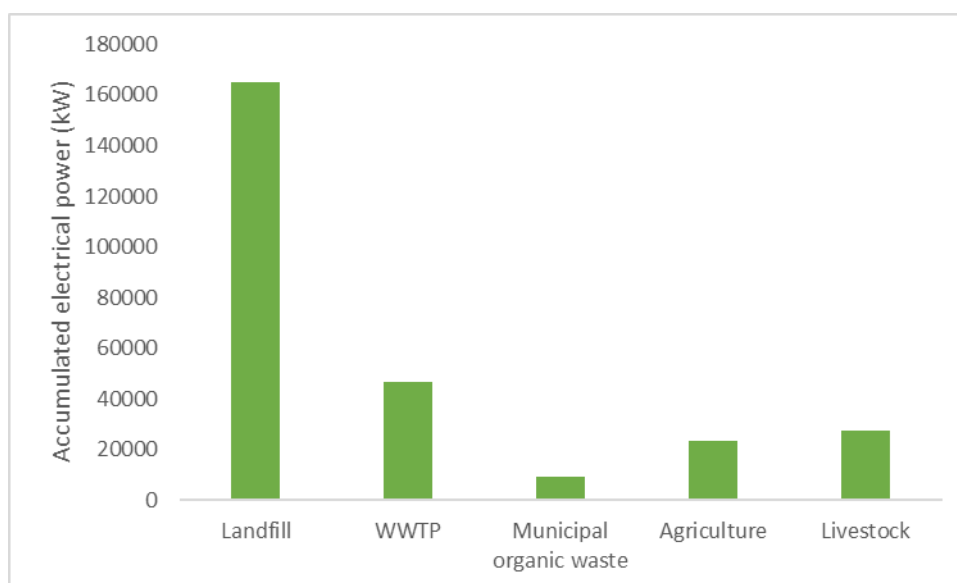


Figura 4-4 Potência elétrica acumulada (KW) de diferentes fontes de biogás na Espanha.

Fonte: IDAE, 2024

Embora o biogás não tenha sido tão fundamental na transição energética da Espanha quanto a energia eólica e solar, sua importância ganhou destaque nas últimas duas décadas. Olhando para o futuro, espera-se que o biogás contribua mais substancialmente para a descarbonização da economia, particularmente em setores como agricultura, gestão de resíduos e indústrias que são difíceis de eletrificar. Com a introdução de novas estruturas políticas que promovem a economia circular e gases renováveis, o biogás está prestes a se tornar um componente mais essencial da futura estratégia de energia sustentável da Espanha.

BRASIL

A expansão do biogás no Brasil tem se dado de forma assimétrica, com algumas regiões avançando mais rapidamente, conforme a disponibilidade de matéria-prima, a infraestrutura instalada e a articulação institucional. De acordo com o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogas Energias Renováveis, 2025), em 2024 o país produziu cerca de 4,7 bilhões

de Nm^3 por ano, com 1.587 plantas em operação, das quais 248 são novas unidades em relação à 2023, representando um crescimento de 18%. No Mato Grosso do Sul, predominam resíduos industriais da agroindústria e frigoríficos. No Rio de Janeiro, o setor de saneamento é a principal fonte, com destaque para aterros e ETEs, como a planta de Seropédica. São Paulo lidera em capacidade instalada, com diversidade de fontes industriais, sanitárias e agropecuárias. Já o Paraná se destaca pelo uso de resíduos agropecuários, especialmente da suinocultura, sendo o estado com maior número de plantas. A distribuição regional é marcada por disparidades: o Paraná lidera em número de usinas, concentrando cerca de 37% do total nacional. No entanto, outros estados apresentam crescimentos proporcionais mais expressivos. O estado do Rio de Janeiro apresentou a maior variação percentual no número de usinas de biogás entre 2023 e 2024, com um crescimento de 44%, passando de 18 para 26 unidades. Em seguida, o Mato Grosso do Sul registrou um aumento de 41% no mesmo período.

Em termos dos substratos utilizados, de acordo com a Figura 4-4, a maior parte do biogás produzido no Brasil provém da decomposição anaeróbia de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários e de ETEs, representando mais de 60% da produção nacional. O restante é representado pela geração por indústrias (21%) e pelo setor agropecuário (18%)

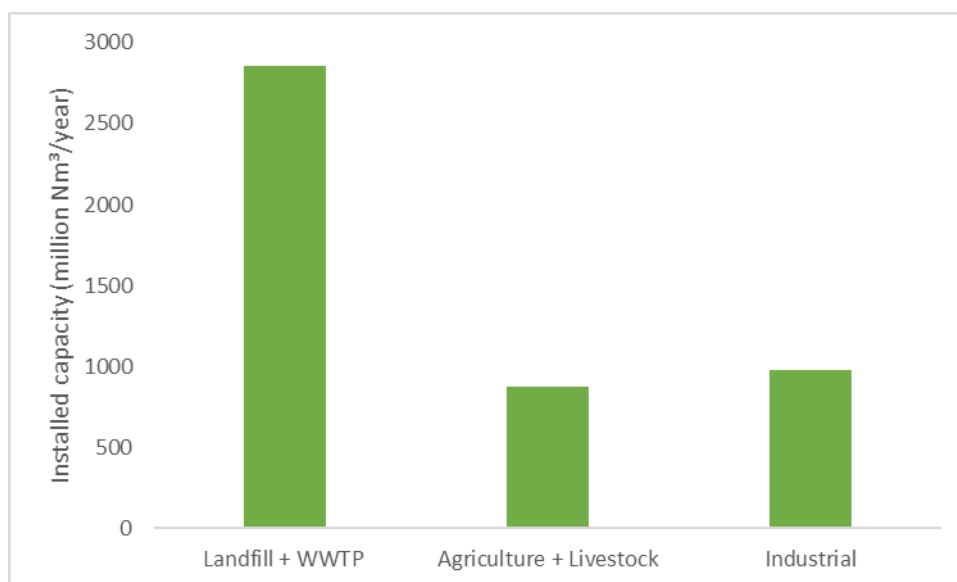


Figura 4-5 Capacidade instalada (milhão de Nm^3/ano) de diferentes fontes de biogás no Brasil.

Fonte: Dados obtidos no (CIBiogas Energias Renováveis, 2025).

Defini-se: os substratos industriais os efluentes e resíduos orgânicos gerados ao longo dos processos produtivos; os substratos de origem agrícola e pecuária incluem dejetos como esterco, urina, fezes, água de lavagem, restos de ração e carcaças de animais mortos não abatidos e por fim os substratos de aterros sanitários e ETEs são os resíduos sólidos urbanos e o lodo gerado.

Apesar do setor agropecuário concentrar o maior número de plantas de biogás no Brasil, com 1.238 unidades, a maior parte da capacidade instalada está no segmento de saneamento (aterros sanitários e ETEs), responsável por 61% do volume total produzido, equivalente a 2.855 milhões de Nm³ por ano, a partir de apenas 149 unidades. Esse contraste evidencia a concentração da produção em plantas de maior porte no setor de saneamento, enquanto a agropecuária se caracteriza por um número elevado de unidades, geralmente de menor escala.

À medida que o Brasil avança em direção à descarbonização e à segurança energética, o biogás se apresenta como um vetor estratégico na transição para uma matriz mais limpa e diversificada. Nesse contexto, o fortalecimento do nicho de recuperação de biogás será fundamental para ampliar seu protagonismo, que historicamente tem atuado como principal agente de mobilização em torno dessa bandeira. A consolidação desse nicho dependerá de uma combinação de incentivos financeiros, avanço regulatório, parcerias público-privadas e maior conscientização sobre os benefícios ambientais, econômicos e energéticos do biogás, contribuindo de forma relevante para os compromissos de sustentabilidade do país.

4.3.3.O Papel das ETEs na produção de biogás

ESPANHA

As ETE representam um grande número de plantas de biogás ativas na Espanha. Em geral, todas as ETE com capacidade superior a 100.000 habitantes equivalentes (menos de 1% de todas as 2.232 ETE existentes na Espanha) têm digestores anaeróbios de lodo de águas residuárias, atendendo até 22 milhões de habitantes no território nacional (MITECO, 2025). Historicamente, a ETE La China, localizada em Madrid foi a primeira planta espanhola a incorporar um digestor anaeróbio, criada em 1973, sendo pioneira no tratamento anaeróbio de lodos, permitindo a produção de biogás e o seu aproveitamento energético. Esta iniciativa lançou as bases para o surgimento dos primeiros marcos regulatórios e desenvolvimento de tecnologias de digestão anaeróbia em outras plantas do país. O Real Decreto 109/1988 estabeleceu o regime jurídico que promoveu a modernização das instalações de tratamento e a adoção de tecnologias mais avançadas, incluindo a

digestão anaeróbia. Em 1991, a Diretiva 91/271/CEE (Diretiva Águas Residuárias Urbanas) estabeleceu normas mínimas de tratamento de águas residuárias nos Estados-Membros, e, posteriormente, o Plano Nacional de Qualidade da Água (2007) trouxe medidas para promover tecnologias sustentáveis no tratamento de águas residuárias, apoiando a ascensão da digestão anaeróbia como uma opção viável para a gestão de lodos de águas residuárias.

Na Espanha, em 2020, 87% das águas residuárias urbanas foram tratadas em conformidade com a legislação da União Europeia, com isso houve uma redução de 40,8% nas emissões de gases de efeito estufa oriundas do setor de tratamento de águas residuárias entre 2010 e 2022. Ainda em 2020, o país gerou 557.405 toneladas de lodo de águas residuárias, das quais 84,7% foram utilizadas na agricultura e em outros usos do solo, 4,9% encaminhadas a aterros sanitários, 7,9% incineradas e 2,5% gerenciadas sem detalhamento adicional (EEA, 2023; European Commission, 2023).

O governo da Espanha fornece informações públicas sobre emissões para o ar, água, solo e transferências de resíduos dos quase 6.000 complexos industriais que podem ser consultadas no Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (E-PRTR), estabelecido pelo Regulamento (CE) 166/2006 E-PRTR, e regulamentado na Espanha pelo Real Decreto 508/2007. Em relação às ETE espanholas, a plataforma PRTR contém dados de instalações incluídas na seção 5 do Anexo I, correspondente ao Decreto Real 508/2007. Mais especificamente, as instalações são classificadas como “5.f. Estações de tratamento de águas residuárias urbanas com capacidade de 100.000 habitantes equivalentes”, que têm DA de lodo de águas residuárias como uma de suas etapas de tratamento. Até 2022, um total de 182 instalações de ETE das 17 comunidades autônomas espanholas notificaram o PRTR sobre suas emissões (Figura 4-5). O mapa mostra a Comunidade de Madri, Catalunha, Andaluzia e Comunidade Valenciana como as principais regiões com maior concentração de ETEs com DA de lodo, embora se possa observar que esses tipos de instalações estão distribuídos de forma homogênea pelo país.

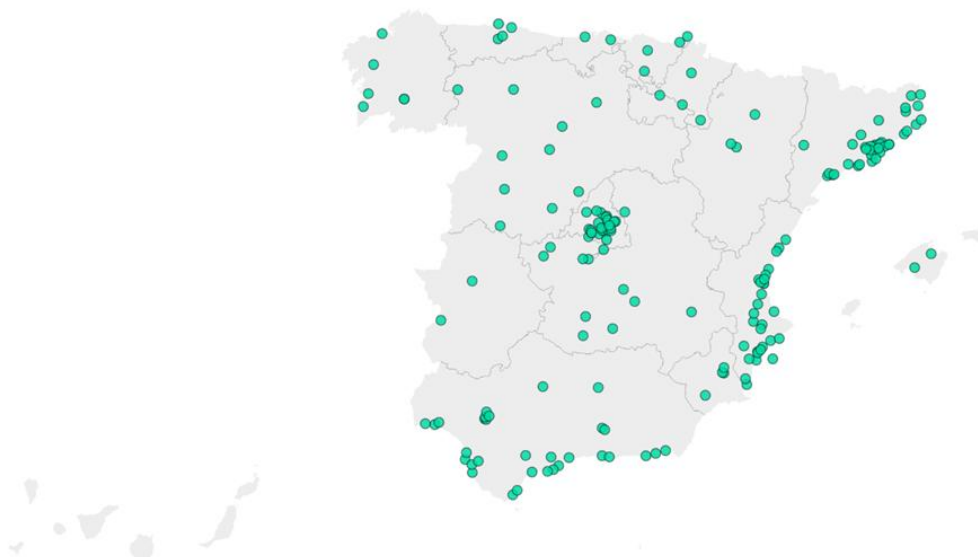


Figura 4-6 Estações de tratamento de águas residuárias urbanas (equivalente a 100.000 habitantes) em Espanha, com presença de fase de tratamento digestão anaeróbia (dados registados até 2022).

