

06 2024

Universidade Federal do Rio de Janeiro



**BIOGÁS NA SUINOCULTURA: UMA
ANÁLISE DIAGNÓSTICA E PROSPECTIVA
DO ESTADO ATUAL E DA CAPACIDADE DE
EXPANSÃO DA INDÚSTRIA NA REGIÃO SUL
DO BRASIL**

Rhamon Victor Menezes Lima Bastos Garcia

2024

**BIOGÁS NA SUINOCULTURA: UMA ANÁLISE
DIAGNÓSTICA E PROSPECTIVA DO ESTADO ATUAL E
DA CAPACIDADE DE EXPANSÃO DA INDÚSTRIA NA
REGIÃO SUL DO BRASIL**

Rhamon Victor Menezes Lima Bastos Garcia

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Maria Antonieta Peixoto Gimenes
Couto
Estevão Freire

Rio de Janeiro
Junho de 2024

BIOGÁS NA SUINOCULTURA: UMA ANÁLISE DIAGNÓSTICA E PROSPECTIVA
DO ESTADO ATUAL E DA CAPACIDADE DE EXPANSÃO DA INDÚSTRIA NA
REGIÃO SUL DO BRASIL

Rhamon Victor Menezes Lima Bastos Garcia

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL

Examinada por:

Prof. Gisele Silva Barbosa, D.Sc.

Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

Prof. Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto, D.Sc

Prof. Estevão Freire, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2024

Victor Menezes Lima Bastos Garcia, Rhamon

Biogás na Suinocultura: Uma análise diagnóstica e prospectiva do estado atual e da capacidade de expansão da indústria na Região Sul do Brasil/Rhamon Victor Menezes Lima Bastos Garcia. – Rio de Janeiro: UFRJ/POLI, 2024.

XIX, 116 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto
Estevão Freire

Projeto de Graduação (engenharia) – UFRJ/POLI/Curso de Engenharia Ambiental, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 111 – 116.

1. Suinocultura. 2. Biogás. 3. Sistemas de Informação Geográfica. 4. Geoprocessamento. 5. Análise Multicritério. 6. Análise Hot Spots. 7. Pesquisa Bibliográfica. 8. Pesquisa Patentária. I. Peixoto Gimenes Couto, Maria Antonieta *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, POLI, Curso de Engenharia Ambiental. III. Título.

Sonhar grande e sonhar pequeno dá o mesmo trabalho, por que vou sonhar pequeno?

Agradeço aos meus pais Dalmo e Ana Paula pelo apoio ao longo de toda minha vida e por acreditarem no meu potencial, aos amigos da escola e da faculdade por me incentivarem durante os estudos.

Resumo da Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica da UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Biogás na Suinocultura: Uma análise diagnóstica e prospectiva do estado atual e da capacidade de expansão da indústria na Região Sul do Brasil

Rhamon Victor Menezes Lima Bastos Garcia

Junho/2024

Orientadores: Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto
Estevão Freire

Curso: Engenharia Ambiental

A busca por fontes de energia que tenham um menor impacto no meio ambiente têm se intensificado a cada ano devido a necessidade mundial de estabelecer um equilíbrio entre homem e natureza, além de garantir o progresso econômico e social. O biogás, combustível produzido através de resíduos orgânicos e com uma gama de aplicações energéticas, está em uma curva crescente de participação na matriz energética brasileira. O presente trabalho apresenta um mapa da atual situação do biogás como fonte energética no Brasil, em especial na região sul do país, abordando tanto aspectos como disponibilidade de biomassa e infraestrutura, e duas análises focadas na Indústria da Suinocultura, com base no uso de análise multicritério com *software* de geoprocessamento. Além disso, foram usadas ferramentas para pesquisa bibliográfica e patentária, para analisar como as tecnologias de reatores, agitadores, purificação e tratamento de biogás tem se posicionado dentro do mercado nacional e internacional. O Brasil conta com 755 plantas em operação, responsáveis por toda a produção nacional de biogás, 44 em implantação e 12 em reformulação, e há ações de incentivo, que norteiam e direcionam a geração do biogás. Atualmente o país aproveita apenas 3% do enorme potencial de produção que detém e na região sul do Brasil é aproveitado somente 5%. A partir da análise realizada para a suinocultura, um dos principais setores para desenvolvimento de biogás na região sul, visualizou-se que as principais zonas de alta geração de biomassa oriunda dos processos da Indústria da Suinocultura, sendo elas as regiões geográficas intermediárias de Chapecó e Caçador no estado do Paraná, e as de Cascavel e Ponta Grossa no estado de Santa Catarina, possuem somente uma unidade produtiva de grande porte para produção

de biogás. Dessa forma, ainda existe um grande potencial para desenvolvimento de hubs produtivos, com uso de substratos agropecuários, dedicados à Indústria de Biogás nessas zonas prioritárias. Soma-se a isso, a identificação, através da metodologia de pesquisa bibliográfica de artigos científicos e prospecção tecnológica de patentes, que países como Estados Unidos, China e Alemanha se destacam como proeminentes no desenvolvimento de tecnologias para a área de biogás. Nesse contexto, a geração e utilização do biogás para fins energéticos traz ganhos econômicos, sociais e ambientais para o Brasil e o crescimento do uso de biogás carece de ser mobilizado, para que esses benefícios sejam desfrutados por toda a sociedade.

Palavras-chave: Suinocultura, Biogás, Sistemas de Informação Geográfica, Geoprocessamento, Análise Multicritério, Análise Hot Spots, Pesquisa Bibliográfica, Pesquisa Patentária.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Biogas in Swine Industry: A diagnostic and prospective analysis of the current state and expansion capacity of the industry in the Southern Region of Brazil - POLI/UFRJ

Rhamon Victor Menezes Lima Bastos Garcia

June/2024

Advisors: Maria Antonieta Peixoto Gimenes Couto
Estevão Freire

Course: Environmental Engineering

The search for energy sources that have a lower impact on the environment has intensified every year due to the global need to establish a balance between man and nature, in addition to ensuring economic and social progress. Biogas, a fuel produced from organic waste and with a range of energy applications, is on a growing participation curve in the Brazilian energy matrix. This work presents a map of the current situation of biogas as an energy source in Brazil, especially in the southern region of the country, addressing aspects such as availability of biomass and infrastructure, and two analyzes focused on the Pig Farming Industry, based on the use of analysis multicriteria with geoprocessing software. Furthermore, bibliographic and patent research tools were used to analyze how reactor, agitator, biogas purification and treatment technologies have positioned themselves within the national and international market. Brazil has 755 plants in operation, responsible for all national biogas production, 44 under implementation and 12 under reformulation, and there are incentive actions that guide and direct the generation of biogas. Currently the country uses only 3% of the enormous production potential it holds and in the southern region of Brazil only 5% is used. From the analysis carried out for swine farming, one of the main sectors for biogas development in the southern region, it was seen that the main areas of high biomass generation are the intermediate geographic regions of Chapecó and Caçador in the state of Paraná, and the of Cascavel and Ponta Grossa in the state of Santa Catarina, originating from the Pig Industry processes, has only one large production unit for the production of biogas. Therefore, there is still great potential for the development of production hubs, using agricultural substrates, dedicated to the Biogas

Industry in these priority areas. Added to this is the identification, through the methodology of bibliographic research of scientific articles and technological patent prospecting, that countries such as the United States, China and Germany stand out as prominent in the development of technologies for the biogas area. The generation and use of biogas for energy purposes brings economic, social and environmental gains to Brazil and the growth in the use of biogas needs to be mobilized, so that these benefits are enjoyed by the entire society.

Keywords: Swine Industry, Biogas, Geographic Information Systems, Geoprocessing, Multicriteria Analysis, Hot Spots Analysis, Bibliographic Research, Patents Research.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Símbolos	xviii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Estrutura do Trabalho	4
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1 BIOGÁS, GÁS NATURAL E BIOMETANO	7
3.2 CADEIA DE VALOR DO BIOGÁS	10
3.2.1 Rotas tecnológicas de plantas de biogás	12
3.2.2 Fontes e tipos de resíduos	13
3.2.2.1 Saneamento	14
3.2.2.2 Resíduos da Agropecuária	15
3.2.2.3 Suinocultura	15
3.2.2.4 Resíduos da agroindústria de transformação	16
3.2.3 Pré-tratamento	16
3.2.4 Digestão Anaeróbia	17
3.2.5 Biodigestores	19
3.2.5.1 Modelo Indiano	20
3.2.5.2 Modelo Chinês	21
3.2.5.3 Modelo Canadense ou Biodigestor Lagoa Coberta (BLC)	22
3.2.5.4 Tanque de Agitação Contínua - CSTR	23
3.2.5.5 Biodigestor tipo UASB	24
3.2.5.6 Biodigestor em fase sólida	26
3.2.6 Tratamento e purificação do biogás	27

3.2.6.1	Remoção de vapor d'água	28
3.2.6.2	Dessulfurização	29
3.2.6.3	Remoção de CO_2	30
3.3	FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	30
3.4	GEOPROCESSAMENTO E SIG	32
3.4.1	Tipos de dados SIG	32
3.4.1.1	Vetorial	33
3.4.1.2	Matricial ou Raster	33
3.4.2	Análise Multicritério em ambiente SIG	33
3.5	PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E ANÁLISE PROSPECTIVA	34
3.5.1	Artigos Científicos	35
3.5.2	Patentes	35
4	PANORAMA GERAL DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE ARTIGOS E PATENTES EM BIOGÁS	36
4.1	DIRETRIZES DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA DE ARTIGOS CI- ENTÍFICOS	36
4.2	PANORAMA ATUAL EM ARTIGOS CIENTÍFICOS SOBRE BIOGÁS .	38
4.2.1	Reatores para produção de biogás	38
4.2.2	Agitação dentro de reatores	40
4.2.3	Tratamento e Purificação do Biogás	42
4.3	DIRETRIZES DA PESQUISA PATENTÁRIA	44
4.4	PANORAMA ATUAL EM PATENTES SOBRE BIOGÁS	44
5	PANORAMA GERAL DO BIOGÁS NO BRASIL	50
5.1	BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA	50
5.2	CENÁRIO PRODUTIVO DO BIOGÁS	52
5.3	PLANTAS DE BIOGÁS NO BRASIL	53
5.3.1	Plantas em operação	54
5.3.1.1	Porte	54
5.3.1.2	Fonte de substrato	55
5.3.1.3	Aplicação energética	56
5.3.1.4	Localização das plantas de biogás no Brasil	57
6	ÁREA DE ESTUDO - REGIÃO SUL	59
6.1	CENÁRIO PRODUTIVO DO BIOGÁS NA REGIÃO SUL	60
6.2	CENÁRIO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ORIUNDA DE BIOGÁS NA REGIÃO SUL	64
6.3	SUINOCULTURA NA REGIÃO SUL	65

6.4	PANORAMA TECNOLÓGICO DAS PLANTAS DE BIOGÁS NA REGIÃO SUL	68
6.4.1	Tecnologias empregadas	70
6.4.1.1	Origem das tecnologias	70
6.4.1.2	Transporte do Substrato	71
6.4.1.3	Pré-tratamento	71
6.4.1.4	Tecnologias de biodigestão	72
6.4.1.5	Aquecimento do substrato	73
6.4.1.6	Agitação do substrato	74
6.4.1.7	Tratamento do Biogás	74
6.4.1.8	Aplicações do biogás	76
7	METODOLOGIA	78
7.1	ANÁLISES ESPACIAIS	78
7.1.1	Análise Espacial Multicritério	78
7.1.2	Análise Espacial <i>Hot Spots</i>	89
7.1.3	Sobreposição final de camadas resultantes das análises espaciais .	90
8	RESULTADOS	91
8.1	MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITÉRIO	91
8.1.1	Cálculo do raio de distância aos dados de entrada	91
8.1.2	Reclassificação dos valores dos raios de distância	95
8.1.3	Cálculo do índice de aptidão para novas plantas de biogás	99
8.1.4	Análise de <i>Hot Spots</i> de produção de biogás	101
8.1.5	Sobreposição índice de aptidão e <i>Hot Spots</i>	102
8.1.6	Avaliação das localizações de plantas de biogás existentes na região sul, em relação aos índices de aptidão e <i>Hot Spots</i>	104
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	106
9.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
9.1.1	Modelagem Espacial Multicritério	106
9.1.2	Pesquisa Bibliográfica de Artigos Científicos	107
9.1.3	Análise Prospectiva de Patentes	108
9.2	CONCLUSÕES	109
9.3	TRABALHOS FUTUROS	109
	Referências Bibliográficas	111