Fonte: Dados numéricos públicos obtidos da plataforma de dados PRTR (MITECO, 2025).

Na Espanha, o Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) disponibiliza informações sobre instalações que apresentam emissões de biogás e possuem capacidade superior a 10.000 habitantes equivalentes. Todas essas unidades dispõem de digestores anaeróbios de lodo, condição técnica favorável à recuperação energética. Contudo, o PRTR não especifica se o biogás gerado é efetivamente aproveitado.

Para superar essa limitação, foi realizada uma validação das informações por meio de consultas aos portais oficiais dos órgãos gestores, a fim de identificar, entre as unidades listadas, aquelas que de fato realizam recuperação de biogás. Esse procedimento permitiu mapear a distribuição espacial das unidades produtivas de biogás no país, apresentada no Material Suplementares 02 em anexo, no qual constam as fontes utilizadas.

Das 17 Comunidades Autônomas espanholas analisadas, foi possível obter informações de 11, cujos dados estavam disponíveis nos portais oficiais. Nas demais (Astúrias, Balears, Canárias, Cantábria, País Basco e Castilla-La Mancha), não foram localizados registros públicos que permitissem a identificação das unidades. Em todas as 11 Comunidades Autônomas com informações acessíveis, há ETEs que realizam recuperação de biogás, distribuídas da seguinte forma: Andaluzia (9 plantas), Aragão (3), Castela e Leão (3), Catalunha (14), Comunidade Valenciana (19), Extremadura (1), Galícia (1), Madri (13), Navarra (1) e Rioja (1), Múrcia (5). As informações da comunidade autonoma de Múrcia foram obtidas junto à Entidad de Saneamiento y

Depuración de Murcia (ESAMUR) por solicitação formal no portal de transparência, todas as demais os dados encontram-se disponíveis no portal do órgão gestor.

Recentemente, o Conselho Europeu implementou uma nova Diretiva sobre Tratamento de Águas Residuárias Urbanas (DIRECTIVE (EU) 2024/3019 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL), a qual coloca em destaque o objetivo de neutralidade energética a nível nacional em todas as instalações de tratamento com mais de 10 000 h.e. até 31 de dezembro de 2040. Propõe-se a realização de auditorias energéticas das plantas de tratamento, centrando-se na identificação e utilização do potencial de produção de biogás, reduzindo simultaneamente as emissões de metano. Para garantir a efetividade dessas metas, a proposta também determina, por meio do Artigo 29.º, que os Estados-Membros estabeleçam sanções efetivas, proporcionadas e dissuasivas em caso de descumprimento. Essas sanções devem considerar o volume de negócios dos infratores e os impactos ambientais e populacionais das infrações cometidas. Com o alcance do objetivo de neutralidade energética, o cenário atual espanhol ilustrado pela Figura 4-5 apresentaria uma drástica mudança, estendendo o destaque das estações de tratamento com produção de biogás de forma homogênea por todo o mapa do país.

A União Europeia exerce um papel central na regulação ambiental ao estabelecer diretrizes obrigatórias, fiscalizar seu cumprimento e aplicar sanções em caso de descumprimento, como multas administrativas. Um exemplo marcante foi a condenação da Espanha pelo Tribunal de Justiça da UE, em 2016, por não atender aos requisitos da Diretiva 91/271/CEE quanto à coleta e tratamento de águas residuárias em áreas urbanas. Esse sistema de pressão regulatória e judicial não apenas garante a responsabilização dos Estados-Membros, mas também estimula avanços tecnológicos e investimentos em infraestrutura sustentável, promovendo a modernização dos sistemas de saneamento e o alinhamento das políticas nacionais às exigências ambientais da UE.

Em resposta às sanções impostas pela União Europeia, a Espanha elaborou o Plano Nacional de Tratamento, Saneamento, Eficiência, Economia e Reutilização (Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización - DSEAR), iniciado em 2018, surgiu com o objetivo de rever e aprimorar os modelos de gestão e operação das ETE. O DSEAR reconhece a necessidade de modernização da infraestrutura de saneamento e reforça a exigência de valorização energética dos resíduos gerados netas unidades, especialmente o biogás e o biometano. Em alinhamento, o PNIEC destaca que o biogás é o único gás renovável com tecnologia madura e escala de produção suficiente para contribuir significativamente com as metas de descarbonização do setor de transporte. Conforme a Diretiva da União Europeia de Energias Renováveis II – RED II,

os Estados-membros devem garantir que os biocombustíveis avançados e o biogás representem pelo menos 0,2% do consumo energético do transporte em 2022, 1% em 2025 e 3,5% em 2030.

Além do biogás, o governo está aumentando o foco no biometano no contexto da economia circular e reduzindo as emissões de setores como agricultura e transporte. Dados recentes mostram que o potencial de produção de biometano na Espanha é de 163 TW h, o que cobriria cerca de 45% da demanda nacional de gás natural. A proporção da contribuição das ETEs para essa produção seria inferior a 2% (Sedigas, 2023). O potencial de produção de biometano a partir de processos de digestão anaeróbio nas ETEs é significativamente influenciado pelo tamanho da população e sua distribuição geográfica nas Comunidades Autônomas, onde populações maiores e centros urbanos tendem a ter uma concentração maior de plantas. Na Espanha, isso é particularmente verdadeiro para regiões como a Comunidade Valenciana, Andaluzia e Catalunha (Calero, M., et. al., 2023). Embora uma contribuição significativa das ETEs na produção e fornecimento de biometano em nível nacional ainda pareça uma meta distante a ser alcançada, priorizar a produção local fortaleceria a autossuficiência e neutralidade energética das ETE e, assim, contribuiria para alcançar os objetivos ambientais até 2040.

BRASIL

A recuperação energética do biogás em ETEs no Brasil tem evoluído de forma gradual, com avanços concentrados em iniciativas locais e casos pontuais de sucesso. Esse progresso ocorre em meio a um cenário de desafios estruturais no setor de saneamento e a um arcabouço regulatório que, embora contenha instrumentos promissores, ainda carece de especificidade e mecanismos de exigibilidade. O Plano Nacional de Saneamento Básico (Brazil, 2020b), por exemplo, estabelece metas de universalização do tratamento de águas residuárias, mas não aborda de forma detalhada a valorização energética nem prevê sanções em caso de descumprimento. Já a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) estimula o aproveitamento energético, com foco sobretudo em aterros sanitários, sendo pouco aplicada ao contexto das ETEs. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2032) reconhece o biogás como recurso estratégico, mas prioriza setores como o agroindustrial. A regulamentação do biometano pela ANP (Resolução 685/2017) e a política RenovaBio representam avanços importantes, mas o setor de saneamento urbano ainda participa de forma incipiente desses mecanismos. Assim, embora o contexto regulatório traga diretrizes e incentivos pontuais, a ausência de metas específicas e de sanções administrativas limita sua efetividade na promoção da valorização energética do biogás em ETE.

Esse descompasso entre a ausência de diretrizes legais específicas e a capacidade técnica instalada revela uma oportunidade negligenciada: o Brasil possui o maior parque de digestores anaeróbios do mundo (Rietow et al., 2023), mas carece de segurança jurídica e de incentivos claros que favoreçam a conversão desse potencial técnico em produção efetiva de energia.

Apesar do uso difundido da digestão anaeróbia no tratamento de águas residuárias no país, seu potencial energético permanece pouco explorado (De Oliveira & Negro, 2019; Bertolino et al., 2023). Conforme o Panorama do Biogás no Brasil, até 2023, o país contava com 1.365 instalações de biogás cadastradas, distribuídas entre três principais tipos de substratos. O setor agropecuário é responsável por 80% das plantas, enquanto os setores industrial e de saneamento representam, respectivamente, 10% e 9% (CIBiogás Energias Renováveis, 2025). Segundo a Associação Brasileira do Biogás (Abiogás), as ETE do Brasil poderiam produzir cerca de 493 milhões Nm^3 anuais de biogás ou 375 milhões Nm^3 de biometano anualmente ou 1,18 milhão MWh de eletricidade (ABiogás, 2021). No entanto, as ETE brasileiras produzem atualmente apenas 22,88 milhões de Nm^3/ano , correspondendo a apenas 4% desse potencial.

O Brasil possui 3.668 ETE, das quais destaca-se que os reatores anaeróbios estão presentes em 37% dessas unidades, o que representa aproximadamente 1.357 plantas com esse tipo de tecnologia (Brazil, 2020a).

Apesar da ampla presença de reatores anaeróbios no país, a adoção de sistemas voltados à recuperação energética do biogás ainda é bastante limitada. A Figura 4-6 representa um mapeamento das plantas de recuperação energética de biogás presentes em ETEs no Brasil, para o ano de 2019. Para o mapeamento, identificou-se 10 ETEs que faziam recuperação energética de biogás no país, com uma distribuição mais concentrada na região Sudeste do país - 6 plantas; dessas, 4 estão localizadas no estado de Minas Gerais e 2 no estado de São Paulo. Das 4 plantas restantes, 2 estão localizadas na região Sul (estado do Paraná) e 2 na região Nordeste (1 em Pernambuco e 1 na Bahia). Em termos de potencial de produção, o estado de São Paulo se destaca, especialmente pela sua alta densidade populacional.

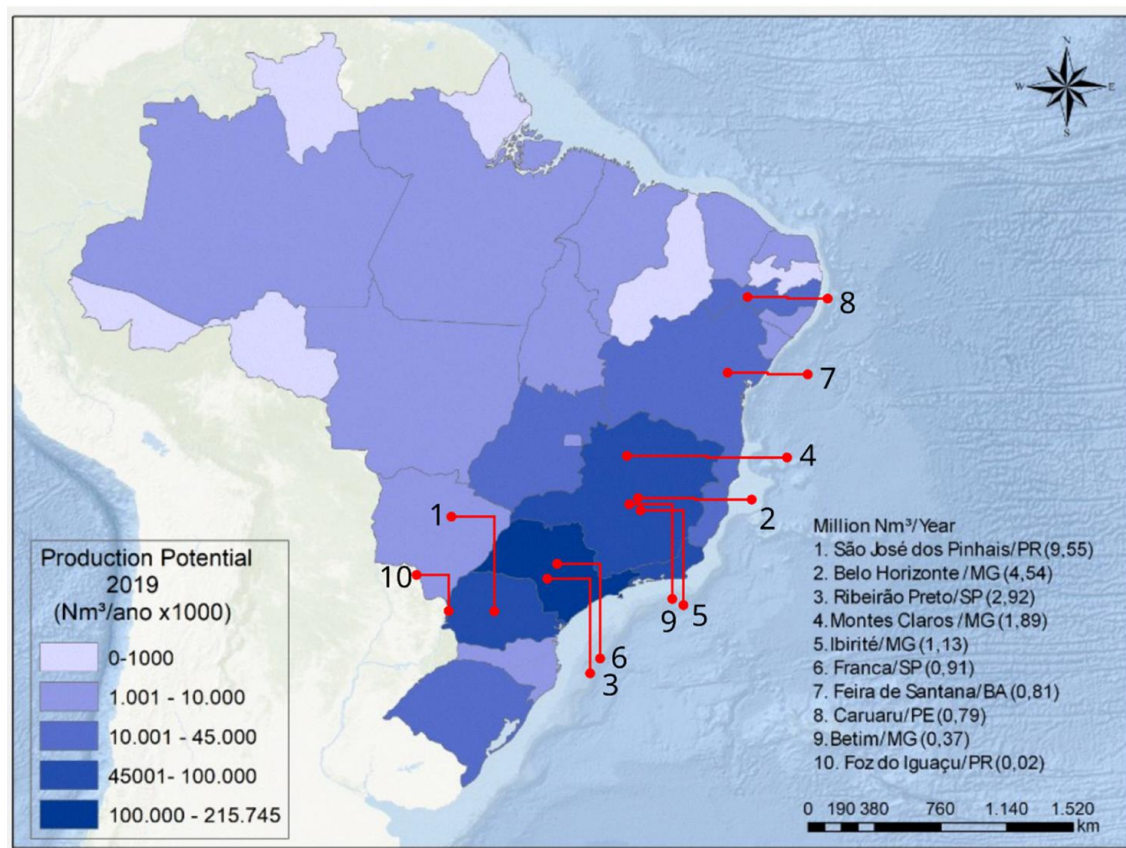


Figura 4-7 Produção de biogás até 2020 por unidade em operação e volume produzido em Nm³/ano.

Fonte: Adaptado de (ABiogás, 2021).

O aproveitamento energético predominante segue sendo o uso do biogás para geração de energia elétrica, tanto no número de empreendimentos, quanto no volume. A facilidade de comercialização ou compensação da energia elétrica é uma das vantagens desta aplicação (CIBiogás, 2021).

Essa subutilização do potencial energético do biogás também está ligada a desafios estruturais do saneamento no país. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), enquanto a 84,9% da população total é abastecida com água tratada, o esgotamento sanitário apresenta índices alarmantemente baixos, com apenas 56% da população atendida pela rede de águas residuárias e 52% destas são tratadas (Brazil, 2023b). Com a implementação da universalização do saneamento, haverá uma ampliação significativa do volume de águas residuárias tratadas, o que, por sua vez, deve expandir consideravelmente o potencial de produção de biogás no Brasil, criando novas oportunidades para a recuperação energética. No contexto dos compromissos climáticos assumidos pelo país, como a neutralidade de carbono até 2050, o biogás gerado em ETE precisa encontrar seu lugar.

4.3.4.Casos de Sucesso

A análise de casos de sucesso busca identificar experiências concretas que exemplifiquem caminhos bem-sucedidos para a recuperação energética do biogás em ETEs. Com base nos critérios de implementação consolidada, operação eficiente e potencial de replicabilidade, foram selecionados um caso espanhol e um brasileiro. Esses casos representam diferentes contextos institucionais e tecnológicos, permitindo uma análise comparativa entre estratégias adotadas e resultados alcançados.

A seleção foi realizada a partir de informações disponíveis em artigos científicos, sites oficiais das concessionárias e relatos de profissionais da área, priorizando casos emblemáticos que se destacam pela circularidade dos subprodutos gerados em ETEs. Como estudo de caso da Espanha, foi escolhida a ETE El Prat de Llobregat, localizada ao sul de Barcelona, no município de mesmo nome. Trata-se de uma planta de referência em reuso de água, cogeração de energia, produção de biossólidos e com projeto piloto de purificação de biogás para biometano. No Brasil, o caso selecionado foi a ETE Franca, situada no município de Franca, estado de São Paulo, que conta com um projeto robusto de produção de biometano utilizado em sua frota de veículos, além da geração de biossólidos.

Estudo de caso espanhol:

A ETE El Prat del Llobregat está localizada no sul de Barcelona, especificamente no município de El Prat de Llobregat. Inaugurada em 2002 e operada pela empresa Aigües del Prat, S.A., a planta trata 4.860 litros por segundo, atendendo aproximadamente 2 milhões de habitantes, incluindo 35% da cidade de Barcelona e os municípios vizinhos: El Prat de Llobregat, Cornellà de Llobregat, Esplugues de Llobregat, l'Hospitalet de Llobregat, Sant Joan Despí, Sant Boi de Llobregat, Santa Coloma de Cervelló e Sant Just Desvern (PRTR España, 2014; IAGUA, 2019; AMB, 2022).

A operação da planta é realizada por Aigües de Barcelona, mas seu funcionamento está inserido em um modelo de governança compartilhada entre a Área Metropolitana de Barcelona (AMB), a Generalitat da Catalunha e o município de El Prat. Essa estrutura possibilita planejamento integrado, escala metropolitana e estabilidade contratual, fundamentais para a introdução de tecnologias inovadoras. No âmbito institucional, o MITECO atua como órgão responsável pela

formulação das políticas nacionais de meio ambiente, energia e água, incluindo o apoio financeiro e normativo a projetos estratégicos. A União Europeia, por sua vez, exerce um papel regulador e indutor de mudanças no setor, ao estabelecer diretrizes ambientais obrigatórias, fiscalizar seu cumprimento e aplicar sanções em casos de descumprimento.

A Figura 4-7 apresenta o sistema de tratamento e benefícios dos subprodutos recuperados na ETE El Prat de Llobregat, a qual é um exemplo de economia circular, ao recuperar água, energia e bio sólidos. Do total de efluente tratado, 134.784 m³/dia são regenerados para irrigação, uso industrial e reforço do rio Llobregat. A planta consome 47,3 milhões de kWh/ano, com cerca de 30% supridos por cogeração de biogás, gerando 13,7 milhões de kWh/ano em eletricidade, além de 11,4 milhões de kWh/ano de energia térmica e outros 3,3 milhões fornecidos por caldeiras. Diariamente, são produzidos 2.168.000 kg de lodo desidratado, com 90% destinados à agricultura e 10% à compostagem (AMB, 2022; Urrea Vivas et al., 2025).

Entre 2020 e 2025, esta estação sediou o projeto europeu LIFE NIMBUS, cofinanciado pelo programa LIFE da União Europeia, que desenvolveu uma planta piloto para conversão do biogás em biometano. O combustível abasteceu um ônibus o NIMBUS, um ônibus piloto da empresa Transports Metropolitans de Barcelona (TMB). A iniciativa contou com tecnologias inovadoras de metanação biológica, permitindo a produção de até 4 Nm³/h de biometano e ampliando em até 70% a energia recuperada a partir do biogás. O projeto foi coordenado pelo Cetaqua, com participação da Aigües de Barcelona, TMB e Universitat Autònoma de Barcelona (CETAQUA, 2020; EUROPEAN COMMISSION, 2025).

A produção diária de 20.146 Nm³ de biogás representa um avanço relevante na busca por fontes renováveis no setor de saneamento. No entanto, a limitação na capacidade de armazenamento ainda restringe seu aproveitamento em larga escala, dificultando a geração de compensações energéticas mais expressivas. Estima-se que, caso todo o volume de biogás disponível fosse utilizado em cogeração, seria possível alcançar uma economia anual de até € 57.260,61 em créditos de emissão, o que reforçaria substancialmente a contribuição da planta para a mitigação de gases de efeito estufa no setor (Urrea Vivas et al., 2025).

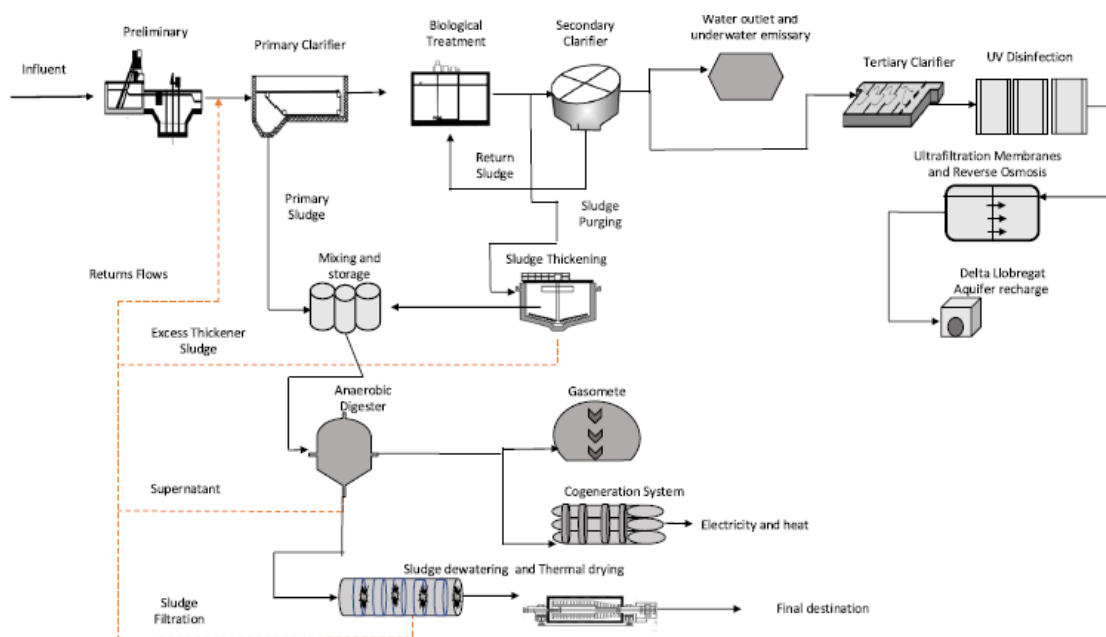


Figura 4-8 Sistemas de Tratamento da ETE El Prat del Llobregat

Fonte: Urrea Vivas et al. (2025)

Estudo de caso brasileiro:

A ETE Franca está localizada no município de Franca, estado de São Paulo, na região Sudeste do Brasil, atende cerca de 288 mil habitantes, tratando 82% do água residuária urbana coletado do município de Franca (SABESP, 2023). A estação trata cerca de 550 litros por segundo de águas residuárias domésticas. A ETE Franca é gerida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que, anteriormente era uma sociedade de economia mista, mas foi privatizada desde julho de 2024.

A planta digere o lodo anaerobiamente e produz aproximadamente 3.000 m³/dia de biogás, cuja fração final de metano é de 65% (SEMIL, 2024). O biogás produzido é beneficiado e transformado em biometano, que abastece a frota de 40 veículos da planta (Miki et al., 2018; SEMIL, 2024). A unidade tem capacidade para tratar até 2.880 Nm³/dia de biogás (120 Nm³/h), podendo produzir até 1.700 Nm³/dia de biometano (72 Nm³/h), com teor de até 97% de metano, o que equivale à substituição de cerca de 1.700 litros diários de gasolina comum (Miki et al., 2019). Na Figura 4-8 encontra-se um esquema da planta de beneficiamento de biogás da ETE Franca.

Apesar dessa capacidade, a planta enfrenta uma limitação técnica relacionada ao armazenamento do biometano. Operando apenas em dias úteis, o sistema é automaticamente desligado sempre que os cilindros de armazenamento atingem a pressão máxima permitida (entre

190 e 250 bar), interrompendo a produção. O biogás excedente é então queimado ou armazenado temporariamente. Para minimizar essas perdas, estão sendo avaliadas parcerias para o escoamento do biometano excedente, ainda em fase de concretização (Miki et al., 2019).

No que se refere à gestão de resíduos sólidos, a produção de lodo desidratado, de aproximadamente 20% de sólidos totais, é da ordem de 50 toneladas diárias (Miki, 2018). Entre 1999 e 2011 (12 anos), a ETE Franca produziu biossólidos Classe B (como nome “Sabespfértil”), que era aplicado em plantações de café. Devido à alteração nas legislações, que se tornaram mais restritivas, a aplicação agrícola do produto foi inviabilizada. Em 2019, foi reportado que a planta estava avaliando a utilização da secagem por irradiação solar do lodo, de maneira que o biossólido produzido pudesse ser registrado no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Miki et al., 2019). Conforme material de divulgação de 2022, a Sabesp apresentava o fertilizante produzido a partir de lodos de águas residuárias urbanas registrado no MAPA (número SP-81990 10000-2) (SABESP, 2022). No entanto, conforme relatório de sustentabilidade de 2023, o lodo ainda era disposto no aterro sanitário municipal de Franca, destacando-se que estava em curso a instalação de secadores térmicos e uma estufa para a desidratação do resíduo, de maneira a promover a redução do volume e viabilizar outras formas de destinação, incluindo a agrícola (SABESP, 2024). Em agosto de 2024, o impasse foi superado por meio de parceria com prestador de serviço licenciado, parte do lodo passou a ser destinado como composto agrícola, atendendo aos padrões legais e ambientais, transformando um passivo em insumo sustentável (SABESP, 2025).