Lista de Figuras

3.1	Diferenças entre os gases combustíveis.	8
3.2	Principais propriedades do biogás.	8
3.3	Hierarquia de remoção de impurezas do biogás de acordo com a aplicação energética desejada.	9
3.4	Cadeia de valor do Biogás.	10
3.5	Etapas da produção de biogás.	12
3.6	Diagrama simplificado de produção e aplicações para plantas de biogás. .	13
3.7	Características de geração de dejetos oriundos de diferentes espécies animais e de geração de biogás e metano.	15
3.8	Etapa de pré-tratamento que antecede a decomposição do substrato. . . .	17
3.9	Processo de digestão anaeróbia.	18
3.10	Representação esquemática do biodigestor modelo indiano.	20
3.11	Vantagens e desvantagens do modelo indiano.	21
3.12	Representação esquemática do biodigestor modelo chinês.	21
3.13	Vantagens e desvantagens do modelo chinês.	22
3.14	Representação esquemática do biodigestor modelo lagoa coberta.	22
3.15	Vantagens e desvantagens do modelo canadense.	23
3.16	Representação esquemática de um tanque de agitação contínua - CSTR .	24
3.17	Representação esquemática de um reator UASB	25
3.18	Representação esquemática do biodigestor em fase sólida	26
3.19	Tratamento e purificação do biogás conforme o uso final	28
4.1	Principais documentos utilizados na pesquisa e definição de palavras-chave para o trabalho.	37
4.2	Palavras Chave utilizadas na pesquisa bibliográfica.	37
4.3	Estratégias de pesquisa utilizadas para a pesquisa bibliográfica.	37
4.4	Número de publicações envolvendo reatores CSTR, UASB e BLC entre os anos de 2017 e 2022.	38
4.5	Número de publicações atreladas a cada tipo de reator entre 2017 e 2022.	39
4.6	Número de publicações por país, de acordo com autores dos estudos, entre os anos de 2017 e 2022.	39

4.7	Número de publicações envolvendo agitadores mecânicos e hidráulicos entre os anos de 2017 e 2022.	40
4.8	Número de publicações atreladas a cada tipo de agitador entre os anos de 2017 e 2022.	41
4.9	Número de publicações por país, de acordo com autores dos estudos, entre os anos de 2017 e 2022.	41
4.10	Número de publicações envolvendo técnicas de purificação e tratamento de biogás entre os anos de 2017 e 2022.	42
4.11	Número de publicações atreladas a cada tipo de técnica de purificação e tratamento entre os anos de 2017 e 2022.	43
4.12	Número de publicações envolvendo técnicas de purificação e tratamento de biogás por país, de acordo com autores dos estudos, entre os anos de 2017 e 2022.	43
4.13	Número de patentes depositadas ao longo dos anos de 1999 a 2023 na temática de biogás originado de resíduos.	45
4.14	Relação de principais campos técnicos abordados pelas patentes.	45
4.15	Relação de principais depositantes de patentes na temática de biogás originado de resíduos.	46
4.16	Situação atual em categorias das patentes depositadas ao longo do período de 1999 a 2023.	47
4.17	Relação de principais instituições acadêmicas na temática de biogás originado de resíduos.	47
4.18	Relação de principais empresas na temática de biogás originado de resíduos.	48
4.19	Relação de principais startups na temática de biogás originado de resíduos.	49
5.1	Matriz energética brasileira - 2021	51
5.2	Participação do biogás em “outras renováveis”	51
5.3	Evolução, entre o período de 2015 a 2021, da participação das energias renováveis e do biogás, em especial, na matriz energética brasileira	52
5.4	Crescimento da Indústria de Biogás entre o período de 2017 a 2021	53
5.5	Distribuição do volume de biogás produzido no Brasil de acordo com o status operacional	54
5.6	Classificação do porte das plantas de acordo com o volume de biogás produzido	54
5.7	Plantas em operação no Brasil agrupadas de acordo com o porte	55
5.8	Agrupamento, a partir da fonte de substrato, das plantas de biogás em operação no Brasil	55
5.9	Distribuição de plantas de acordo com a origem de substrato por grandes regiões do Brasil	56

5.10	Contagem por estado da quantidade de plantas de biogás no Brasil	57
5.11	Ranking dos estados brasileiros em relação a volume de biogás produzido	58
6.1	Potencial total de produção de biogás na Região Sul e suas equivalências .	61
6.2	Volume de biogás produzido na Região Sul comparado ao potencial a ser explorado	61
6.3	Distribuição espacial do localização atual das plantas de biogás da região Sul e o potencial ao longo dos estados	62
6.4	Projeção de crescimento para plantas com produção de biogás - sul do Brasil	63
6.5	Volume de biogás produzido em comparação com o potencial a ser explorado na Região Sul, separado por estados e setores agropecuário e agroindústria	64
6.6	Projeção de crescimento para plantas com produção de energia elétrica - sul do Brasil	65
6.7	Suinocultura por regiões	66
6.8	Produção de carnes no Brasil de 2017 a 2021 (toneladas de carcaças) . . .	66
6.9	Ranking de Potencial de produção de biogás da suinocultura na Região Sul	67
6.10	Potencial especializado de produção de biogás da suinocultura nos estados do Sul do Brasil.	67
6.11	Potencial total de produção de biogás derivado da suinocultura na Região Sul e suas equivalências	68
6.12	Plantas avaliadas por estado da região sul.	69
6.13	Número total de plantas avaliadas por substrato na região sul.	69
6.14	Distribuição dos substratos utilizados nas plantas de biogás na região sul.	69
6.15	Origem da Tecnologia do Sistema de Biodigestão por Estado.	71
6.16	Modelos de biodigestores utilizados em plantas de biogás na Região Sul. .	72
6.17	Modelo do Biodigestor e substrato utilizado em plantas de biogás na Região Sul.	73
6.18	Uso geral e por tipos de sistemas de aquecimento em plantas de biogás na Região Sul.	73
6.19	Uso geral e por tipos de sistemas de agitação em plantas de biogás na Região Sul.	74
6.20	Uso geral e por tipos de sistemas de remoção de umidade em plantas de biogás na Região Sul.	75
6.21	Uso geral e por tipos de sistemas de remoção de sulfeto de hidrogênio em plantas de biogás na Região Sul.	75
6.22	Uso geral e por tipos de sistemas de remoção de dióxido de carbono em plantas de biogás na Região Sul.	76
6.23	Aplicações de uso do biogás em plantas de biogás na Região Sul.	76

7.1	Palavras-Chave utilizadas na estratégia de pesquisa bibliográfica inicial para início da AMC.	79
7.2	Dados utilizados dentro da AMC espacial de geoprocessamento e sua origem.	80
7.3	Declividade, em graus, na região sul do Brasil.	81
7.4	Localização dos corpos hídricos, em azul, na região sul do Brasil.	82
7.5	Localização das áreas urbanas, em vermelho, na região sul do Brasil.	83
7.6	Localização das linhas de transmissão de energia elétrica na região sul do Brasil.	84
7.7	Localização das estradas rodoviárias da região sul do Brasil.	85
7.8	Potencial de produção de biogás da suinocultura nos estados do Sul do Brasil.	86
7.9	Fluxograma da metodologia de análise espacial de geoprocessamento.	87
7.10	Parâmetros avaliados na modelagem espacial multicritério e origem dos dados.	88
7.11	Classificação de significância para conversão de valores dos rasters dos parâmetros.	88
7.12	Pesos de relevância atrelados a cada parâmetro de entrada da AMC.	88
8.1	Raio em relação ao sistema elétrico numa escala de amarelo/marrom, mais distante, para verde, mais perto.	92
8.2	Raio em relação à malha rodoviária numa escala de azul, mais distante, para vermelho, mais perto.	93
8.3	Raio em relação aos corpos hídricos numa escala de vermelho, mais distante, para azul, mais perto.	94
8.4	Dados reclassificados do raio de distância em relação às linhas de transmissão de energia elétrica na região sul do Brasil.	95
8.5	Dados reclassificados do raio de distância em relação às rodovias na região sul do Brasil.	96
8.6	Dados reclassificados do raio de distância em relação aos corpos hídricos na região sul do Brasil.	97
8.7	Dados reclassificados do raio de distância em relação às áreas urbanas na região sul do Brasil.	98
8.8	Índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.	99
8.9	Índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.	100

8.10	Potencial de produção de biogás, oriundo da suinocultura, dividido em Zonas Hot Spot, em vermelho, Zonas Cold Spot, em azul, e municípios não relevantes, em branco.	101
8.11	Sobreposição entre as zonas Hot Spot e o índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.	103
8.12	Sobreposição das zonas Hot Spot e o índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.	104
8.13	Localização das plantas de biogás que usam substratos agropecuários em relação ao índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, nas zonas Hot Spot da região sul do Brasil.	105

Lista de Símbolos

Unidades

GW Gigawatt

GWh Gigawatt-hora

Km Quilômetro

MW Megawatt

Nm Metro Cúbico Normal

ppm Partes por Milhão

Lista de Siglas e Abreviaturas

AMC Análise Multicritério. xi, xvi, 4, 7, 33, 34, 78–80, 88, 95

BEN Balanço Energético Nacional. 51, 52

BLC Biodigestor Lagoa Coberta. x, xiii, 22, 38, 39, 72–74

CSTR Continuous Stirred Tank Reactor. x, xiii, 23, 24, 38, 39, 72, 73

EPE Empresa de Pesquisa Energética. 50, 51

ETE Estação de Tratamento de Esgoto. 14, 55

GEE Gases de Efeito Estufa. 2, 11

GN Gás Natural. 7, 9, 29

GNR Gás Natural Renovável. 8–10, 56, 57

MME Ministério de Minas e Energia. 50, 51

PSA Pressure Swing Adsorption. 30, 75

RSU Resíduos Sólidos Urbanos. 14, 55

SIG Sistemas de Informação Geográficas. xi, 4–7, 32–34, 79, 80, 86

SIN Sistema Interligado Nacional. 60, 68

TRH Tempo de Retenção Hidráulica. 23, 25

UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket. x, xiii, 24, 25, 38, 39

1 Introdução

A utilização de energia sempre foi fundamental em grande parte das atividades humanas, especialmente na sociedade contemporânea [1]. Dentre os diversos tipos de energia, a eletricidade proporciona uma série de benefícios evidentes para a sociedade, como iluminação, dispositivos eletrônicos (computadores, televisores, rádios, etc.) e maquinários industriais. Contudo, a energia derivada de combustíveis é igualmente essencial para viabilizar outras atividades, como o transporte, seja para fins recreativos, profissionais ou outros, por intermédio de meios coletivos ou individuais. No entanto, a complexidade dessa questão emerge quando consideramos os fatores ambientais envolvidos no ciclo de geração e distribuição de energia até chegar ao consumidor [2]. As fontes de energia presentes na natureza, em seu estado bruto, são classificadas como "energia primária" e, por meio de processos de conversão, são transformadas em "energia final". Como exemplo, em uma usina hidrelétrica, a energia cinética do movimento das águas (energia primária) é convertida em energia elétrica (energia final), que é a forma de energia útil demandada pela sociedade. O desenvolvimento de técnicas que permitiram a extração de energia da natureza desempenhou um papel crucial na trajetória das nações no mundo moderno. Nações que conseguiram desenvolver e explorar essas técnicas se tornaram pioneiras no processo de industrialização, enquanto aquelas que não investiram nesse setor ficaram atrasadas em relação às demais, prejudicando todo o tecido social. Indubitavelmente, existe uma relação intrínseca entre o uso de energia e o progresso econômico-social [2]. No entanto, a dinâmica da relação entre energia e desenvolvimento exerce uma pressão substancial sobre o meio ambiente [1]. O próprio processo de geração de energia gera um impacto, em maior ou menor grau, no ambiente, pois a extração de recursos naturais acarreta o risco de esgotamento de recursos, danos à fauna e à flora, além da produção de resíduos [3]. A busca por fontes de energia com menor impacto ambiental se torna imperativa para sustentar o progresso e estabelecer um equilíbrio saudável entre a humanidade e a natureza.

As fontes de energia podem ser categorizadas em duas grandes classes: não renováveis e renováveis. As fontes consideradas não renováveis são compostas pelas fontes fósseis de energia, como o petróleo e o carvão mineral, que derivam da acumulação de matéria orgânica proveniente de organismos que ao longo do tempo se depositaram no subsolo terrestre. São denominadas assim devido à sua reposição exigir um grande horizonte de

tempo geológico, conforme apontam [4]. Dentre as fontes energéticas fósseis (não renováveis), destaca-se o petróleo como uma das mais amplamente utilizadas. Entretanto, a dependência dessas fontes tem desencadeado uma preocupação global sobre os gases poluentes liberados na atmosfera, sobretudo os Gases de Efeito Estufa (GEE), com destaque para o dióxido de carbono (CO_2), conforme ressaltado por [5]. Já as fontes de energia renováveis são aquelas que se regeneram imediatamente pela natureza, como os potenciais hidráulicos provenientes de quedas d'água, a energia eólica gerada pelo vento, a radiação solar e as biomassas. Um exemplo dentro das fontes renováveis é o biogás, foco deste estudo, que é derivado da biomassa, composta especialmente de resíduos orgânicos.

É relevante notar que o CO_2 é um componente natural da atmosfera terrestre, compreendendo cerca de 0,04% do ar atmosférico. Sua produção também resulta da atividade metabólica de diversos organismos, incluindo seres humanos, sendo absorvido por seres fotossintéticos. Os processos químicos, físicos, biológicos e geológicos que regem a transferência de CO_2 entre distintos reservatórios naturais constituem o ciclo do carbono, como mencionado por [6]. O aumento das emissões antropogênicas de CO_2 , sobretudo provenientes da queima de combustíveis fósseis, tem perturbado o equilíbrio do ciclo, resultando no acúmulo anual de aproximadamente 17 bilhões de toneladas de CO_2 na atmosfera, valor médio anual para o período 2006 a 2015 [7]. Esse acúmulo ocorre porque os mecanismos naturais não têm a capacidade de reverter o acréscimo rápido de CO_2 na atmosfera, dado que as emissões de origem humana se acumulam a um ritmo muito mais rápido do que os processos naturais de remoção. Esse cenário de alterações na composição atmosférica, manifestado em mudanças climáticas, tem suscitado uma preocupação crescente e busca por fontes alternativas de energia por parte da sociedade. O objetivo é reduzir as emissões de CO_2 , por meio de um processo de "descarbonização" no contexto energético, que implica na substituição das fontes fósseis de energia por fontes de menor intensidade de carbono ou fontes renováveis [6].

Diante das complexidades associadas às fontes de energia fósseis, o conceito de transição energética tem sido amplamente disseminado. Segundo [8], o termo consiste em um processo de transformações em direção a uma economia de baixo carbono e menor pegada ambiental. Nesse sentido, o uso das fontes de energia renováveis está em constante crescimento, ocupando uma parcela cada vez maior na matriz energética global. Em 2021, por exemplo, as fontes renováveis representaram 14,1% do total de fontes energéticas. O Brasil desfruta de uma vantagem competitiva singular em comparação a outras nações devido ao seu vasto potencial em geração de energia a partir de fontes renováveis [9].

De fato, até o término de 2021, 44,8% da matriz energética brasileira consistia em fontes renováveis, o que fez do país líder mundial em matriz energética predominantemente renovável na esfera industrial, enquanto a média mundial estava situada em torno de 15%, composta por fontes renováveis [3].

Dentre as fontes renováveis que se destacam atualmente no Brasil estão a biomassa da cana, a energia hidráulica, a lenha e o carvão vegetal. O biogás ainda não ocupa um lugar relevante na matriz energética brasileira, correspondendo a apenas 0,12% em 2021. Até aquele ano, apenas 3% do vasto potencial do país para produção de biogás estava sendo explorado [10]. Porém, desde 2017, houve um crescimento considerável no número de instalações de produção de biogás, culminando em um aumento expressivo na geração de biogás para fins energéticos [11].

O biogás é uma mistura gasosa que consiste principalmente de CO_2 e metano (CH_4), com traços de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), além de conter vapor d'água. Sua produção ocorre mediante a decomposição anaeróbia de materiais orgânicos [12], possibilitando a utilização de resíduos orgânicos de diversos setores industriais como matéria-prima.

Do ponto de vista ambiental, o uso do biogás é altamente vantajoso, pois reduz emissões de carbono e de metano, um gás de efeito estufa, que seria liberado na atmosfera caso os resíduos não fossem aproveitados. Vale ressaltar que o metano é 21 vezes mais impactante do que o CO_2 em termos de contribuição para o aquecimento global [13].

O biogás possui flexibilidade de uso, podendo ser transformado em biometano, injetado na rede de gás natural ou empregado para produção de calor e eletricidade [14]. Além de suas aplicações energéticas, o biogás possui potencial como matéria-prima para a produção de bioprodutos, como biometanol, ácido acético e polímeros biodegradáveis. Os resíduos resultantes da produção de biogás, sejam sólidos ou efluentes, também podem ser utilizados como biofertilizantes [15]. Enquanto que o biogás é proveniente da decomposição biológica de materiais orgânicos ou resíduos, o biometano é um combustível gasoso de origem biológica composto principalmente por metano, obtido por meio do processo de purificação do biogás [16].

Um aspecto econômico importante relacionado ao biogás é a sua previsibilidade quanto ao preço, uma vez que seu valor é estabelecido localmente, não dependendo das flutuações do dólar ou dos preços internacionais. [10].

O surgimento de políticas públicas, decretos e leis voltados para a promoção da geração e aproveitamento do biogás tornou-se relevante a partir de 2011. Um exemplo notável é o Programa Metano Zero [17], sancionado em maio de 2022, que estimula a produção de biogás para ser utilizado como biocombustível.

O estudo do biogás é motivado por diversos fatores, destacando-se a ampla gama de aplicações energéticas (geração de eletricidade, calor, biocombustível e injeção na rede de gás natural), sua crescente participação na matriz energética brasileira, as oportunidades ainda pouco exploradas, como o aproveitamento de aterros, resíduos orgânicos e estações de tratamento de água e esgoto, e os benefícios resultantes de sua utilização (redução das emissões de CO_2 e CH_4 , bem como a geração de subprodutos ecologicamente benéficos).

Aplicações, a exemplo da utilização de resíduos de saneamento, são de grande im-

portância para a produção de biogás no Brasil por várias razões. Primeiramente, eles representam uma fonte sustentável de energia, uma vez que lodo de esgoto e resíduos orgânicos de tratamento de águas residuais são matérias-primas abundantes e renováveis que podem ser convertidas em biogás, somado a isso eles são mais constantes e previsíveis em termos de disponibilidade e composição, ao contrário de resíduos agrícolas ou industriais que podem variar sazonalmente ou conforme a atividade econômica. Tal fator permite um fornecimento contínuo e estável de matéria-prima para a produção de biogás, melhorando a eficiência dos processos de digestão anaeróbica.

Isso contribui para a diversificação da matriz energética do país, promovendo uma fonte de energia mais limpa e sustentável. Além disso, a utilização de resíduos de saneamento para produção de biogás ajuda a mitigar o impacto ambiental associado à disposição inadequada desses resíduos. Dessa forma a digestão anaeróbica não apenas reduz a quantidade de resíduos que precisam ser descartados em aterros sanitários, mas também minimiza a emissão de gases de efeito estufa, como metano, que seriam liberados durante a decomposição natural.

Diante dessa série de vantagens associadas ao biogás, surge a necessidade de identificar localizações geográficas propícias para o desenvolvimento de arranjos produtivos para instalação de plantas de produção de biogás, analisando a proximidade com grandes unidades geradoras de matéria orgânica e infraestrutura para escoamento da matéria orgânica e para a distribuição da energia gerada a partir da combustão do gás em modelo *Gas-to-Wire*. Essa busca por localizações aliada com a prospecção de tecnologias mais proeminentes e que podem ser aplicadas em unidades geradoras de biogás poderiam impulsionar um aumento no potencial de produção nacional de biogás.

1.1 Estrutura do Trabalho

Além do capítulo introdutório e de objetivos, neste trabalho será abordado, no capítulo 3, a fundamentação teórica, primeiramente características do biogás como fonte de energia, origens e processos para o pré-tratamento, produção e purificação do biogás, além de fatores operacionais que podem afetar os processos ao longo da cadeia produtiva. Em segundo lugar, ainda no mesmo capítulo, será abordado a definição de SIG e o processo de Análise Multicritério (AMC) dentro do *software*. Em sequência, será abordado a definição de pesquisa bibliográfica e patentária, e como elas possibilitam a visualização da evolução das indústrias.

Para melhor entendimento da produção de biogás no contexto nacional, no capítulo 5 denominado “Panorama Geral do Biogás Brasil” é exibida a participação do biogás na matriz energética nacional, dados acerca da produção de biogás e das unidades produtoras (porte, fonte de substrato, aplicação energética, localização) no país.

Em sequência, no capítulo 6 denominado “Área de Estudo - Região Sul” será ex-

plorado o motivo da escolha da região como foco das análises realizadas neste trabalho, somada a visualização do cenário produtivo de biogás e de eletricidade oriunda da combustão desta fonte de energia na região englobando tanto os diferentes substratos passíveis de utilização quanto o substrato energético de enfoque da pesquisa, os efluentes da indústria da suinocultura. Somado a isso, será abordado ainda no mesmo capítulo, o panorama tecnológico das unidades de produção de biogás na Região Sul do país, acerca das tecnologias utilizadas nas etapas de pré-tratamento, produção e purificação do biogás, além das principais aplicações energéticas.

No capítulo 7, será abordada a metodologia utilizada neste trabalho para a análise multicritério realizada em *software* SIG, somada à metodologia feita para a prospecção tecnológica por meio de pesquisa bibliográfica e patentária. Para as duas metodologias, serão elencados as fontes dos dados, estratégias de pesquisa e funções no *software* SIG utilizadas.

No capítulo 8, são elencados os resultados obtidos de cada metodologia empregada, em formato de mapas e gráficos, somado à descrição dos resultados.

No capítulo 9, denominado “Considerações Finais e Conclusões”, é realizada uma análise dos resultados obtidos no capítulo anterior, de forma a compreender e debater o cenário atual e futuro da indústria de biogás na Região Sul, além de possíveis áreas de maior investimento pela iniciativa privada e pública. Somado a isto, o capítulo irá tratar de compreender quais os principais países e empresas que vem atuando na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e patentes atreladas, assim como o futuro da indústria e possibilidade novas pesquisas.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo principal a identificação de localizações geográficas para a instalação de unidades geradoras de biogás por intermédio de softwares Sistemas de Informação Geográficas (SIG), levando em conta parâmetros como distância a zonas geradoras de matéria orgânica advinda de efluentes da suinocultura, infraestrutura de transporte, infraestrutura de transmissão de energia, distância a uso de solo específicos, como zonas urbanas e corpos hídricos, e declividade e avaliar o panorama das tecnologias envolvidas na produção e purificação de biogás.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentro desse objetivo geral, encontram-se como metas específicas:

1. Analisar o panorama geral do biogás no Brasil, e mais especificamente na região Sul debatendo pontos como: participação na matriz energética, cenário produtivo, potencial de produção, plantas em operação e como estas se distribuem em relação ao porte, substrato, aplicação e localização no território brasileiro.;
2. Identificar e analisar localizações geográficas prioritárias para instalação de novas unidades produtoras de biogás.;
3. Mapear tecnologias de tratamento anaeróbio de matéria orgânica e de purificação de biogás.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordadas as definições das diferentes fontes de energia que o biogás se assemelha, como o gás natural e o biometano; aplicações e vantagens das fontes de energia; cadeia produtiva, rotas tecnológicas e possíveis substratos das unidades de produção de biogás; modelos de reatores e tecnologias para o pré-tratamento, produção e purificação de biogás; fatores que influenciam na produção de biogás; geoprocessamento e SIG; AMC em SIG; prospecção tecnológica e análise prospectiva por meio de pesquisa bibliográfica e patentária.

3.1 BIOGÁS, GÁS NATURAL E BIOMETANO

A digestão anaeróbia de materiais orgânicos, um processo que ocorre na ausência de oxigênio e é mediado por um consórcio microbiano composto por bactérias e arqueas, resulta na produção de uma mistura gasosa. Essa mistura é composta principalmente por metano (CH_4), que corresponde a 60% a 85% do volume, além de dióxido de carbono (CO_2). Pequenas quantidades de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), oxigênio (O_2) e água (H_2O) também estão presentes em menor quantidade [12].

Quando essa mistura gasosa é obtida a partir da decomposição anaeróbia de matéria orgânica fóssil, ou seja, restos de plantas e animais que se acumularam ao longo de milhões de anos no leito de lagos e mares, ela é conhecida como gás natural. O Gás Natural (GN) é encontrado em formações rochosas porosas na natureza, em bolsões de gás, e é considerado um "combustível de transição". Embora de origem fóssil, ele é mais limpo em comparação com outras fontes derivadas do petróleo, devido à sua menor intensidade de carbono [11], conceito cunhado para medir a quantidade de dióxido de carbono emitida em todas as etapas de um ciclo de vida de energia, por unidade de energia relativa a um ano específico. É calculada considerando as emissões envolvidas na produção, transporte e consumo de energia, incluindo as emissões associadas à fabricação de equipamentos e à construção das unidades produtoras [3]. Na Figura 3.1, é possível verificar um resumo comparativo das características entre biogás e GN.