Não foram identificadas ações de reuso de água externa por parte da planta. O efluente tratado é lançado no Ribeirão dos Bagres (SNIRH, 2015).

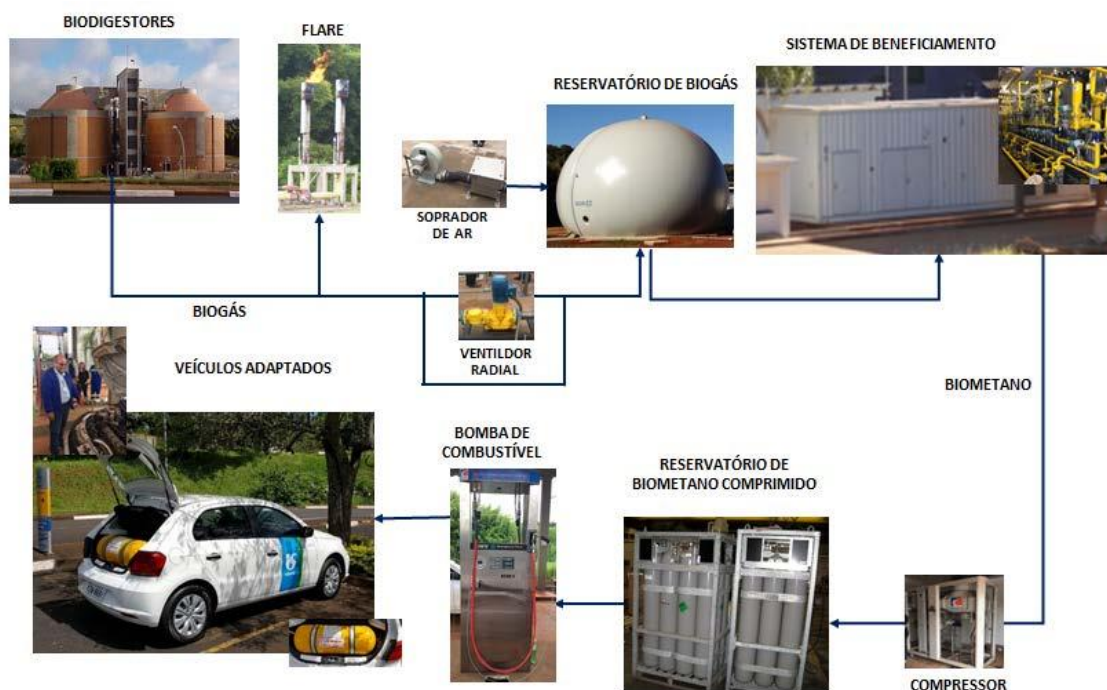


Figura 4-9 Sistema de beneficiamento de biogás da ETE Franca.

Fonte: Miki et al. (2019)

A viabilização do projeto de biometano da ETE Franca foi resultado de uma parceria entre a Sabesp (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) e o Instituto Fraunhofer da Alemanha, formalizada por meio de um Acordo de Cooperação em 2015. O valor total do projeto foi estimado em aproximadamente 7,4 milhões de reais (equivalente a 2,1 milhões de euros), com o financiamento dividido entre as duas partes. A contribuição alemã, correspondente a cerca de 50% do total, foi realizada no âmbito da Iniciativa Internacional de Proteção ao Clima (IKI), coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza, Construção e Segurança Nuclear da Alemanha (BMUB), e destinou-se ao fornecimento dos equipamentos do sistema de beneficiamento do biogás, além de assistência técnica especializada. A parte brasileira, financiada com recursos próprios da Sabesp, foi direcionada à execução das obras civis, incluindo o sistema elétrico, a construção da linha de biogás, a adaptação dos veículos para abastecimento com biometano, bem como ao pagamento de taxas, impostos e despesas com o licenciamento (Miki, 2017).

Em reconhecimento à inovação e caráter circular da iniciativa, em 2019, a Sabesp ganhou o Prêmio Ideias em Ação 2019 do Inter-American Development Bank (IDB) pelo projeto de economia circular da ETE Franca (SABESP, 2019).

4.3.5. Análise Cruzada

A recuperação de biogás em ETE representa uma estratégia promissora tanto no Brasil quanto na Espanha. No entanto, as tecnologias adotadas e a eficiência de sua implementação variam significativamente entre os dois países, em razão das diferenças em infraestrutura, apoio governamental e características operacionais. Esse contraste reforça a importância de analisar os distintos caminhos que cada país tem percorrido nesse processo de transição energética.

Ao comparar o desenvolvimento da recuperação energética do biogás nos dois países, percebe-se que os fatores impulsionadores diferem significativamente. A Espanha tem seguido um modelo “top-down”, onde mudanças estruturais e políticas públicas centralizadas desempenham um papel fundamental. A imposição de sanções econômicas à Rússia pela UE em 2022, o que resultou em uma necessidade urgente de diversificação da matriz energética, acelerando a implementação de projetos de recuperação de biogás e outras fontes renováveis. Assim, a transição na Espanha tem sido influenciada por fatores exógenos, com forte direcionamento estatal e incentivos específicos.

Em contraste, o Brasil apresenta um modelo “bottom-up”, no qual a inovação e a implementação de novas tecnologias ocorrem principalmente por meio de iniciativas de nicho. Empresas e concessionárias desenvolvem projetos-piloto e buscam influenciar gradualmente o regime sociotécnico dominante, muitas vezes sem contar com políticas públicas estruturadas ou pressões de mercado tão intensas quanto na Europa. Isso sugere que, enquanto a Espanha se apoia na regulação e em políticas energéticas nacionais para direcionar a transição em ETE, o Brasil depende de iniciativas descentralizadas que emergem em resposta a oportunidades de mercado, interesses regionais e colaborações público-privadas.

Essa diferença de abordagem também se manifesta nas fases distintas da transição tecnológica em que cada país se encontra. Segundo o modelo de transição sociotécnica proposto por Rotmans et al. (2001) este processo se desenvolve geralmente em quatro fases: “predevelopment”, em que o sistema permanece em equilíbrio dinâmico sem mudanças visíveis; “take-off”, quando o processo de transformação se inicia com alterações perceptíveis no sistema; “breakthrough”, fase de mudanças estruturais significativas impulsionadas por transformações socioculturais, econômicas e institucionais interligadas; e “stabilization”, em que o novo sistema se consolida e atinge um novo equilíbrio com menor velocidade de mudança.

Nesse contexto, o Brasil se encontra na fase de “take-off”, com a recuperação de biogás ganhando força, especialmente em áreas urbanas e em plantas de médio porte. Embora ainda haja desafios de infraestrutura e regulamentação, observa-se um aumento no interesse por energias

renováveis e na formação de nichos apoiados por políticas públicas incipientes. Já a Espanha se posiciona em uma fase mais avançada, o “breakthrough”, em que o mercado de biogás está mais estruturado, amparado por políticas nacionais consistentes e metas ambientais ambiciosas. No entanto, mesmo nesse estágio, persistem desafios relacionados à integração dos sistemas de biogás com o mercado energético e à competitividade frente a outras fontes renováveis.

A partir desta visão, o papel das redes de atores torna-se ainda mais relevante. Geels descreve a importância das redes de atores na facilitação da troca de conhecimentos e na reconfiguração de sistemas tecnológicos para o sucesso das inovações (Geels, 2002). Markard et al. (2016) mostraram na sua pesquisa que a colaboração entre diferentes grupos de interesse, incluindo formuladores de políticas, empresas, ONGs e pesquisadores são essenciais para a formulação de políticas energéticas e sustentáveis na Suíça e na implementação das transições tecnológicas.

Para aprofundar a comparação entre os dois países, é importante considerar as fontes de substrato utilizadas na produção de biogás, pois elas determinam as possibilidades de aproveitamento energético e moldam as estratégias de operação adotadas. No entanto, esta análise comparativa requer cautela, uma vez que os dados disponíveis em cada país seguem classificações distintas conforme apresenta a Figura 4-3 e a Figura 4-4.

Para fins comparativos, foi realizada uma reagrupação aproximada das categorias espanholas de forma a alinhá-las com a estrutura adotada pelo CIBiogás. Embora essa correspondência não seja exata, ela permite uma análise exploratória da contribuição setorial para a produção de biogás em ambos os países, respeitando as limitações metodológicas envolvidas.

A partir dessa reclassificação, os substratos foram organizados em dois grupos: (i) Saneamento, que abrange os substratos oriundos de ETE, aterros sanitários e resíduos orgânicos municipais no caso espanhol, correspondendo à categoria “Saneamento” no Brasil; e (ii) Indústria Agropecuária, que reúne os resíduos da indústria agroalimentar e de origem animal na Espanha, aproximando-se das categorias “Industrial” e “Agropecuária” utilizadas no Brasil.

Além disso, vale destacar que as fontes consultadas utilizam grandezas analíticas distintas. No caso da Espanha, os dados são expressos em termos de potência elétrica acumulada (KW), enquanto, para o Brasil, os valores se referem à capacidade instalada (milhões de Nm³/ano). Diante dessas diferenças, a análise comparativa será conduzida com foco na representatividade relativa de cada tipo de substrato dentro do contexto nacional, considerando a relevância proporcional de cada fonte para o panorama energético de ambos os países.

A Tabela 01 resume essas informações, apresentando a representatividade relativa dos diferentes setores na produção de biogás no Brasil e na Espanha. No caso espanhol, 71% das unidades produtoras de biogás estão concentradas nos segmentos de saneamento e resíduos urbanos, enquanto 29% pertencem ao setor da indústria agropecuária (MITECO, 2021). Já no Brasil, esse padrão se inverte, em que o setor da indústria agropecuária responde por 87% das plantas ativas, enquanto o saneamento representa apenas 13%, conforme dados da CIBiogas (2025). Apesar dessa diferença em número de instalações, o volume produzido no setor de saneamento é expressivo em ambos os países, com destaque para os 81% da produção espanhola advinda dessa fonte (IDAE, 2024), contra 60% no Brasil (CIBiogas, 2025).

Tabela 4-1 Representatividade Relativa dos Setores na Produção de Biogás no Brasil e na Espanha.

	BRAZIL				SPAIN			
	Nm ³ /ano	% Production	N. Production units	% N. Production units	KW	% Production	N. Production units	% N. Production units
Landfill + WWTP	2855	60%	149	13%	220710	81%	63	71%
Industrial Agriculture + Livestock	1853	40%	1042	87%	50860	19%	26	29%

Fonte: Os dados relativos ao Brasil foram obtidos a partir do CIBiogas (2025). Para os dados da Espanha da base de dados públicos do IDAE, 2024 e MITECO (2021)

Na Espanha, observa-se uma distribuição territorial mais homogênea das unidades produtoras de biogás, com destaque para a produção em larga escala em aterros sanitários e ETE. Esta dinâmica se insere em um regime sociotécnico mais consolidado, fortemente influenciado por políticas públicas centralizadas, regulamentações ambientais rigorosas e metas definidas no plano europeu de descarbonização. Essas estruturas operam, em geral, sob lógicas voltadas ao interesse público, orientadas pelo cumprimento de metas institucionais de sustentabilidade e economia circular.

No Brasil, por outro lado, o cenário é mais fragmentado e caracterizado por iniciativas descentralizadas, muitas vezes desenvolvidas em contextos rurais e voltadas à agricultura ou à gestão local de resíduos. Esse padrão favorece a disseminação da tecnologia em áreas rurais, com geração de energia elétrica, térmica e biometano, promovendo modelos de negócio de base regional. Muitas dessas experiências são conduzidas por agentes privados, cooperativas ou governos municipais, que atuam como nichos de inovação. Observa-se também uma desigualdade regional nas iniciativas, com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul. Essa distinção indica que,

enquanto o contexto espanhol favorece a expansão da recuperação energética do biogás por meio de instrumentos de política pública estruturados, o avanço brasileiro depende, em grande medida, de lideranças locais e da experimentação em arranjos menos formalizados.

Nesse sentido, o estudo de experiências internacionais reforça a importância das políticas públicas eficazes. A pesquisa de Mukeshimana et al. (2021), por exemplo, mostra que, nos países asiáticos, o sucesso da disseminação do biogás está relacionado a políticas de apoio técnico e financeiro, infraestrutura adequada, inovação tecnológica e articulação institucional. Já em países africanos, mesmo com alta adoção de biodigestores, os resultados são limitados pela ausência desses fatores estruturantes.

Exemplos concretos ilustram como as interações entre tecnologia, política pública e contexto institucional moldam os resultados. A comparação entre a ETE El Prat de Llobregat, na Espanha, e a ETE Franca, no Brasil, revela lições relevantes sobre a valorização do biogás no setor de saneamento, evidenciando a importância da integração entre soluções técnicas, políticas públicas e governança territorial. Ambos os projetos demonstram que a implementação de estratégias circulares pode gerar benefícios expressivos. No caso de El Prat, a valorização dos subprodutos resultou na redução da coleta de água natural, diminuição do consumo energético externo, mitigação de emissões de gases de efeito estufa, proteção dos aquíferos contra a intrusão salina e redução de despesas com energia e destinação final de resíduos, em um modelo de economia circular apoiado por diretrizes europeias e governança local. Já a ETE Franca ilustra como parcerias internacionais e iniciativas locais podem impulsionar soluções inovadoras, destacando-se pela substituição do combustível fóssil por biometano para abastecimento de veículos e pela retomada do uso agrícola dos bio sólidos, contribuindo para a redução significativa de emissões, custos operacionais e impactos ambientais. Esses resultados ilustram o potencial das estações de tratamento como polos de geração de energia renovável e de reaproveitamento de recursos.

Apesar dos avanços, ambos os casos enfrentam limitações. El Prat ainda lida com restrições na capacidade de armazenamento de biogás, o que limita o aproveitamento integral para cogeração. Em Franca, o sistema de produção de biometano opera com interrupções devido à limitação técnica de armazenamento. Essas experiências apontam que a replicação de soluções bem-sucedidas exige a adaptação às condições locais, como porte da planta, infraestrutura disponível, recursos institucionais e regulamentação vigente. Para isso, é fundamental promover marcos regulatórios favoráveis, fomentar arranjos de governança colaborativos e investir na valorização integrada dos subprodutos das águas residuárias urbanas. A construção de parcerias entre setor público, operadores de saneamento, universidades e empresas privadas tem se mostrado um caminho promissor para

superar os desafios e ampliar os benefícios da recuperação energética do biogás no setor de saneamento. Acima de tudo, os dois casos mostram que a consolidação da valorização do biogás requer planejamento de longo prazo, articulação interinstitucional e investimentos contínuos, sustentados por uma visão sistêmica da sustentabilidade urbana.

4.4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo comparar a recuperação energética do biogás em estações de tratamento de águas residuárias no Brasil e na Espanha, considerando dimensões técnicas, institucionais e sociotécnicas à luz da Teoria das Transições Sociotécnicas.

A análise comparativa revela que Brasil e Espanha seguem trajetórias distintas na recuperação energética do biogás em ETEs, cada qual enfrentando desafios e explorando oportunidades específicas. A Espanha avança sob uma abordagem predominantemente “top-down”, com políticas públicas mais estruturadas, diretrizes claras e metas nacionais voltadas à transição energética, o que a posiciona em uma fase mais madura da transição, “breakthrough”. Já o Brasil apresenta uma dinâmica “bottom-up”, marcada por iniciativas descentralizadas, experimentações locais e projetos-piloto inseridos em nichos de inovação, ainda característicos da fase de “take-off”.

Na Espanha, a produção de biogás apresenta uma distribuição territorial mais homogênea, o que contribui para a consolidação e integração da tecnologia em múltiplos setores. Com destaque para maior número de plantas com recuperação de biogás em aterros sanitários e ETE, e possuindo legislação específica para o setor, essencial para incentivar investimentos, garantir segurança jurídica e acelerar a adoção de tecnologias inovadoras. No Brasil, por outro lado, o cenário é mais fragmentado e marcado por desigualdade regional, com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul. A produção de biogás ocorre principalmente em contextos rurais, voltada à agricultura e à gestão local de resíduos, e o regime existente possui maior enfoque nessas fontes de substrato, refletindo uma dinâmica tecnológica e regional distinta da observada na Espanha.

Casos bem-sucedidos de valorização do biogás nas ETEs El Prat (Espanha) e Franca (Brasil) mostram que a integração entre tecnologia, políticas públicas e governança territorial é essencial para resultados positivos. A adaptação das soluções a condições locais, como infraestrutura e regulamentação, é fundamental. Parcerias entre setor público, operadores e academia fortalecem a inovação e superam desafios técnicos.

No Brasil há uma urgência de políticas públicas mais integradas e coordenadas, e em ambos os países há necessidade de maior valorização do biometano, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético do biogás.

A trajetória de ambos os países mostra que o avanço da recuperação energética depende de articulação interinstitucional, da construção de alianças entre atores diversos e de uma visão sistêmica de sustentabilidade urbana. Nesse contexto, políticas públicas consistentes e investimentos de longo prazo são decisivos para garantir a continuidade e o amadurecimento das iniciativas, potencializando os benefícios ambientais, energéticos e sociais associados à valorização do biogás em ETEs.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o mapeamento das ETEs em cada país, com foco no papel da circularidade dos subprodutos, além da análise do papel das redes de inovação e das parcerias público-privadas no setor.

Referências

- ABiogás. (2021). *Nota técnica - Potencial de produção de biogás a partir do tratamento de esgoto*. 33.
- Agencia Andalusia de la Energia. (2011). Estudio básico del biogás. In *Consejería de Economía Innovación y Ciencia (CEIC)*.
- Aguilar-Benitez, I., & Blanco, P. A. (2018). Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, 9(2), 86–111. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>
- AMB, À. M. de B. (2022). EDAR del Prat de Llobregat. *AMB – Medi Ambient*. <https://www.amb.cat/web/medi-ambient/aigua/instalacions-i-equipaments/detall/-/equipament/edar-del-prat-de-llobregat/276285/11818>
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., & Conti, D. de M. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2(November 2020), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>
- Battista, F., Frison, N., Pavan, P., Cavinato, C., Gottardo, M., Fatone, F., Eusebi, A. L., Majone, M., Zeppilli, M., Valentino, F., Fino, D., Tommasi, T., & Bolzonella, D. (2020). Food wastes and sewage sludge as feedstock for an urban biorefinery producing biofuels and added-value bioproducts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95(2), 328–338. <https://doi.org/10.1002/jctb.6096>
- Bergek, A., Hekkert, M., Jacobsson, S., Markard, J., Sandén, B., & Truffer, B. (2015). Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and

interaction. *Environmental Innovation and Societal Transitions*.
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.003>

Bertolino, A. M., Giganti, P., dos Santos, D. D., & Falcone, P. M. (2023). A matter of energy injustice? A comparative analysis of biogas development in Brazil and Italy. *Energy Research and Social Science*, 105(May). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103278>

Bhatia, R. K., Ramadoss, G., Jain, A. K., Dhiman, R. K., Bhatia, S. K., & Bhatt, A. K. (2020). Conversion of Waste Biomass into Gaseous Fuel: Present Status and Challenges in India. *Bioenergy Research*, 13(4), 1046–1068. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10137-4>

Borges, C. P., Sobczak, J. C., Silberg, T. R., Uriona-Maldonado, M., & Vaz, C. R. (2021). A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138(August). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110518>

Brasil. (2024). *Brasil registra grande número de doenças relacionadas à água sem tratamento*. Assembleia Legislativa Do Estado Do Piauí. <https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/brasil-registra-grande-numero-de-doencas-relacionadas-a-agua-sem-tratamento>

BRASIL. (2023). *Diagnóstico Temático: Visão Geral do Saneamento no Brasil 2023*. https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf

Brazil. (2007a). *Balanço Energético Nacional 2007*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-136/topico-112/Versão Completa 2007.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-136/topico-112/Versão_Completa_2007.pdf)

Brazil. (2007b). *Plano Nacional de Energia 2030*.

Brazil. (2020a). Atlas Esgotos. ANA - Agência Nacional de Águas.

Brazil. (2020b). *Plansab - Relatório de Avaliação Anual 2020- Ministério do Desenvolvimento Regional*. 118.

Brazil. (2022). *Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050*.

Brazil. (2023a). *BEN_Relatório Síntese_2024_Ano base 2023*. 1–71.

Brazil. (2023b). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)*. Ministério Das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: SNSA/Ministério Das

Cidades.

- Calero, M., Godoy, V., Heras, C. G., Lozano, E., Arjandas, S., & Martín-Lara, M. A. (2023). CURRENT STATE OF BIOGAS AND BIOMETHANE PRODUCTION AND ITS IMPLICATIONS FOR SPAIN. *Energy & Fuels*, 15(7), 3584–3602.
- Capellán-Pérez, I., Campos-Celador, Á., & Terés-Zubiaga, J. (2018). Renewable Energy Cooperatives as an instrument towards the energy transition in Spain. *Energy Policy*, 123(May), 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.064>
- Cardoso, F., & Borschiver, S. (2018). *Roadmap Tecnológico da Biometanização da Palha*. 1596–1611.
- Cardoza, D.; Romero, I. ., Martínez, T.; Ruiz, E.; Gallego, F. J. ., López-Linares, J.C.; Manzanares, P. ., & Castro, E. (2021). Location of Biorefineries Based on Olive-Derived Biomass in Andalusia, Spain. *Energies*, 14, 3052. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en14113052>
- CETAQUA. (2020). *LIFE NIMBUS: Wastewater treatment plant as a nexus of integrated and sustainable management of water, energy and mobility*.
- Chan Gutiérrez, E., Wall, D. M., O'Shea, R., Novelo, R. M., Gómez, M. M., & Murphy, J. D. (2018). An economic and carbon analysis of biomethane production from food waste to be used as a transport fuel in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 196, 852–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.051>
- Chernicharo, C. A. L., van Lier, J. B., Noyola, A., & Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), 649–679. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72(May), 103033. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103033>
- CIBiogas. (2021). *O biogás na produção de energia elétrica*. <https://cibiogas.org/blog/o-biogas-na-producao-de-energia-eletrica/>
- CIBiogas Energias Renováveis. (2025). *Panorama do Biogas 2024*.
- Cosmen Junceda, V. (2023). *Impacto de la Guerra Rusia - Ucrania en el sector energético de España*.
- COSTA, D. F. DA. (2006). GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DO

TRATAMENTO DE ESGOTO. In *MSc work – Program of Post-Graduation in Energy. University of São Paulo, São Paulo* (pp. 1–176).

Crone, B. C., Garland, J. L., Sorial, G. A., & Vane, L. M. (2016). Significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: A review. *Water Research*, 104, 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.019>

De Oliveira, L. G. S., & Negro, S. O. (2019). Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107(December 2017), 462–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.030>

de Souza, H. P., de Oliveira, W. T. G. H., dos Santos, J. P. C., Toledo, J. P., Ferreira, I. P. S., de Sousa Esashika, S. N. G., de Lima, T. F. P., & de Sousa Delácio, A. (2020). Infectious and parasitic diseases in Brazil, 2010 to 2017: Considerations for surveillance. *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health*, 44, 1–7. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2020.10>

DIRECTIVA (UE) 2024/3019 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, 0345 (2024).

EEA- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2023). *Greenhouse gases – viewer*. Greenhouse Gases – Viewer.

Eijo-Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M. E., Marin, D., Amores, M. J., Aldea, X., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2015). Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 2084–2094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>

Elzen, B., Mierlo, B. Van, & Leeuwis, C. (2012). Environmental Innovation and Societal Transitions Anchoring of innovations: Assessing Dutch efforts to harvest energy from glasshouses. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 5, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2012.10.006>

European Commission. (2023). BIOMETHANE FICHE – Spain (2021). *2023 Biomethane Country Fiches*, 2021, 2021–2023. https://energy.ec.europa.eu/document/download/c917c23a-a962-42ef-91b0-91a8b161feb3_en?filename=Biomethane_fiche_ES_web.pdf

EUROPEAN COMMISSION. (2025). *NON IMPACT BUS – Demonstration of a biological methanation plant for sustainable urban transport. LIFE Project – LIFE19 ENV/ES/000191*.