Figura 3.1: Diferenças entre os gases combustíveis.

Condição	Biogás	Gás Natural
Pontos de produção	Inúmeros	Único
Pontos de consumo	Único	Inúmeros
Demanda	Produção	Consumo
Variável de dimensionamento	Pressão	Vazão

Fonte: CIBiogás, 2021 .

Por outro lado, o biogás é produzido quando a matéria orgânica decomposta provém de biomassas cultivadas (como milho, beterraba, soja, grãos de cereais, etc.) ou de resíduos e efluentes orgânicos provenientes de atividades industriais, humanas, agropecuárias e agroindustriais. O biogás é formado a partir do ciclo de material orgânico presente na superfície terrestre, tornando-se assim uma fonte de energia renovável e um biocombustível.

A geração de biogás pode ocorrer na natureza, como em lixões, ou por meio de um processo controlado em reatores químico-biológicos chamados de biodigestores anaeróbios. Esses reatores mantêm condições como temperatura, umidade, acidez e ausência de oxigênio, propícias para a ação dos micro-organismos [18].

A proporção de cada gás presente no biogás pode variar de acordo com a matéria orgânica digerida e o tipo de biodigestor utilizado [18]. Essas variações também podem resultar em pequenas diferenças nas propriedades do biogás, mas geralmente mantêm-se dentro de uma faixa[19], como exemplificado na Figura 3.2. Ademais, o tratamento e purificação do biogás resultam no biometano, também conhecido como Gás Natural Renovável (GNR), que possui um teor de metano entre 94% e 99% [20].

Figura 3.2: Principais propriedades do biogás.

<i>Parâmetro</i>	<i>Faixa</i>	<i>Unidade</i>
Poder Calorífico	4000 - 5000	kcal/m ³
Densidade	1,19 - 1,21	kg/m ³
Temperatura de Ignição	650 - 750	°C
Limite de Explosividade	4,4 - 16,5	%v/v

Fonte: Adaptado de Poblete, 2019.

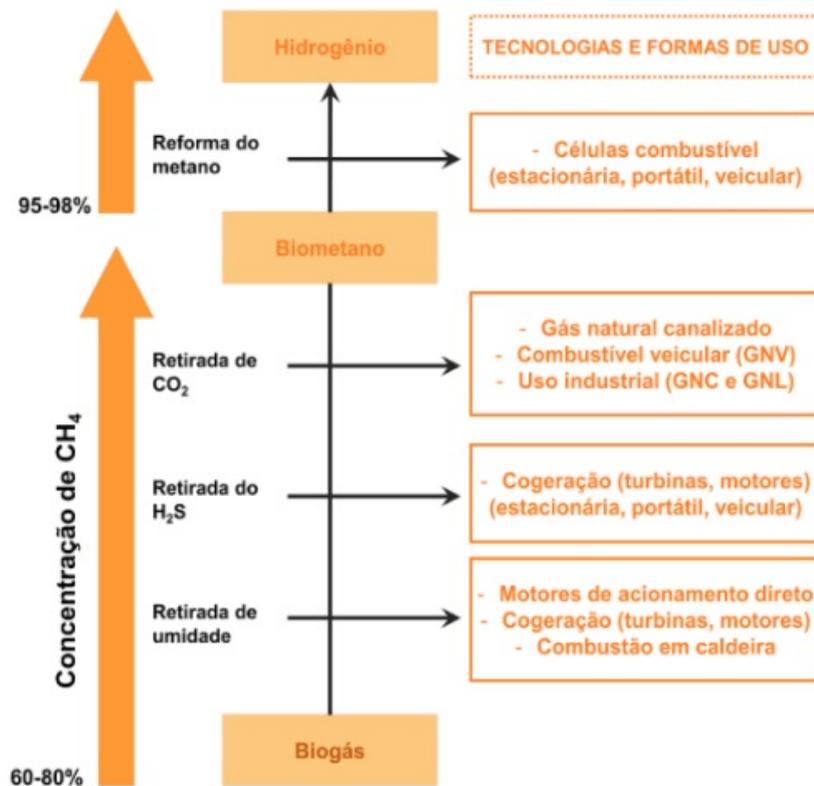
Em relação ao biometano, utiliza-se [16] as seguintes definições:

- **Biogás:** gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos;

- **Biometano:** biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás.

Além de provirem de fontes distintas, esses gases apresentam claras diferenças em termos de composição química. Para ser reconhecido como biometano (GNR), por exemplo, o gás deve conter níveis específicos de determinados componentes, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) [16], e ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Hierarquia de remoção de impurezas do biogás de acordo com a aplicação energética desejada.



Fonte: CIBiogás, 2022 .

Em contraste, a composição do biogás não é regulamentada em termos de limites máximos e mínimos, pois ela está diretamente relacionada à sua origem. Importante notar que o biometano (GNR) é similar em características ao GN [16], e pode ser intercambiável com o GN em todas as suas aplicações, requerendo os mesmos cuidados, na compressão, distribuição e revenda, devendo atender algumas especificações, de acordo com sua origem, para que possa ser produzido e comercializado em território nacional. Por outro lado, o biogás não possui regulamentações específicas, o que torna difícil a padronização de materiais, equipamentos e critérios a serem adotados em projetos relacionados a esse gás.

Em relação ao uso, se a intenção é comercializar biometano (GNR) no mercado nacional, seja para uso em veículos ou em instalações residenciais, comerciais e industriais,

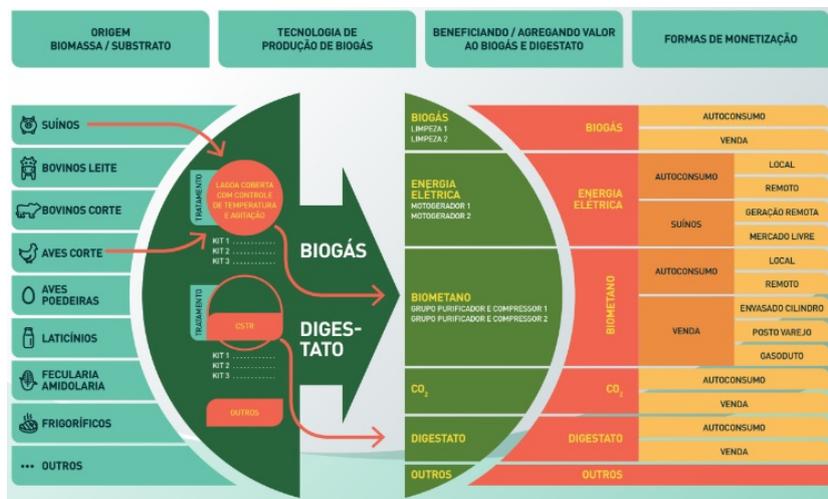
é fundamental que o gás atenda aos padrões de qualidade estabelecidos [16, 21] . O biometano (GNR) precisa manter concentrações controladas de impurezas que poderiam prejudicar os equipamentos, tais como sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono, água, siloxanos e compostos orgânicos voláteis. Por outro lado, no caso do biogás, a necessidade de remover esses componentes varia de acordo com a aplicação, seja para produção de energia elétrica, térmica ou a obtenção de biometano. A escolha do método mais apropriado para tratar e purificar o biogás depende de fatores como a sua composição, volume de produção, continuidade da geração, condições específicas da planta e o uso pretendido, seja na geração de energia térmica, elétrica ou na produção de GNR.

3.2 CADEIA DE VALOR DO BIOGÁS

O biogás é um combustível altamente versátil, com possibilidades de aplicação abrangendo a geração de energia elétrica, térmica e mecânica. Sua queima direta em fornos, caldeiras ou câmaras de turbinas a gás produz calor para uma variedade de processos. Quando utilizado em motores de combustão interna, ele se converte em energia mecânica ou elétrica [14].

Devido a essa flexibilidade, o biogás encontra aplicações em diversos setores, incluindo industrial, comercial, residencial e agropecuário. Ele também pode ser injetado nas redes de gás natural e ser utilizado como combustível veicular na Indústria Automotiva, sob a forma de biometano. A Figura 3.4 ilustra a versatilidade das origens, possíveis beneficiamentos e formas de monetização do biogás, biometano e digestato. Entretanto, é importante observar que, dependendo do uso específico, é necessário submeter o biogás a um processo de tratamento e purificação para remover componentes que possam prejudicar a aplicação ou os equipamentos.

Figura 3.4: Cadeia de valor do Biogás.



Fonte: CIBiogás, 2022 .

Além das aplicações energéticas, o biogás também possui potencial como matéria-prima na produção de bioprodutos, como metanol, ácido acético e polímeros biodegradáveis. Além disso, a produção de biogás gera como subproduto o digestato, um resíduo líquido ou sólido do processo de digestão anaeróbia. O digestato é rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, podendo ser utilizado como biofertilizante, dependendo das características do solo e das exigências da legislação ambiental. Esse biofertilizante contribui para a fertilização do solo e a nutrição das plantas, sendo uma alternativa econômica para os agricultores [22].

O biogás não apenas oferece uma ampla gama de usos energéticos, mas também apresenta diversas vantagens em comparação com outras fontes de energia. Ele desempenha um papel importante na redução das emissões de GEE, ao interiorizar o metano, seu principal componente, que tem impacto maior que o CO_2 em termos de efeito estufa [10]. Além disso, o uso do biogás pode ter benefícios sanitários, ajudando a resolver problemas de saúde pública relacionados a resíduos humanos e animais. Em processos de digestão anaeróbia, dois produtos são gerados inseparavelmente: o biogás e o digestato, este último um efluente rico em nutrientes que pode ser usado como biofertilizante. A valorização de resíduos é uma característica inerente à produção de biogás, abrangendo todas as etapas do processo.

O processo de produção de biogás ocorre por meio das etapas a seguir, exemplificadas na Figura 3.5.

- Seleção da fonte de matéria orgânica que será utilizada como matéria-prima.
- Pré-tratamento: Nesta fase, a matéria-prima é preparada antes de ser direcionada para os biodigestores.
- Digestão Anaeróbia: Esta etapa é o núcleo do processo, onde a matéria orgânica é decomposta anaeróbiamente em biodigestores, resultando na liberação do biogás.
 - A digestão anaeróbia, como qualquer processo, não é 100% eficiente, o que significa que nem toda a matéria orgânica inserida no processo é convertida em biogás. A fração restante, que permanece no biodigestor ou é liberada como efluente, é denominada digestato, podendo ser reutilizada.
- Tratamento e purificação do biogás: Enquanto o biogás bruto que sai do biodigestor pode estar adequado para alguns usos, para outros é necessário eliminar umidade e gases indesejados de sua composição.

Figura 3.5: Etapas da produção de biogás.



Fonte: DATASEBRAE, 2022 .

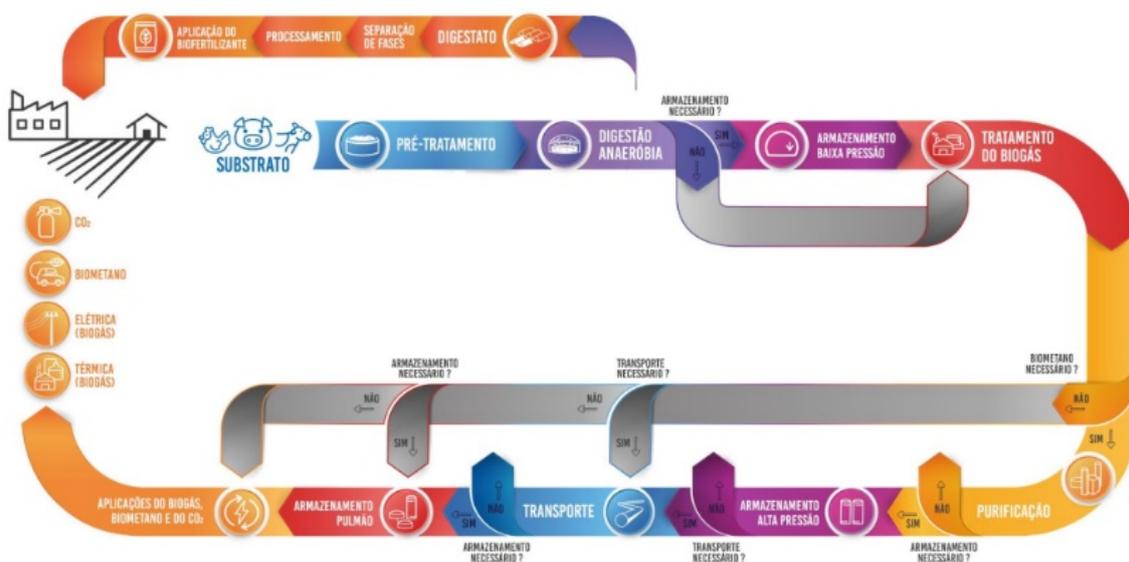
A sequência dessas etapas permite a produção eficiente e controlada do biogás, transformando a matéria orgânica em uma fonte valiosa de energia e subprodutos [23].