- Fernandez, R. M. (2018). Conflicting energy policy priorities in EU energy governance. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 8(3), 239–248. <https://doi.org/10.1007/s13412-018-0499-0>
- Fetting, C. (2020). The European Green Deal. *ESDN Office*, 35, 44–67. [https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705\(35\)2024.ic-03](https://doi.org/10.34625/issn.2183-2705(35)2024.ic-03)
- Gadirli, G., Pilarska, A. A., Dach, J., Pilarski, K., Kolasa-Więcek, A., & Borowiak, K. (2024). Fundamentals, Operation and Global Prospects for the Development of Biogas Plants—A Review. *Energies*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/en17030568>
- Geels, F. W. (2002). *Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes : a multi-level perspective and a case-study*. 31, 1257–1274.
- Geels, F. W. (2011). Environmental Innovation and Societal Transitions The multi-level perspective on sustainability transitions : Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). *Typology of sociotechnical transition pathways*. 36(August 2003), 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Gomes, F. M. da S., Maria Cristina Carvalho do Espírito Santo, Ronaldo César Borges Gryscek, Maria Rita Bertolozzi, & Francisco Oscar de Siqueira França. (2020). Access to drinking water and sewage treatment in Brazil: a challenge for the control of waterborne infectious diseases. *International Journal of Phytoremediation*, 20(1), 135–136. <https://doi.org/http://doi.org/10.1590/S1678-9946202062071>
- Guimarães, C. M. M., & Galvão, V. (2014). *PRODUÇÃO E USO DO BIOGÁS* (Issue November 2013). <https://doi.org/10.13140/2.1.2790.7200>
- Hidalgo, D., & Martín-Marroquín, J. M. (2015). Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y León Region (Spain). *Food Research International*, 73(2015), 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.044>
- IAGUA. (2019). *A doble vida de la gran depuradora del Llobregat: depurar y reutilizar*. <https://www.iagua.es/blogs/xavi-duran-ramirez/doble-vida-gran-depuradora-llobregat-depurar-y-reutilizar>
- IDAE - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Situación y Potencial de Generación de Biogás - Estudio Técnico PER 2011-2020*.
- IEA Bioenergy. (2021). Implementation of bioenergy in Brazil – 2021 update. *IEA Bioenergy*, 12.

- IRENA. (2024). Renewable Capacity Statistics 2024. In *International Renewable Energy Agency*.
www.irena.org
- Jørgensen, U. (2012). Mapping and navigating transitions — The multi-level perspective compared with arenas of development. *Research Policy*, 41(6), 996–1010.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.03.001>
- Lam, K. L., & Van Der Hoek, J. P. (2020). Low-Carbon Urban Water Systems: Opportunities beyond Water and Wastewater Utilities? *Environmental Science and Technology*, 54(23), 14854–14861. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05385>
- Lauer, M., & Thrän, D. (2018). Flexible biogas in future energy systems-sleeping beauty for a cheaper power generation. *Energies*, 11(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en11040761>
- Lettinga, G., Velsen, A. F. M. V. A. N., & Hobma, S. W. (1980). *Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment , Especially for Anaerobic Treatment. XXII*, 699–734.
- López-Aguilera, A., Morales-Polo, C., Victoria-Rodríguez, J., & Cledera-Castro, M. del M. (2025). Assessment of Biomethane Production Potential in Spain: A Regional Analysis of Agricultural Residues, Municipal Waste, and Wastewater Sludge for 2030 and 2050. *Sustainability (Switzerland)*, 17(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su17104742>
- Madrid Council. (2024). Annual Report VALDEMINGÓMEZ TECHNOLOGY PARK 2022. In *Madrid Environment and Mobility*.
- Markard, J., Suter, M., & Ingold, K. (2016). Socio-technical transitions and policy change - Advocacy coalitions in Swiss energy policy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18, 215–237. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.05.003>
- Max Alberto López-Maciel, Meireles, M., José Villar, André Oliveira, Edimar Ramalho, Fátima Lima...Alves, M. R. (2024). Impact of COVID-19 and Ukraine-Russia Conflict on the National Energy and Climate Strategies of Portugal and Spain. In *2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1–7.
- McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer- can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45(17), 7100–7106.
<https://doi.org/10.1021/es2014264>
- Miki, R. E. (2017). XI-079 - PROJETO DE BENEFICIAMENTO DE BIOGÁS PARA USO VEICULAR NA ETE FRANCA DA SABESP: ESTÁGIO ATUAL E ETAPAS FUTURAS.

Congresso ABES-FENASAN, I, 1–12.

- Miki, R. E. (2018). Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso como combustível veicular. *Revista DAE*, 66. <https://doi.org/10.4322/dae.2017.021>
- Miki, R. E., Reami, L., & Cason, M. M. de A. (2019). Produção de biometano de biogás de Estação De Tratamento De Esgoto : Implantação do projeto e resultados preliminares. *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, I*, 1–13.
- MITECO. (2020). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. *Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico, Gobierno de España*, 25. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
- MITECO. (2021). *Hoja de ruta del biogas*. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-miteco-saca-a-información-pública-la-propuesta-de-hoja-de-ruta-del-biogás-/tcm:30-529298>
- MITECO. (2025). *Inventario de instalaciones de Tratamiento de Águas Residuales en España capacidade acima de 100.000 H.E.* PRTR España- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Poluentes. <https://prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>
- Montoya, F. G., Aguilera, M. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Renewable energy production in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33(May), 509–531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.091>
- Morales-Polo, C., Cledera-Castro, M. D. M., Revuelta-Aramburu, M., & Hueso-Kortekaas, K. (2021). Bioconversion process of barley crop residues into biogas—energetic-environmental potential in Spain. *Agronomy*, 11(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040640>
- Mukeshimana, M. C., Zhao, Z. Y., Ahmad, M., & Irfan, M. (2021). Analysis on barriers to biogas dissemination in Rwanda: AHP approach. *Renewable Energy*, 163, 1127–1137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.051>
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. A. (2021). Recent advances in renewable energy technology for the energy transition. *Renewable Energy*, 179, 877–884. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.111>
- Paula, A., Luisa, A., Carvalho, G. De, Aparecida, T., Silva, C., João, N., & Bonomo, B. (2024). *ENERGIAS VERDES: A BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA NO BRASIL Leandro Teófilo Pinto dos Reis 3 Luiz Daniel Albuquerque Dias 7*. 1–9.
- Peral, D., Sánchez, J., López, P., Vallés, F., & Fernández, P. (2023). Promoting sustainable growth

- and self-production of energy through the water industry, as key elements for climate change action. *In Natural Resources Forum, Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.*, 47(4), 747–771.
- Pereira, E., Santos, J., Gabriel, E., Sousa, M. H. De, Dutra, E. D., Samuel, A., & Sales, A. T. (2023). *Northeast Region*. 1–18.
- PRTR España. (2014). *EDAR El Prat de Llobregat*. Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=6444
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., & Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7(JAN), 23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106>
- Raven, R. P. J. M., & Geels, F. W. (2010). Socio-cognitive evolution in niche development: Comparative analysis of biogas development in Denmark and the Netherlands (1973-2004). *Technovation*, 30(2), 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.08.006>
- REE. (2024). *Red Eléctrica Española. Informe del Sistema Eléctrico – Informe resumen de energías renovables 2023*. 1–2. https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2024-03/Informe_Renovables_2023.pdf
- Reyes, L., Zwagers, W. A., & Mulder, I. J. (2020). *Considering the Human-Dimension to Make Sustainable Transitions Actionable*.
- Rietow, J. C., Aisse, M. M., Baréa, L. C., Andreoli, C. V., & Possetti, G. R. C. (2023). Consolidation of the technology UASB reactors in the state of Paraná for the treatment of sanitary sewage. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 28, 1–12. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220298>
- Rip A; Kemp R. (1998). Technological Change. In *Rayner S, Malone L (eds.). Human choice and climate change. Volume II Resources and Technology. Washington D.C: Batelle Press* (Issue June, p. 74).
- Rosa, A. P., Lobato, L. C. da S., Borges, J. M., de Melo, G. C. B., & Chernicharo, C. A. de L. (2016). Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: Estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(2), 315–328. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>
- Rotmans, J., Kemp, R., & Van Asselt, M. (2001). Emerald Article: More evolution than revolution: transition management in public policy Jan Rotmans, René Kemp, Marjolein van Asselt. *Foresight*, 3(1), 15–31.

- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2019). *Portal Tratamento de Água. Sabesp conquista prêmio do BID por projeto de economia circular em Franca/SP*.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2022). *Fertilizante SABESP FÉRTIL*. <https://www.sabesp.com.br/assets/images/folhetos/sabesp-fertil.pdf>
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2023). Anexo Técnico II – Contrato de Programa do Município de Franca (versão completa). *Franca, SP: Sabesp*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxbhq.9>
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2024). *Relatório de sustentabilidade 2023*.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2025). *Relatório de Sustentabilidade 2024*.
- Salomon, K. R., & Silva Lora, E. E. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33(9), 1101–1107. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>
- Sedigas. (2023). *Estudio De La Capacidad De Producción De Biometano En España*.
- SEMIL, Secretaria de Meio Ambiente, I. e L. do E. de S. P. (2024). *Semil realiza visita técnica na única estação que gera energia do esgoto de SP*. <https://semil.sp.gov.br/2024/03/semil-realiza-visita-tecnica-na-unica-estacao-de-tratamento-de-sao-paulo-que-gera-energia-do-esgoto/>
- Smith, A., Stirling, A., & Berkhout, F. (2005). *The governance of sustainable socio-technical transitions*. 34, 1491–1510. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.07.005>
- SNIRH, S. N. de I. sobre R. H. (2015). *ATLAS ESGOTOS: DESPOLUIÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS – SISTEMA EXISTENTE - FRANCA*. https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Atlas_Esgoto/São_Paulo/Sistema_Atual/Franca.pdf
- Urbina, A. (2014). Solar electricity in a changing environment: The case of Spain. *Renewable Energy*, 68, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.005>
- Urrea Vivas, M. A., Seguí-Amórtégui, L., & Guerrero-García-Rojas, H. (2025). Analysis of greenhouse gas production at the El Prat del Llobregat wastewater treatment plant, Spain: the decarbonization challenge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10415–10432. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06338-z>
- Venkatesh, G., & Elmi, R. A. (2013). Economic-environmental analysis of handling biogas from

sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). *Energy*, 58, 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.025>

Welfle, A. (2017). Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*, 105(2017), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>

Zhang, Q., Smith, K., Zhao, X., Jin, X., Wang, S., Shen, J., & Ren, Z. J. (2021). Greenhouse gas emissions associated with urban water infrastructure: What we have learnt from China's practice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(4), 1–24. <https://doi.org/10.1002/wat2.1529>

Zhen Xin Phuang, Zuchao Lin, Peng Yen Liew, Marlia Mohd Hanafiah, K. S. W. (2022). The dilemma in energy transition in Malaysia: A comparative life cycle assessment of large scale solar and biodiesel production from palm oil. *Journal of Cleaner Production*, 350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131475>

Material Suplementar 2 – Lista de Estações de Tratamento de Esgoto na Espanha com digestores anaeróbios e capacidade superior a 10.000 habitantes equivalentes, segundo dados do PRTR e que recuperam energeticamente o biogás.
Os dados incluem a identificação das comunidades autônomas, a confirmação da recuperação ou não do biogás e a respectiva fonte de informação. Os dados de potência instalada e de térmica gerada estão incluídos apenas para as unidades cujas fontes disponibilizaram essas informações.