3.2.1 Rotas tecnológicas de plantas de biogás

As unidades dedicadas à produção de biogás adotam diversos arranjos físicos e tecnológicos, que influenciam o processo. Independentemente de se adequarem a essas configurações específicas, a geração de biogás e digestato pode envolver etapas como o pré-tratamento da biomassa, a biodigestão anaeróbia, o tratamento e a purificação do biogás, além da utilização de energia e a gestão da biomassa, tudo de acordo com a estratégia de mercado da planta. A seleção de equipamentos e procedimentos varia conforme fatores como o tipo de biomassa usada, a finalidade da energia produzida, o investimento disponível e o espaço disponível para a instalação da unidade.

Apesar das diferenças entre as unidades produtoras, várias etapas são comuns a todas elas e são implementadas de forma sequencial. A Figura 3.6 ilustra as etapas de uma planta de produção e aplicações do biogás, onde é possível identificar e determinar as etapas, equipamentos, produtos e serviços que precisam ser implementados.

Figura 3.6: Diagrama simplificado de produção e aplicações para plantas de biogás.



Fonte: MCTI et al. (2021) .

3.2.2 Fontes e tipos de resíduos

A produção de biogás resulta da degradação anaeróbica de matéria orgânica, permitindo que qualquer fonte de material orgânico suscetível à biodegradação possa ser utilizada como matéria-prima para essa produção. Assim, é viável o cultivo e uso de biomassas dedicadas, como milho e beterraba, por exemplo, para essa finalidade. No entanto, esse enfoque enfrenta dois principais dilemas:

- **Competitividade com a Indústria Alimentícia:** As biomassas dedicadas frequentemente são essenciais para o consumo alimentar, o que gera uma competição intensa pela utilização dessas matérias-primas em outros setores. Um exemplo marcante é o setor sucroenergético, que utiliza a cana-de-açúcar tanto para a produção de etanol de primeira geração quanto para a produção de açúcar.
- **Preservação da fauna e flora:** É provável que as áreas de terra atualmente destinadas ao cultivo de biomassas dedicadas não sejam suficientes para suprir as demandas dos setores alimentício e energético. O dilema emerge da necessidade de desmatar para estabelecer novas áreas de cultivo, o que contradiz o propósito de gerar um produto que visa minimizar os impactos negativos no meio ambiente.

Por outro lado, diversos resíduos resultantes de atividades humanas e industriais contêm alta quantidade de matéria orgânica biodegradável. O descarte inadequado desses resíduos acarreta prejuízos ambientais, sociais e econômicos. Por exemplo, efluentes líquidos com elevada carga orgânica lançados em corpos d'água sem tratamento adequado aumentam a carga orgânica no corpo receptor, reduzindo os níveis de oxigênio dissolvido

e prejudicando a biodiversidade aquática [24]. Portanto, tratamentos prévios são essenciais para reduzir a carga orgânica antes do descarte.

Esses resíduos constituem oportunidades valiosas para serem utilizados como matérias-primas na produção de biogás. Isso não apenas possibilita a valorização dos resíduos, dando-lhes um propósito, mas também contribui para a despoluição e a geração de energia por meio do biogás. Os principais resíduos empregados na produção de biogás serão discutidos a seguir.

3.2.2.1 Saneamento

O saneamento é um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações necessárias para garantir o abastecimento de água, esgotamento e tratamento adequado dos resíduos sólidos e esgotos [25]. Nesse contexto, surgem dois potenciais substratos para a produção de biogás: os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e os esgotos sanitários. A destinação adequada é essencial para evitar impactos ambientais [26].

Os RSU, também chamados de resíduos sólidos municipais, são provenientes de atividades nas áreas urbanas, resultantes das ações cotidianas das comunidades. Esses resíduos englobam diversos tipos, como resíduos residenciais, comerciais, industriais, de serviços de saúde e de limpeza pública, entre outros [27]. Cerca de 50% dos RSU gerados são compostos por materiais orgânicos, passíveis de serem submetidos à biodigestão para a produção de biogás [13]

Por sua vez, os esgotos sanitários, conforme a norma NBR 9648 [28], abrangem os despejos líquidos constituídos por:

- Esgotos domésticos: resultantes do uso de água para higiene e necessidades humanas.
- Esgotos industriais: decorrentes dos processos industriais.
- Água de infiltração: proveniente do subsolo e que penetra nas canalizações.
- Contribuição pluvial parasitária: parte do escoamento superficial absorvida pela rede de esgoto sanitário.

Os esgotos sanitários, ao menos em parte, são coletados e tratados em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por meio de processos anaeróbios. Embora uma parte importante do biogás gerado nessas estações seja queimada, seu aproveitamento pode reduzir os custos energéticos do sistema e até gerar receita adicional para unidades de grande porte [13].

3.2.2.2 Resíduos da Agropecuária

As atividades agropecuárias, como suinocultura, pecuária e avicultura, resultam na geração de resíduos orgânicos de origem animal, que podem consistir em dejetos/fezes ou partes não consumíveis dos animais.

No contexto brasileiro, a agropecuária ocupa uma posição de destaque nas atividades econômicas, contribuindo com cerca de 21% do Produto Interno Bruto (PIB) e sendo responsável por aproximadamente um terço dos postos de trabalho do país. Embora esse setor tenha um impacto econômico relevante, também é reconhecido como um dos principais geradores de resíduos e emissões de gases de efeito estufa [10]. Por essa razão, existe um forte incentivo por parte dos governos, incluindo o do Brasil, para a utilização adequada dos resíduos provenientes da agricultura, a fim de evitar a poluição ambiental decorrente do descarte inadequado [26].

Dentre os resíduos provenientes da agropecuária que podem ser aproveitados na produção de biogás, merecem destaque os esterco, especialmente o esterco de suínos. Isso ocorre devido à sua capacidade de produção mais elevada de biogás a partir de 1 tonelada de substrato, em comparação com outros tipos de esterco.

Assim, será abordado neste trabalho o uso de esterco suíno destinado a produção de biogás.

3.2.2.3 Suinocultura

A indústria da suinocultura, possui grande potencial para a exploração de biogás originado dos resíduos dos animais, com maior geração de dejetos diariamente e maior proporção de biogás por quilograma de dejetos, comparado aos animais de outras indústrias [29], como pode ser evidenciado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Características de geração de dejetos oriundos de diferentes espécies animais e de geração de biogás e metano.

Origem do Material	[kg esterco/(dia.unidade geradora)]	(kg biogás/ kg esterco)	Concentração de Metano
Suínos	2,25	0,062	66%
Bovinos	10	0,037	60%
Equinos	12	0,048	60%
Aves	0,18	0,055	60%
Abatedouro	1,0	0,100	55%

Fonte: MOTTA, 1986.

A suinocultura tem particularidades que possibilitam uma rápida adoção do aproveitamento de biogás para complementação energética e financeira das produções, tais como:

- Maior Relação de kg Biogás/kg Esterco [29];
- Maior Concentração de Metano[29];

- Criação em galpões, facilitando a coleta dos dejetos
- O Brasil é o 4º maior produtor de suínos no mundo [30].

3.2.2.4 Resíduos da agroindústria de transformação

A agroindústria de transformação engloba um conjunto de atividades voltadas para a conversão de matérias-primas agrícolas em produtos de maior valor agregado, envolvendo o processamento de produtos provenientes da agricultura. Essa abordagem promove o aprimoramento e valorização de plantas ou partes delas, eliminando as fronteiras tradicionais entre as esferas rurais e industriais.

Diversos processos de beneficiamento são realizados por agroindústrias de destaque [31], incluindo:

- Transformação do malte para a fabricação de cerveja;
- Processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e/ou etanol;
- Conversão da soja para a produção de biodiesel;
- Refino da batata para a obtenção de amido;
- Processamento de frutas para a produção de sucos e vinhos;
- Extração de óleos vegetais a partir de plantas.

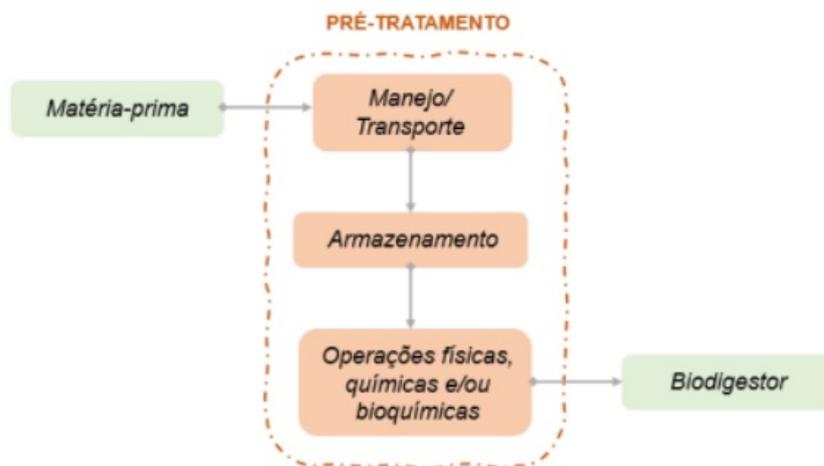
Essas atividades industriais geram resíduos orgânicos, principalmente devido às partes não utilizadas das culturas, como cascas, polpas, bagaços e palhas. Além disso, os subprodutos resultantes dos próprios processos de transformação, como melaço, tortas de filtro, grãos destilados, águas residuais e glicerol bruto, também contribuem para essa geração de resíduos [26].

Esses resíduos têm o potencial de causar impactos ambientais importantes, incluindo a contaminação do solo, a poluição da água e até a propagação de doenças, caso sejam descartados de maneira inadequada. Diante desse cenário, a utilização desses resíduos na produção de biogás surge como uma estratégia altamente vantajosa.

3.2.3 Pré-tratamento

A fase inicial de preparação engloba tanto o transporte e o armazenamento dos substratos quanto intervenções físicas, químicas e/ou bioquímicas necessárias para viabilizar a entrada desses resíduos no biodigestor. Isso envolve procedimentos como trituração, diluição, homogeneização e hidrólise, entre outros processos (ver Figura 3.9).

Figura 3.8: Etapa de pré-tratamento que antecede a decomposição do substrato.



Fonte: Produzido pelo Autor.

A natureza e a extensão do pré-tratamento que a matéria-prima requer são influenciadas tanto pela sua origem quanto pela sua composição.

3.2.4 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é responsável por transformar a matéria orgânica biodegradável presente nas biomassas residuais em biogás. A reação fundamental é representada pela Equação 3.1



Esse processo pode ser subdividido em duas fases: a fase fermentativa e a fase metanogênica.

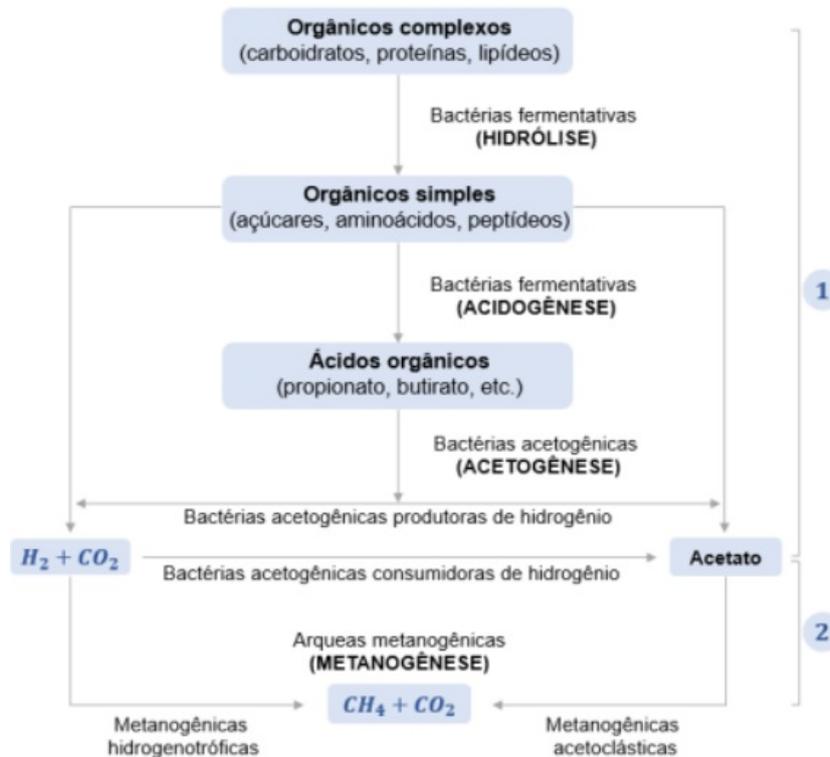
Na fase fermentativa, as bactérias fermentativas hidrolíticas e acidogênicas desempenham um papel essencial. Elas convertem os compostos orgânicos complexos em compostos mais simples, como ácidos orgânicos voláteis, CO_2 , H_2 , entre outros. Os ácidos orgânicos resultantes são então transformados em ácido acético (CH_3COOH), CO_2 e H_2 pelas bactérias acetogênicas.

Na fase metanogênica, que é a etapa final do processo de degradação anaeróbia, as arqueas metanogênicas entram em ação. Esses microrganismos anaeróbios convertem os produtos da fase anterior, principalmente o ácido acético, em metano (CH_4) e CO_2 [32]. Esse estágio é crucial para a produção de biogás.

O processo de degradação anaeróbia pode ser dividido em quatro fases principais, como explicitado na Figura 3.9, cada uma com suas transformações específicas:

Figura 3.9: Processo de digestão anaeróbia.

1 - Fase Fermentativa, 2 - Fase Metanogênica.



Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 1997.

- **Hidrólise:** Nessa fase, as bactérias fermentativas hidrolíticas (*Clostridium spp*, *Bacteroides spp*, e.g) transformam a matéria orgânica complexa em compostos mais simples por meio de enzimas extracelulares.
- **Acidogênese:** Os produtos solúveis provenientes da hidrólise são metabolizados pelas bactérias fermentativas acidogênicas (*Clostridium spp*, *Bacteroides spp*, *Propionibacterium spp*, *Enterococcus spp*, e.g) gerando ácidos orgânicos. Essa fase é caracterizada por um ambiente ácido.
- **Acetogênese:** Os produtos da acidogênese são convertidos em ácidos de menor cadeia pelas bactérias fermentativas acetogênicas (*Clostridium spp.*, *Acetobacterium spp.*, *Syntrophomonas spp.*, *Megasphaera spp.*, e.g), as quais preparam o substrato para a atuação das arqueas metanogênicas na fase seguinte.
- **Metanogênese:** Nessa fase final, as arqueas metanogênicas (*Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*) convertem compostos orgânicos em metano e CO_2 . Existem dois grupos principais de arqueas metanogênicas: as hidrogenotróficas, que produzem metano a partir de hidrogênio e CO_2 , e as acetoclásticas, que são predominantes e produzem metano a partir de ácido acético ou metanol.

A fase de metanogênese é crucial e determinante para a produção de biogás, mas sua taxa é limitada pelo crescimento lento das arqueas metanogênicas e pela disponibilidade limitada de substratos [32]. Portanto, o monitoramento do pH é fundamental para manter a eficiência da digestão anaeróbia e evitar possíveis falhas no processo.

3.2.5 Biodigestores

O processo de digestão anaeróbica é realizado em equipamentos herméticos e impermeáveis chamados biodigestores, que são projetados para promover a fermentação anaeróbia da matéria orgânica, resultando na produção de biogás e digestato como subproduto. Vale ressaltar que a produção de biogás também ocorre naturalmente em ambientes como zonas úmidas, sedimentos de lagos, campos de arroz e até mesmo no estômago de ruminantes [33]. Isso acontece devido à presença de matéria orgânica junto a micro-organismos ativos na degradação. No entanto, em alguns casos, especialmente no início do processo do biodigestor, a adição de um inóculo é necessária para estimular a fermentação, além do próprio substrato.

O inóculo é uma suspensão contendo um consórcio microbiano capaz de realizar a degradação anaeróbica, sendo adicionado em concentração apropriada para impulsionar o início da fermentação. O próprio dejetos bovinos pode servir como inóculo, já que o rúmen de bovinos age como um biodigestor em miniatura, abrigando os micro-organismos necessários ao processo [33].

Os microorganismos adicionados ao biodigestor precisam de um tempo para se adaptar ao novo substrato e ambiente, o que é crucial para alcançar a estabilidade do processo. Para iniciar o processo rapidamente, é recomendado usar como inóculo um material retirado de um processo em andamento, para começar com uma comunidade microbiana adaptada ao substrato e às condições semelhantes [33].

Em geral, os biodigestores são compostos por um reservatório para armazenamento e fermentação da biomassa, juntamente com um gasômetro para armazenar o biogás produzido [34]. Podem ser classificados em dois tipos principais de acordo com a forma de operação: batelada e contínuo [33].

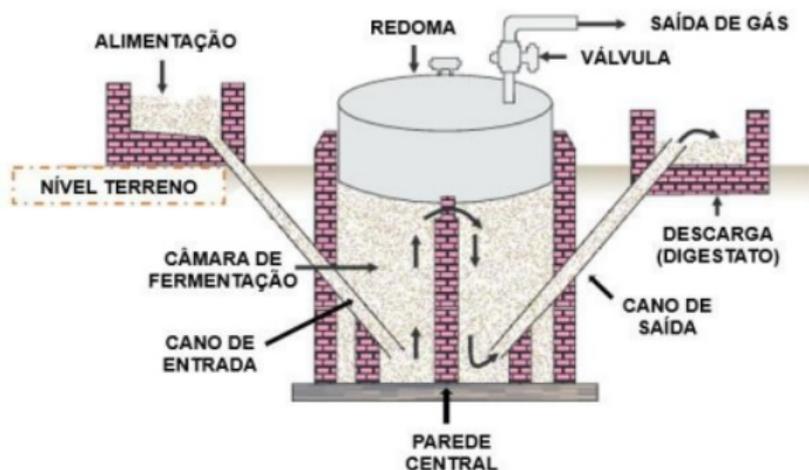
- **Batelada:** Nesse sistema, o substrato é introduzido no biodigestor uma única vez e submetido à fermentação por um período definido. Após esse tempo, o biodigestor é esvaziado e limpo para iniciar um novo ciclo. Embora menos comum, às vezes são usados pelo menos dois biorreatores em série para aumentar a eficiência.
- **Contínuo:** Nesse sistema, o substrato é abastecido continuamente durante o processo de digestão, resultando na produção contínua de biogás e subprodutos. O abastecimento pode ocorrer diariamente ou em intervalos menores que 24 horas. Esse sistema é mais indicado para matérias-primas líquidas ou semilíquidas e pode ser vertical ou horizontal, dependendo do posicionamento sobre o solo.

Existem diversos modelos de biodigestores, cada um com suas próprias características de operação. A escolha do biodigestor adequado depende principalmente das características, quantidade e qualidade do substrato disponível. Os principais modelos de biodigestores são discutidos a seguir.

3.2.5.1 Modelo Indiano

O biodigestor de modelo indiano é um sistema de operação contínua, posicionado verticalmente em relação ao solo. É caracterizado por ter um tanque cilíndrico destinado à fermentação, que fica enterrado no solo e é construído em alvenaria. Além disso, possui uma redoma feita geralmente de ferro, que atua como o gasômetro. Essa redoma fica localizada na parte superior do tanque cilíndrico e se move verticalmente em resposta à produção de biogás. Ela se desloca para cima quando há acúmulo de gás e para baixo quando há menos gás, mantendo assim a pressão interna constante. O tanque de fermentação é dividido em duas câmaras por uma parede central, garantindo a circulação adequada do material em todo o reator. A entrada e saída de material são realizadas através de canos que conectam as câmaras de alimentação e descarga, localizadas ao nível do solo, ao tanque de fermentação [34]. A estrutura desse modelo indiano está esquematizada na Figura 3.10, e suas vantagens e desvantagens estão listadas na Figura 3.11.

Figura 3.10: Representação esquemática do biodigestor modelo indiano.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2017.

É importante observar que esse modelo é mais adequado para a degradação de resíduos com uma concentração de sólidos totais menor ou igual a 8%. Isso facilita a circulação do material pelo interior da câmara e evita possíveis entupimentos nos canos de entrada e saída do material [35].

Figura 3.11: Vantagens e desvantagens do modelo indiano.

BIODIGESTOR - MODELO INDIANO	
VANTAGENS	DESvantagens
○ Fácil construção	○ Redoma de metal encarece o equipamento
○ Ocupa pouco espaço	○ Redoma de metal está sujeita à corrosão
○ Temperatura do sistema pouco variável	○ Possíveis entupimentos nas tubulações
○ Reduzida perda de gás durante o processo	○ Pode ocorrer infiltração no lençol freático

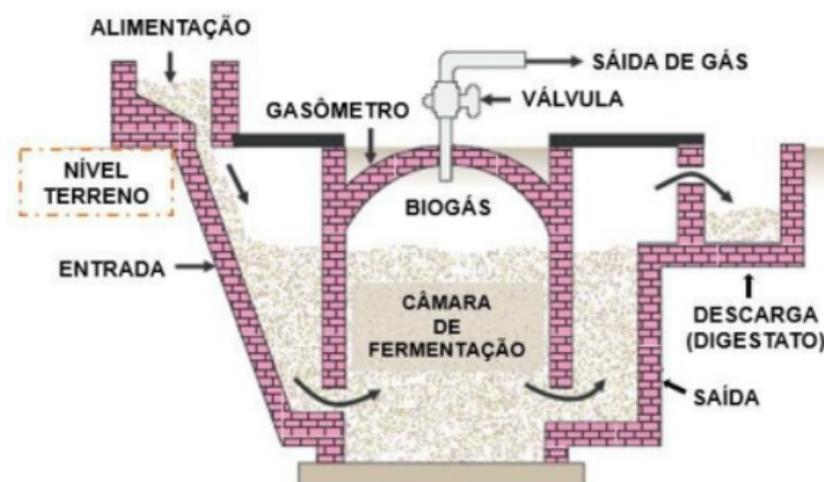
Fonte: Adaptado de SOARES et.al, 2010

3.2.5.2 Modelo Chinês

O biodigestor de modelo chinês, também de operação contínua, é posicionado verticalmente em relação ao solo e apresenta modificações inspiradas no modelo indiano, buscando maior viabilidade econômica. A estrutura que diferencia o modelo chinês do modelo indiano é composta por uma única câmara cilíndrica em alvenaria, onde ocorre a fermentação. Essa câmara possui um teto curvo e impermeável destinado ao armazenamento de biogás, conforme representado na Figura 3.12. Ao contrário do modelo indiano, no qual a redoma se movimenta verticalmente, no modelo chinês o volume interno é fixo, fazendo com que a pressão interna varie ao longo do tempo.

O funcionamento do modelo chinês é baseado no princípio de prensa hidráulica. O aumento da pressão interna, causado pelo acúmulo de biogás, resulta no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída do equipamento [36].

Figura 3.12: Representação esquemática do biodigestor modelo chinês.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2017.

Similarmente ao modelo indiano, o modelo chinês é mais adequado para a degradação de resíduos com concentração de sólidos totais menor ou igual a 8%. Isso é feito para evitar possíveis entupimentos e facilitar a circulação interna do material. As vantagens e desvantagens desse modelo estão detalhadas na Figura 3.13.

Figura 3.13: Vantagens e desvantagens do modelo chinês.

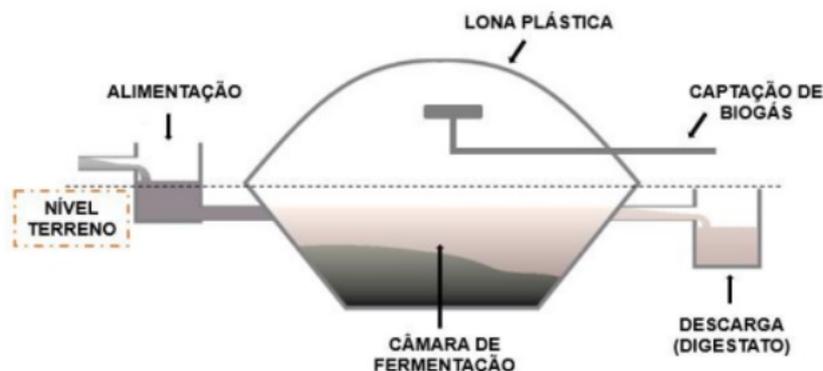
BIODIGESTOR - MODELO CHINÊS	
VANTAGENS	DESvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ○ Baixo custo ○ Ocupa pouco espaço ○ Temperatura do sistema pouco variável 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Está sujeito a entupimentos ○ Pequena área de reserva de gás ○ Construção limitada em solos superficiais ○ Ocorrência de vazamentos, em casos de má vedação

Fonte: Adaptado de SOARES et.al, 2010

3.2.5.3 Modelo Canadense ou Biodigestor Lagoa Coberta (BLC)

O modelo canadense, também conhecido como BLC, opera em regime contínuo e é posicionado horizontalmente em relação ao solo, com um comprimento e largura maiores que sua profundidade. Consiste em uma câmara de fermentação, geralmente subterrânea, revestida por uma lona plástica impermeável. Essa lona infla, similar a um balão, de acordo com o volume de biogás produzido, servindo como local de armazenamento do gás. Além disso, inclui uma caixa de alimentação e de descarga, construídas em alvenaria, e um registro para a captação do biogás, conforme ilustrado na Figura 3.14.