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
1	Andalucía	Cádiz	EDAR DE ROTA	CHIPIONA-PUERTO DE SANTA MARÍA, ENTRADA ROTA NORTE, KM.	11520				Charo Bernadez - modusrota@modusrota.es ; edar@modusrota.es
2	Andalucía	Huelva	EDAR PUNTA UMBRÍA	A-5050 HUELVA-PUNTA UMBRÍA	21100				
3	Andalucía	Cádiz	EDAR ALGECIRAS	DE ALGECIRAS, MUELLE DE ISLA VERDE, ZONA OESTE DEL DIQUE SUR	11207				
4	Andalucía	Málaga	EDAR DE RONDA	LA INDIANA	29400				
5	Andalucía	Almería	EDAR EL EJIDO	CAÑADA UGIJAR	4700				
6	Andalucía	Cádiz	EDAR DE SANLUCAR DE BARRAMEDA	CTRA LA JARA	11540				
7	Andalucía	Cádiz	EDAR DE CÁDIZ - SAN FERNANDO	N-IV. KM. 683	11100				
8	Andalucía	Málaga	EDAR ARROYO DE LA MIEL	ATLÁNTICO	29639				
9	Andalucía	Almería	EDAR ROQUETAS DE MAR	EL VÍNCULO	4740				
10	Andalucía	Jaén	EDAR DE SANTA CATALINA	GRANENA POZUELA	23001				
11	Andalucía	Sevilla	EDAR GUADALQUIVIR	GELVES-CORIA KM 7	41928				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
12	Andalucía	Cádiz	EDAR LAS GALERAS	AV DE LA LIBERTAD - CTRA DE PUERTO SHERRY	11500				
13	Andalucía	Málaga	EDAR EL PEÑON DEL CUERVO	DE JARAZMIN	29018				
14	Andalucía	Málaga	EDAR ESTEPONA	RIO GUADALMANSA CN-340	29680				
15	Andalucía	Málaga	EDAR GUADALHORCE	AZUCARERA INTELHORCE	29004	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
16	Andalucía	Málaga	EDAR FUENGIROLA	DEL CERRO DEL ÁGUILA	29640				
17	Andalucía	Málaga	EDAR ARROYO LA VIBORA	JOSE MEDIA, URB. LAS CHAPAS	29604				
18	Andalucía	Huelva	EDAR DE HUELVA	MARISMAS DEL PINAR	21002	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf

Ítem	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S(SIM) N(Não) V(vazio (informação não disponível))	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
19	Andalucía	Sevilla	EDAR COPER	DEL COPER	41700	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
20	Andalucía	Huelva	EDAR ANTILLA	EL TERRON LA ANTILLA	21440				
21	Andalucía	Granada	EDAR ALMUÑECAR	BARRANCO DE ITRABO	18690				
22	Andalucía	Granada	EDAR OESTE- LOS VADOS	ANTIGUA DE MALAGA KM 4	18015				
23	Andalucía	Sevilla	EDAR TABLADA	DE LA ESCLUSA	41011	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
24	Andalucía	Granada	EDAR SUR - CHURRIANA	DE PURCHILL	18004	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
25	Andalucía	Granada	EDAR MOTRIL - SALOBREÑA	RAMBLAS DE LAS BRUIAS	18600				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
26	Andalucía	Córdoba	EDAR DE LA GOLONDRINA	DE LA PUESTA EN RIESGO KM 6,5	14005	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
27	Andalucía	Sevilla	EDAR SAN JERONIMO II	DE LA ALGABA	41015	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
28	Andalucía	Almería	EDAR EL BOBAR	MARGEN IZQUIERDO DEL RIO ANDARAX	4120				
29	Andalucía	Cádiz	EDAR GUADALETE	EL PORTAL	11402	S	469		https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
30	Andalucía	Sevilla	EDAR RANILLA	SAN JOSE DE PALMETE	41091	S			https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
31	Andalucía	Cádiz	EDAR DE LA LINEA DE LA CONCEPCION	DEL HIGUERON	11300				
32	Aragón	Zaragoza	UTEDEZA E.D.A.R. "LA CARTUJA"	Cº DE LA DEPURADORA	50720	S			
33	Aragón	Zaragoza	EDAR ALMOZARA	DE LA NOGUERA	50011	S			
34	Aragón	Huesca	EDAR HUESCA	SARIÑENA, KM	22196	S			
35	Asturias (Principado de)	Asturias	EDAR SAN CLAUDIO	CARRETERA DE SENDÍN A SAN CLAUDIO	33191				
36	Asturias (Principado de)	Asturias	E.P.A.R. EL PISÓN	GIRASOLES	33203				
37	Asturias (Principado de)	Asturias	EDAR DE VILLAPEREZ	DE VILLAPEREZ S/N	33194				
38	Asturias (Principado de)	Asturias	EDAR DE MAQUA	ZELUAN S/N	33418				
39	Asturias (Principado de)	Asturias	E.D.A.R. LA REGUERONA	L - 531 - ABOÑO	33492				
40	Balears (Illes)	Balears (Illes)	EDAR SANTA PONÇA	SON PILLO	7180				
41	Balears (Illes)	Balears (Illes)	EDAR 2-EMAYA.S.A.	FONDO	7010				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
42	Balears (Illes)	Balears (Illes)	EDAR 1	SON OLIVER	7610				
43	Canarias	Santa Cruz de Tenerife	ESTACIÓN DE PRETRATAMIENTO Y BOMBEO DE CABO LLANOS	REGLA	38003				
44	Canarias	Santa Cruz de Tenerife	EDAR ADEJE-ARONA	PLAYA DEL REY	38660				
45	Canarias	Palmas (Las)	EDAR BARRANCO SECO II	CARRETERA DEL CENTRO KM 2	35003				
46	Canarias	Santa Cruz de Tenerife	EDAR SANTA CRUZ DE TENERIFE	ANATOLIO DE FUENTES GARCÍA	38009				
47	Canarias	Palmas (Las)	EDAR SURESTE	LOS CACTUS,	35118				
48	Cantabria	Cantabria	E.D.A.R DE SAN PANTALEÓN	SAN PANTELEON, CA-141, KM 32	39150				
49	Cantabria	Cantabria	EDAR DE VUELTA OSTRERA	CORTIGUERA	39340				
50	Cantabria	Cantabria	EDAR SAN ROMAN	SAN ROMAN	39012				
51	Castilla y León	Segovia	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE SEGOVIA	DE ARÉVALO KM 3.5	40154	S	225		https://energia.serviciosmin.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
52	Castilla y León	León	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE VILLADEPALOS	PARAJE LA MEZILLA CODESAIS	24565				
53	Castilla y León	Valladolid	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE VALLADOLID	CAMINO VIEJO DE SIMANCAS	47008	S	1365	2708	https://energia.serviciosmin.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
54	Castilla y León	Burgos	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE BURGOS	54	9001				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
55	Castilla y León	León	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE LEÓN Y SU ALFOZ	AVENIDA PROLONGACIÓN SAENZ DE MIERA	24009	S		2038	https://energia.serviciosmin.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalaciones.aspx
56	Castilla y León	Palencia	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE PALENCIA	PALENCIA-VENTA DE BAÑOS	34004				
57	Castilla y León	Zamora	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE ZAMORA	40	49029				
58	Castilla y León	Salamanca	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE BEJAR	DE LA MAGDALENA	37700				
59	Castilla y León	Ávila	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE ÁVILA	DEL BATÁN	5001				
60	Castilla y León	Salamanca	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES DE SALAMANCA	PARAJE:EL MARIN	37003				
61	Castilla-La Mancha	Ciudad Real	EDAR ALCAZAR DE SAN JUAN. GESTIÓN DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA (EDAR - POL. ALCES)	POL. ALCES, S/N.	13600				
62	Castilla-La Mancha	Albacete	EDAR ALBACETE	C/ CAMINO DEL CEMENTERIO, S/N	2006				
63	Castilla-La Mancha	Ciudad Real	EDAR CIUDAD REAL	PIEDRABUENA	13001				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
64	Castilla-La Mancha	Ciudad Real	E.D.A.R. PUERTOLLANO	CTRA. DEL VILLAR, KM. 7	13500				
65	Castilla-La Mancha	Ciudad Real	AQUALIA - EDAR TOMELLOSO URBANA	CRTA. PEDRO MUÑOZ, KM. 41	13700				
66	Castilla-La Mancha	Toledo	FCC AQUALIA, S.A.- EDAR POL. IND. STA Mª BENQUERENCIA	C) JARAMA, S/N. APDO CORREOS 1053	45080				
67	Castilla-La Mancha	Toledo	FCC - EDAR TOLEDO	C) JARAMA S/N APDO DE CORREOS 1053	45080				
68	Castilla-La Mancha	Ciudad Real	AQUALIA - EDAR DE VALDEPEÑAS	C) TORRECILLA, 31	13300				
69	Castilla-La Mancha	Toledo	AQUALIA - EDAR TALAVERA DE LA REINA	CAMINO DE CASAR DEL CIEGO, 1	45600				
70	Castilla-La Mancha	Guadalajara	EDAR GUADALAJARA	CARRETERA NACIONAL II, KM 53 (APARTADO DE CORREOS 296)	19080				
71	Cataluña	Barcelona	EDAR ABRERA	CRTA. BV-1201 DE MARTORELL A OLESA	8630	S	325		https://energia.serviciosmunicipales.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
72	Cataluña	Barcelona	EDAR VILANOVA I LA GELTRÚ	RONDA EUROPA	8800				
73	Cataluña	Barcelona	EDAR SITGES-SANT PERE DE RIBES	C-246A KM 39,8	8870	S	130		https://energia.serviciosmunicipales.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
74	Cataluña	Tarragona	EDAR RIERA DE LA BISBAL	DE L'ALBORNAR	43710	S	140		https://energia.serviciosmunicipales.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx

Item	Comunidade autónoma	Província	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
75	Cataluña	Girona	EDAR FIGUERES	VELL DE VILATENIM	17600				
76	Cataluña	Barcelona	EDAR ALT MARESME NORD	HORTSAVINYA	8397				
77	Cataluña	Girona	EDAR BLANES	ACCES COSTA BRAVA KM 3,8	17300				
78	Cataluña	Girona	EDAR LLORET DE MAR	URBANITZACIÓ CONDADO DEL JARUCO	17310				
79	Cataluña	Girona	EDAR CASTELL-PLATJA D'ARO	DE LES AFORES (DARRERA PARC DE BOMBERS)	17853				
80	Cataluña	Girona	EDAR PALAMÓS	PLATJA DEL CASTELL	17230				
81	Cataluña	Girona	EDAR ROSES	ARENES	17480				
82	Cataluña	Girona	EDAR L'ESCALA	DEL SANT CRIST, KM 1,5	17130				
83	Cataluña	Tarragona	EDAR CAMBRILS	TV-3141 KM 1	43850				
84	Cataluña	Barcelona	EDAR IGUALADA	MOLENTS	8788				
85	Cataluña	Tarragona	EDAR VILA-SECA I SALOU	AUTOVIA TARRAGONA-SALOU, IV-3146	43481				
86	Cataluña	Barcelona	EDAR LA LLAGOSTA	DE CAN DONADEU	8120	S	260		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
87	Cataluña	Barcelona	EDAR GRANOLLERS	RAL	8400	S	1252		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
88	Cataluña	Barcelona	EDAR SABADELL RIU RIPOLL	CAN ROQUETA	8202	S	640		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
89	Cataluña	Barcelona	EDAR SABADELL RIU SEC	SANT PAU DE RIU SEC	8205				
90	Cataluña	Barcelona	EDAR MONTORNÈS DEL VALLÈS	CTRA. DE LA ROCA KM. 15,6	8170	S	248		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
91	Cataluña	Lleida	EDAR LLEIDA	SOT DE FONTANET	25197				
92	Cataluña	Barcelona	EDAR TEIÀ	N-II	8329				
93	Cataluña	Barcelona	EDAR BESÒS	FINAL RAMBLA PRIM INTERIOR	8019				
94	Cataluña	Tarragona	EDAR REUS	PARTIDA PORPRES 5 CAMINS, FINCA 52	43206	S	240		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
95	Cataluña	Barcelona	EDAR MATARÓ	N-II, KM 644	8301				
96	Cataluña	Barcelona	EDAR MANRESA	D'ABRERA A MANRESA	8240				
97	Cataluña	Barcelona	EDAR TERRASSA	BAIX RIERA S/N	8228	S	831		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
98	Cataluña	Tarragona	EDAR TARRAGONA	CAMÍ DE LA PLATJA DE RIU CLAR S/N	43005				
99	Cataluña	Girona	EDAR GIRONA	CAMPDORÀ	17461				
100	Cataluña	Barcelona	EDAR MONTCADA I REIXAC	CARRETERA DE LA ROCA	8110				
101	Cataluña	Barcelona	EDAR GAVÀ	C-31	8840				
102	Cataluña	Barcelona	EDAR SANT FELIU DE LLOBREGAT	RIERA DE LA SALUT	8980	S	610		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
103	Cataluña	Barcelona	EDAR EL PRAT DE LLOBREGAT	PORTS D'ASIA S/N P.I. PRATENC	8820	S	8139		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
104	Cataluña	Barcelona	EDAR VIC	RODA	8500	S	500		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
105	Cataluña	Barcelona	EDAR RUBÍ	C1413A	8190	S	260		https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx
106	Cataluña	Barcelona	EDAR VILAFRANCA DEL PENEDES	TARRAGONA S/N	8720				
107	Cataluña	Girona	EDAR DEL TERRI	VEÏNAT CAN FERRAN	17844				
108	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR ALACANT NORTE	PARTIDA EL CANTALAR	3550				
109	Comunidad Valenciana	Castellón/Castelló	EDAR OROPESA DEL MAR	CARRETERA VIEJA (JUNTO A RÍO CHINCHILLA)	12594				
110	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR VILA JOIOSA	PLANS PILETA	3570				
111	Comunidad Valenciana	Valencia/València	EDAR PINEDO 2	AL RIU	46012	S	2.023	6.418.100	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
112	Comunidad Valenciana	Valencia/València	EDAR PINEDO 1	CAMI DELS ANOUERS	46012	S	2.589	12.469.200	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
113	Comunidad Valenciana	Valencia/València	EDAR DE SAGUNTO	PARTIDA LA VILA	46520	S	330	1.098.548	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
114	Comunidad Valenciana	Valencia/València	EDAR L'HORTA NORD-POBLA DE FARNALS	CARRETERA DE MASSAMAGRELLA LA PLAYA DE LA POBLA DE FARNALS	46137	S	330	1.520	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
115	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR PATERNA - FUENTE DEL JARRO	CARRETERA MANISES	46980	S	325	1.142.157	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
116	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR ONTINYENT - AGULLENT	CARRETERA VALENCIA	46870	S	100	80.310	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
117	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR GANDIA - LA SAFOR SUD	CARRETERA GRAO A OLIVA	46701	S	641	1.966.325	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf

Item	Comunidade autónoma	Província	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
118	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR QUART BENÁGER	CAMINO DE PICANYA	46014	S	1.090	1.500	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpcgiclfefndnkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
119	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR ALZIRA - CARCAIXENT	CAMINO DE LA VINTENA	46740	S	700	1.670.766	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpcgiclfefndnkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
120	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR CANALS-L'ALCUDIA DE Crespins	CALLE RIBA DE SAGRES	46650				
121	Comunidad Valenciana	Valencia/Valência	EDAR ALBUFERA SUR	CAMINO DE LA MARJAL	46440	S	550	1.654.133	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpcgiclfefndnkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
122	Comunidad Valenciana	Valencia/València	EDAR CUENCA DEL CARRAIXET	CALLE Nº13 POLIGONO INDUSTRIAL Nº3	46120	S	330	2.196.021	https://energia.serviciosmii.n.gob.es/Pretor/Vista/Informes/Infor
123	Comunidad Valenciana	Castellón/Castelló	EDAR CASTELLÓN DE LA PLANA	CAMINO HONDO	12003	S	500	1494000	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpegicljcfindnkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
124	Comunidad Valenciana	Castellón/Castelló	EDAR DE ALMASSORA	CAMINO VORA RIU	12550				
125	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR PILAR DE LA HORADA	CARRETERA CV-941	3190				
126	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR TORREVIEJA	CAMINO DEL CEMENTERIO	3180				
127	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR SANTA POLA	CARRETERA NACIONAL 332	3130				
128	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR FONT DE LA PEDRA	PARTIDA FONT DE LA PEDRA	3839				
129	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR VALLE DEL VINALOPÓ	CAMINO DE LA JAUD	3600				

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
130	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR ALGORÓS - ELX	PARTIDA ALGOROS	3293	S	667	2.132.500	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpcgiclfefndmkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
131	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR ALCOI	PARTIDA ELS ALGARS	3820	S	311	573.929	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpcgiclfefndmkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
132	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR BENIDORM	DE LA BARRINA	3503	S	660	2116834	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnni bpcajpcgiclfefndmkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf

Item	Comunidade autônoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
133	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR RINCÓN DE LEÓN	CAMINO VIEJO DE ELCHE	3007	S	460	2.113.496	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
134	Comunidad Valenciana	Alicante/Alacant	EDAR MONTE ORGEGIA	PARTIDA DE ORGEGIA	3080	S	450	1.483.308	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
135	Comunidad Valenciana	Alicante	Novelda - Monforte Del Cid	Camino del río, Monforte del Cid	3670	S	261	305.698	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
136	Comunidad Valenciana	Valencia	EDAR Utiel	CV-447	46300	S	65	39.779	Memorial de Gestión 2023 chrome-extension://efaidhbmnni bpcajpcglcfeindmkaj/http s://www.epsar.gva.es/sites /default/files/2024-05/MEMORIA%20DE%20GESTION%20-%202023_firmado.pdf
137	Extremadura	Badajoz	EDAR RINCÓN DE CAYA (BADAJOZ)	RINCÓN DE CAYA, S/N	6012	S			https://energia.serviciosmi n.gob.es/Pretor/Vista/Info rmes/Infor
138	Extremadura	Cáceres	EDAR DEL MARCO (AYTO. CÁCERES) CONCESIONADA A ACCIONA AGUAS	TORREJÓN EL RUBIO, KM 2	10004				
139	Galicia	Ourense	EDAR DE OURENSE	CARRETERA DE CORTEGADA S/N KM 3	32002				
140	Galicia	Coruña (A)	EDAR DE BENS	PUNTA DO BURRO	15010				
141	Galicia	Pontevedra	EDAR PLACERES	PLACERES-LOURIZAN	36910				
142	Galicia	Coruña (A)	EDAR SILVOUTA	ROXOS-VILLESTRO	15078				
143	Galicia	Ourense	EDAR REZA	CORTEGADA	32003				
144	Galicia	Pontevedra	EDAR LAGARES	RICARDO MELLA	36213	S	1600		https://energia.serviciosmi n.gob.es/Pretor/Vista/Info rmes/Infor
145	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. TRES CANTOS	RONDA DE VALDECARRIZO	28760				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
146	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. NAVALCARNERO	M-404	28607				
147	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ARROYO QUIÑONES	CMNO VIEJO DE TORRELAGUNA	28703				
148	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. NAVARROSILLOS	PLANTÍO	28770				
149	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. TORREJÓN DE ARDOZ	CASTILLO DE ALDOVEA	28850	S	404		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
150	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ARROYO LA REGUERA	CAMINO DE ARROYOMOLINOS	28938				
151	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. CULEBRO CUENCA MEDIA BAJA	SAN MARTÍN DE LA VEGA	28906	S	2856		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
152	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. LA GAVIA	DE LOS YESEROS	28031	S	2019		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
153	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ARROYO DE LA VEGA	DEL JUNCAL	28700				
154	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ARROYO CULEBRO C.M.A.	M-506	28320	S	1320		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
155	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. VIVEROS	PUERTA DE HIERRO	28040	S	1716		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
156	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. SUR	SAN MARTÍN DE LA VEGA	28906	S	7103	24800	https://energia.serviciosmipn.gob.es/Pretor/Vista/Informes/Infor

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S(SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
157	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. BUTARQUE	DE LOS ROSALES	28021	S	2896		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
158	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. SUR ORIENTAL	VALENCIA, KM. 19,000	28529	S	616		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
159	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. LA CHINA	EMBAJADORES	28053	S	2906		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
160	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. EL ENDRINAL	FINCA ENDRINAL	28400				
161	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. VILLAVICIOSA	DE LA ALCANTARILLA	28670				
162	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ARROYO DEL SOTO	DE LOS DEPORTES	28935	S	1080		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
163	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ARANJUEZ	ANTIGUA DE TOLEDO	28300				
164	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. REJAS	DE LA MUÑOZA	28042	S	1328		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
165	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. VALDEBEBAS	VALDEBEBAS A PARACUELLOS	28042	S	690		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
166	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. LA POVEDA	CAMPOREAL	28500				
167	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ALCALÁ ESTE	DE LOS REYES CATÓLICOS	28803				

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S (SIM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KW/h/ano	Fonte da Informação
168	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. ALCALÁ OESTE	ANTIGUA DE BARCELONA, KM. 25,200	28801	S	808		https://www.canaldeisabelsegunda.es/generacion-de-energia
169	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. VELILLA	DEL CEMENTERIO S/N	28891				
170	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. SOTOGUTIERREZ	SAN MARTÍN DE LA VEGA A CIEMPOZUELOS	28330				
171	Madrid (Comunidad de)	Madrid	E.D.A.R. CASAQUEMADA	SAN FERNANDO A MEJORADA	28830				
172	Murcia (Región de)	Murcia	EDAR LAS TORRES DE COTILLAS	SOTO DE LAS RITAS	30365				
173	Murcia (Región de)	Murcia	EDAR SAN PEDRO DEL PINATAR	DEL PUERTO	30740				
174	Murcia (Región de)	Murcia	DEPURADORA DE ALGUAZAS	DE LOS QUÍÑONES	30560				
175	Murcia (Región de)	Murcia	DEPURADORA DE LA HOYA DE LORCA	CASA BALDAZO DE ABAJO S/N	30816	S		446301	Solicitação no portão de transparência - ESAMUR
176	Murcia (Región de)	Murcia	EDAR MOLINA DE SEGURA NORTE	CAMPOTEJAR BAJA	30509	S		635766	Solicitação no portão de transparência - ESAMUR
177	Murcia (Región de)	Murcia	ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES MURCIA ESTE	RINCÓN DE SAN ANTÓN	30161	S		6623000	Solicitação no portão de transparência - ESAMUR
178	Murcia (Región de)	Murcia	EDAR Alcantarilla	Plaza San Pedro, 1	30820	S		548739	Solicitação no portão de transparência - ESAMUR
179	Murcia (Región de)	Murcia	EDAR Cabezo Beaza	Cartagena	30395	S		1372100	Solicitação no portão de transparência - ESAMUR

Item	Comunidade autónoma	Provincia	Nome do complexo	Endereço	Código postal	Recupera e usa o biogás S(SiM) N (Não) Vazio (Informação não disponível)	Potência Instalada	Cogeração KWh/ano	Fonte da Informação
180	Navarra (Comunidad Foral de)	Navarra	NILSA-EDAR DE TUDELA	CTRA. N-134 KM. 1,5	31500				
181	Navarra (Comunidad Foral de)	Navarra	EDAR ARAZURI	EDAR ARAZURI	31170	S	1100		https://energia.serviciosmin.gob.es/Pretor/Vista/Informes/Infor
182	País Vasco	Guipúzcoa	DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES - EDAR ATAL ERREKA	HIGER (FARO DE HIGER)	20280				
183	País Vasco	Alava	EDAR DE CRISPIJANA	CRISPIJANA	1195				
184	País Vasco	Guipúzcoa	EDAR LOIOLA ~-8~	CAMINO LA HIPICA	20014				
185	País Vasco	Vizcaya	EDAR DE ARRIANDI	ARRIANDI	48215				
186	Rioja (La)	Rioja (La)	EDAR CALAHORRA	CAMINO PERENZANO	26500				
187	Rioja (La)	Rioja (La)	EDAR LOGROÑO	CAMINO MADRE DE DIOS	26006	S		834	https://energia.serviciosmin.gob.es/Pretor/Vista/Informes/InformesInstalacion.es.aspx