Figura 3.14: Representação esquemática do biodigestor modelo lagoa coberta.



Fonte: Adaptado de PALHARES, 2019.

A disposição horizontal do BLC em relação ao solo confere uma maior área de exposição ao sol. Esse aspecto possibilita uma produção relevante de biogás, especial-

mente em regiões tropicais, e reduz os riscos de entupimento dos materiais [37, 38]. Esse modelo é capaz de suportar um maior volume de carga de resíduos em comparação com os modelos indiano e chinês. Entretanto, ele é limitado à degradação de materiais com, no máximo, 3% de concentração de sólidos totais [34].

As vantagens e desvantagens adicionais do modelo canadense estão listadas na Figura 3.15.

Figura 3.15: Vantagens e desvantagens do modelo canadense.

BIODIGESTOR - MODELO CANADENSE	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
○ Construção simples	○ Maior sensibilidade a variações térmicas
○ Maior área de exposição ao sol	○ Podem apresentar menor eficiência em dias frios
○ Não exige restrições ao tipo de solo	○ A presença da lona encarece o equipamento
○ Lona plástica pode ser removida, possibilitando a limpeza do digestor	○ Tendência ao acúmulo de lodo no fundo do tanque

Fonte: Adaptado de SOARES et.al, 2010

Embora os modelos indiano, chinês e canadense sejam considerados modelos rurais, por serem amplamente utilizados em propriedades rurais para a produção de biogás a partir de resíduos gerados nessas áreas, o modelo canadense se destaca por ser o mais econômico e mais simples de construir, sendo amplamente aplicado no ambiente rural brasileiro.

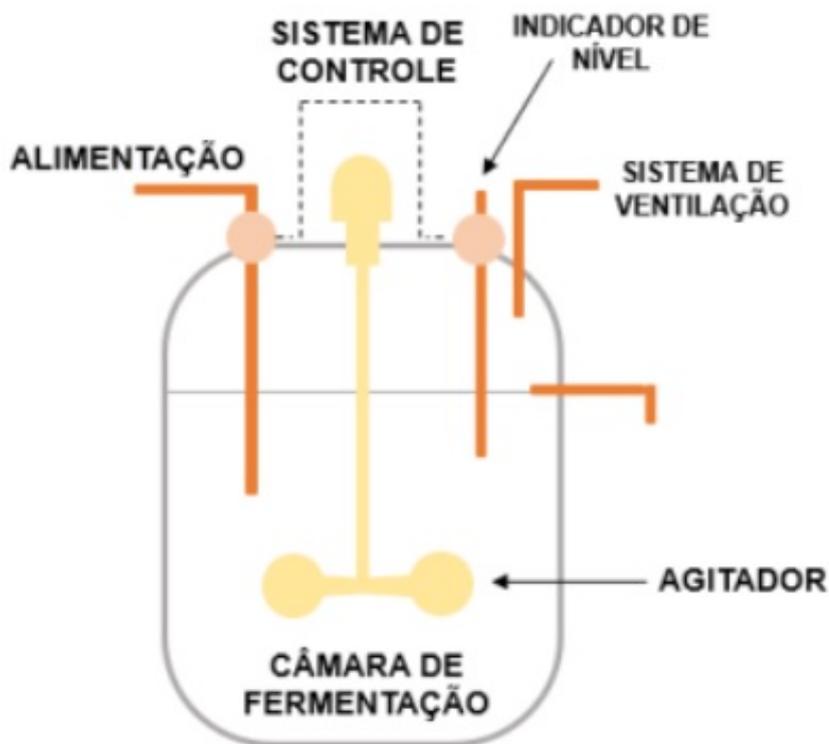
3.2.5.4 Tanque de Agitação Contínua - CSTR

O tanque de agitação contínua, conhecido como *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR), é um tipo de biodigestor que opera de forma contínua, com um Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) variando entre 15 e 20 dias. Este biodigestor é composto por uma câmara cilíndrica localizada acima do solo e se destaca pela presença de um sistema de agitação que assegura uma constante homogeneização do conteúdo. Essa característica fundamental resulta em um aumento de 15 a 30% na produtividade de biogás, já que a agitação contínua garante a distribuição eficaz de substratos, enzimas, nutrientes e microorganismos por todo o volume do reator, otimizando o contato entre a matéria-prima e os organismos decompositores [11].

O CSTR também é equipado com isolamento térmico e incorpora um sistema de controle, o que permite a monitorização e a regulação de diversos parâmetros, como temperatura, pH e nível de biomassa. Essa capacidade de controle oferece um processo muito

mais gerenciável e estável [11]. A Figura 3.16 ilustra um corte vertical esquemático de um biodigestor do tipo CSTR.

Figura 3.16: Representação esquemática de um tanque de agitação contínua - CSTR



Fonte: Adaptado de PALHARES, 2019.

A tecnologia empregada nesse tipo de biodigestor é mais avançada e complexa, devido à sua capacidade de lidar com cargas volumétricas mais substanciais e tolerar concentrações mais elevadas de sólidos. Isso torna a implementação e a manutenção do equipamento mais custosas. No entanto, graças à sua estabilidade e controle aprimorados, o CSTR é amplamente utilizado em instalações de produção de biogás, especialmente na Europa [11].

3.2.5.5 Biodigestor tipo UASB

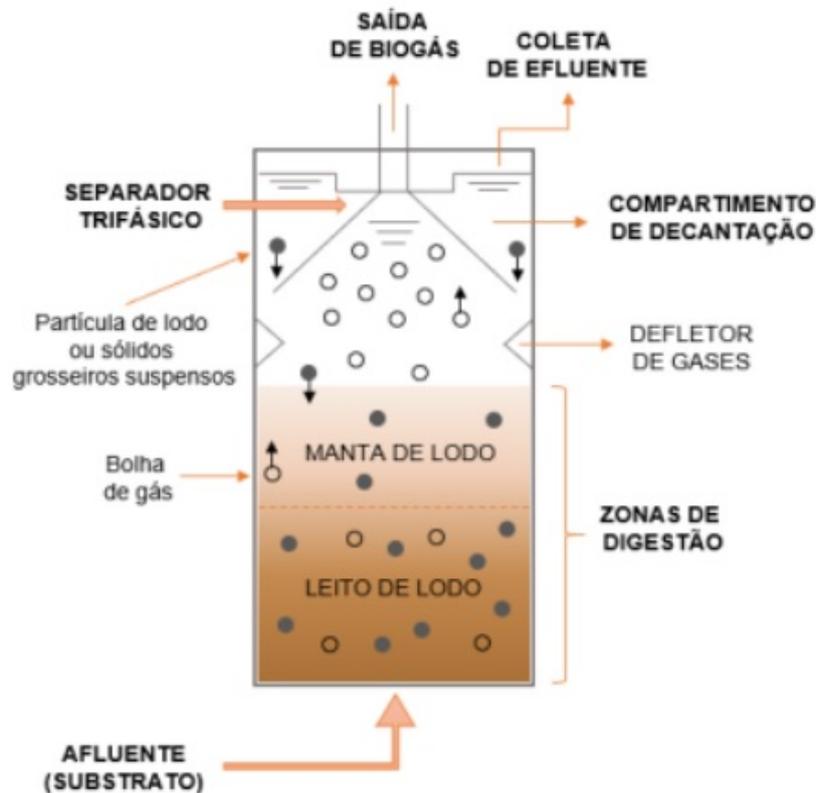
O biodigestor do tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) opera de maneira contínua e se caracteriza pelo fluxo ascendente do afluente (substrato) através de um meio sólido, conhecido como lodo, repleto de micro-organismos, até atingir o topo do reator, onde se encontra um separador trifásico [39].

O reator é composto por duas zonas de digestão, denominadas leito de lodo e manta de lodo. O leito de lodo é uma área densa e altamente ativa em termos microbiológicos, contendo partículas maiores e sedimentáveis, localizada na parte inferior do biodigestor. Logo acima, está a manta de lodo, composta por partículas dispersas e leves, com ativi-

dade microbiológica reduzida. O substrato entra pela base, em um fluxo ascendente, e à medida que passa pelo leito e pela manta de lodo, é digerido e convertido em biogás.

O esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB está elaborado na Figura 3.17.

Figura 3.17: Representação esquemática de um reator UASB



Fonte: KUNZ et al., 2019.

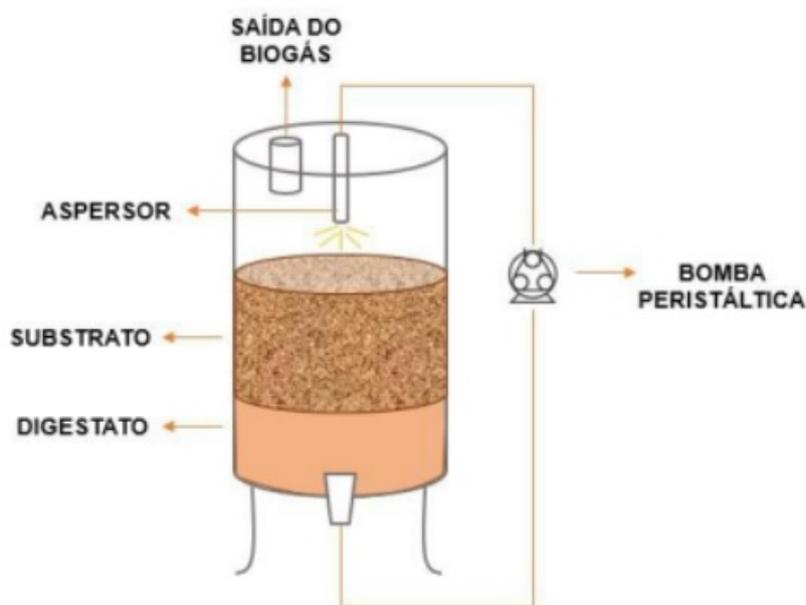
Devido ao fluxo ascendente, o gás, o líquido restante e algumas partículas sólidas que se desprendem da manta de lodo são direcionados para o separador trifásico no topo do reator. No separador, as partículas de gás são conduzidas para a saída central, enquanto a mistura líquido-sólido é encaminhada para um decantador. Nesse decantador, as partículas sólidas são sedimentadas e retornam para a manta de lodo, enquanto o líquido é retirado do reator pela parte superior.

O esquema de funcionamento de um biodigestor do tipo UASB é ilustrado na Figura 3.17. Esses biodigestores apresentam alta eficiência, requerendo um curto TRH de 4 a 72 horas. No entanto, devido a considerações hidrodinâmicas, eles são limitados a substratos com concentração de sólidos totais inferior a 2%, como é o caso de esgotos sanitários. Para utilizar esses biodigestores na produção de biogás a partir de outros tipos de resíduos, como dejetos animais, é necessário realizar uma diluição prévia durante a etapa de pré-tratamento [39].

3.2.5.6 Biodigestor em fase sólida

O biodigestor em fase sólida, também conhecido como *dry digestion*, é uma tecnologia operacional em batelada e especialmente adequada para resíduos contendo entre 20% e 40% de sólidos. Seu funcionamento envolve a adição do substrato ao reator junto com um inóculo. Após o início da degradação, o líquido percolado gerado durante esse processo é coletado e reintroduzido no biodigestor através de um aspersor, com o auxílio de uma bomba peristáltica. Esse líquido é recirculado sobre a fração sólida do substrato (conforme ilustrado na Figura 3.18).

Figura 3.18: Representação esquemática do biodigestor em fase sólida



Fonte: KUNZ et al., 2019.

A digestão em fase sólida possui características específicas [39], tais como:

- Acontece em um biodigestor de menor volume devido à baixa concentração de água em comparação com outras tecnologias.
- A produtividade de biogás é 15% a 40% menor em comparação com a digestão mais úmida. Porém, o biogás produzido possui uma concentração de metano relativamente alta, aproximadamente 80%.
- O tempo médio de digestão varia entre 2 e 4 semanas.
- Essa técnica suporta substratos com maior concentração de sólidos e partículas maiores.
- Não é necessário diluir o substrato antes da inserção.

- O biorreator precisa ser aberto para o preenchimento e/ou esvaziamento do material.

Em resumo, o biodigestor em fase sólida é uma abordagem eficaz para a produção de biogás a partir de resíduos com teores consideráveis de sólidos. Embora apresente algumas limitações em relação à produtividade de biogás, suas características, como a alta concentração de metano no biogás produzido, tornam-no uma opção viável para a gestão sustentável de resíduos orgânicos.

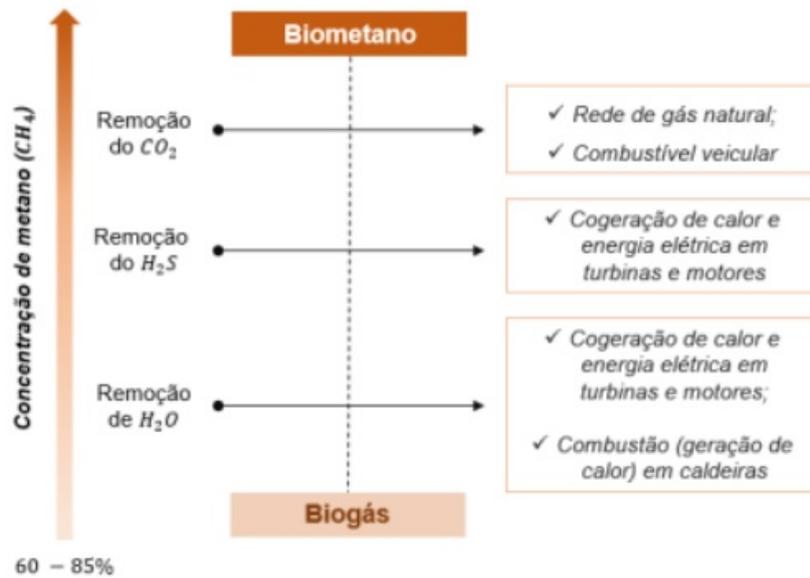
3.2.6 Tratamento e purificação do biogás

O biogás, em sua forma bruta, apresenta uma saturação completa de vapor d'água e inclui não apenas CH_4 e CO_2 , mas também quantidades substanciais de sulfeto de hidrogênio (H_2S). A presença dessas substâncias representa um desafio na operação de um reator para produção de biogás, uma vez que o H_2S é tóxico e emite um odor desagradável de enxofre, além de reagir com o vapor presente no biogás para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4). A presença de H_2SO_4 nos motores e nas tubulações utilizados no processamento de biogás pode causar corrosão e danos aos equipamentos [31].

Adicionalmente, o CO_2 presente no biogás também tem implicações negativas, de forma que ele interfere diretamente no potencial energético do biogás, uma vez que é inerte em termos de combustão e ocupa um volume relevante [20].

Devido a esses fatores, não é viável economicamente a utilização do biogás bruto produzido em uma usina diretamente, pois a presença de compostos como H_2SO_4 e CO_2 acarreta na depreciação e inutilização dos equipamentos da usina por corrosão, e em um menor potencial energético do biogás. Assim, a rentabilidade financeira e a equação de custos e despesas da planta industrial acaba por ser negativamente impactada. Dessa forma, é necessário submeter o biogás a estágios de purificação para remover os componentes indesejados. Essa purificação pode ser realizada de diferentes maneiras e a combinação de métodos de purificação é um pré-requisito para diversas opções de aplicação do biogás, conforme ilustrado na Figura 3.19 [31].

Figura 3.19: Tratamento e purificação do biogás conforme o uso final



Fonte: Adaptado de MORAIS, 2021.

3.2.6.1 Remoção de vapor d'água

Dentro do biodigestor, o biogás é encontrado com uma saturação completa, exibindo uma umidade relativa de 100%. A etapa de secagem, que envolve a remoção do vapor d'água do biogás, tem como objetivos proteger os componentes de processamento de gás contra danos e desgaste, bem como atender aos requisitos das etapas subsequentes de purificação [31]. A retirada de água pode ser realizada por meio de três processos distintos: condensação, adsorção e absorção.

No método de secagem por condensação, o conceito baseia-se em separar o condensado ao resfriar o gás abaixo do ponto de orvalho. O ponto de orvalho refere-se à temperatura na qual o gás precisa ser resfriado para que a condensação de água comece. Ao diminuir a temperatura do biogás abaixo do ponto de orvalho, a maior parte, senão toda, do vapor d'água se transforma em líquido e pode ser coletada. Normalmente, esse resfriamento é realizado na própria tubulação de gás, se esta estiver inclinada, permitindo que o condensado seja acumulado em um reservatório posicionado no ponto mais baixo da tubulação [31].

A secagem por adsorção ou absorção, também conhecida como secagem química, envolve o uso de reatores cilíndricos que contêm um leito fixo composto por materiais adsorventes, como zeólitas, géis de sílica ou óxido de alumínio, ou absorventes, como trietileno glicol ou sais higroscópicos, respectivamente [20]. Esses materiais têm uma forte afinidade pela água, e à medida que o biogás bruto percorre o leito, as moléculas de água são retidas por adsorção ou absorção.

A secagem química é amplamente empregada devido à sua eficiência notável, porém,

envolve custos adicionais relacionados à substituição e regeneração frequente dos materiais internos [31, 20].

3.2.6.2 Dessulfurização

A dessulfurização, que envolve a remoção de H_2S , pode ser realizada por meio de processos biológicos, químicos e físicos. Essa etapa é subdividida em dessulfurização grossa, na qual os níveis de H_2S são reduzidos para valores inferiores a 500 ppm, e dessulfurização fina, que diminui os níveis do contaminante para menos de 0,005 ppm. A dessulfurização fina é uma técnica de alta precisão, empregada para ajustar as concentrações de H_2S de acordo com as especificações e requisitos, especialmente quando o biogás será injetado na rede de GN como destino final [31, 20].

A dessulfurização pode ocorrer dentro ou fora do biodigestor, empregando técnicas específicas para cada cenário, como ilustrado na Figura 3.19. No interior do biodigestor, duas abordagens são possíveis: biodessulfurização interna e precipitação de sulfeto. Na biodessulfurização interna, é introduzido oxigênio no biodigestor por meio de um compressor, criando condições aeróbicas que estimulam o crescimento de bactérias oxidantes de H_2S , resultando na formação de enxofre elementar que é descarregado com o digestato [31]. Já na precipitação de sulfeto, cloretos de ferro ($FeCl_3/FeCl_2$) são adicionados ao biodigestor, reagindo com o H_2S para formar sulfeto de ferro insolúvel (FeS) por meio de uma reação de precipitação. Ambos os métodos realizam a dessulfurização grossa [20].

Após a coleta do biogás, existem três principais técnicas que podem ser aplicadas a jusante do biodigestor: biodessulfurização externa, adsorção e lavagem bioquímica. A biodessulfurização externa segue o mesmo princípio biológico da biodessulfurização interna, porém ocorre fora do biodigestor em biofiltros. Esses reatores são preenchidos com materiais porosos que fornecem uma grande área superficial para o crescimento e fixação dos micro-organismos. À medida que o biogás passa pelo biofiltro, o H_2S é oxidado a enxofre elementar [20].

Na dessulfurização por adsorção, o carvão ativado, devido à sua afinidade pelo H_2S , é usado como material adsorvente. Quando o H_2S entra em contato com a superfície do carvão ativado, ocorre sua oxidação catalítica. O processo de lavagem bioquímica remove o H_2S através de um sistema de três etapas: uma coluna de lavagem absorve o H_2S em uma solução diluída de soda cáustica, seguida de um biodigestor que regenera a solução de soda cáustica oxidando o H_2S a enxofre elementar, e, por fim, um separador de enxofre remove o enxofre elementar formado. Tanto a adsorção quanto a lavagem bioquímica são técnicas de dessulfurização fina [31].

3.2.6.3 Remoção de CO_2

A remoção do dióxido de carbono é essencial quando se pretende injetar o biogás na rede de gás natural ou utilizá-lo como combustível veicular. Diversas técnicas têm sido estudadas e desenvolvidas para serem aplicadas nesse estágio de purificação; dentre elas, a adsorção com modulação de pressão, do inglês *Pressure Swing Adsorption* (PSA) e a lavagem com água sob pressão são técnicas bem estabelecidas e amplamente utilizadas [31].

Na técnica de adsorção com PSA, que utiliza carvão ativado ou zeólitas, ocorre a separação física do CO_2 . O processo é baseado em ciclos de adsorção e dessorção. Inicialmente, o biogás passa pela coluna de adsorção, sob pressão de aproximadamente 6 a 10 bar, para que o CO_2 seja adsorvido. Em seguida, a coluna é despressurizada para promover a dessorção do CO_2 e regenerar o equipamento para um novo ciclo. Por outro lado, a técnica de lavagem com água sob pressão se baseia na diferença de solubilidade em água entre o CH_4 e o CO_2 . Ambos os métodos requerem prévia dessulfurização e secagem, resultando em um teor de CH_4 superior a 97% no biogás purificado [31].

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Uma vez que a produção de biogás depende da atividade de um consórcio microbiano, é crucial reconhecer que os elementos que influenciam a viabilidade desses microorganismos terão um impacto direto na geração de biogás. Nos biodigestores, é essencial controlar esses fatores para assegurar as condições físicas e químicas adequadas ao crescimento e metabolismo das bactérias e arqueias envolvidas no processo [38]

- **Impermeabilização do Sistema**

As arqueas metanogênicas são organismos que operam exclusivamente em ambientes anaeróbicos e não podem sobreviver na presença de oxigênio. Isso significa que, sob condições aeróbicas, a decomposição da matéria orgânica resultará apenas na produção de CO_2 . Devido a essa característica, é imperativo que o sistema seja completamente vedado, assegurando a ausência de oxigênio [33].

- **Temperatura**

O processo de digestão anaeróbica pode ser realizado em duas faixas de temperatura distintas: temperaturas termofílicas (entre 50°C e 70°C) ou temperaturas mesofílicas (entre 20°C e 45°C). A escolha da faixa de temperatura exerce um impacto considerável na velocidade do processo. Nas temperaturas termofílicas, ocorre uma produção mais rápida de biogás em um período mais curto, embora isso demande

um investimento adicional para aquecer o biodigestor. Por outro lado, nas faixas mesofílicas, não é necessário um aquecimento adicional, mas a produção de biogás será mais demorada [33].

A implementação de um sistema de aquecimento pode ter um efeito relevante no desempenho da produção de biogás, resultando em um aumento de até 30% na geração total. Além disso, esse sistema desempenha um papel fundamental na estabilização do processo ao longo do ano, ajudando a evitar flutuações causadas pelas variações de temperatura [40]

- **pH**

Diversos grupos de microorganismos estão envolvidos na digestão anaeróbica, porém as arqueas metanogênicas são particularmente sensíveis às flutuações de pH, sobrevivendo dentro de uma faixa estreita, geralmente entre 6,7 e 7,5. Em condições ideais, não ocorre um acúmulo excessivo de ácidos no reator, pois à medida que são produzidos, esses ácidos também são prontamente consumidos, resultando em um ambiente neutro que favorece o crescimento das arqueas. No entanto, em certas situações, a utilização de soluções tamponantes pode ser considerada para evitar oscilações abruptas no pH [41].

- **Razão entre carbono e nitrogênio**

Manter um equilíbrio dos nutrientes essenciais para o crescimento microbiano é crucial na digestão anaeróbica, e a relação entre carbono e nitrogênio (C:N) desempenha um papel fundamental nesse contexto. É de extrema importância que a relação C:N não seja excessivamente alta ou baixa, visto que um baixo teor de nitrogênio diminui a taxa de crescimento dos micro-organismos, enquanto um excesso de nitrogênio pode levar à inibição do processo. Na geração de biogás, a proporção ideal entre carbono e nitrogênio deve variar entre 20:1 e 30:1 para garantir condições ótimas [33].

- **Carga Orgânica**

A carga orgânica se refere à quantidade de novo material introduzida no biodigestor por unidade de tempo. Quando uma grande quantidade de material é adicionada de uma vez ao processo, ocorre a formação de ácidos graxos devido à falta de microorganismos para degradar todo o material. Essa situação resulta em uma diminuição do pH do meio e desestabiliza o processo de degradação. Portanto, é mais adequado iniciar o processo com uma carga relativamente baixa e aumentá-la gradualmente à medida que os micro-organismos anaeróbicos se desenvolvem e se multiplicam [33].

- **Agitação**

A agitação tem como objetivo principal favorecer o contato entre os microrganismos, o que, por sua vez, impulsiona um aumento na produção de biogás. A incorporação de um sistema de agitação pode resultar em um incremento de 15% a 30% na produção de biogás [42].

Os sistemas de agitação podem ser categorizados em três principais tipos: hidráulicos, pneumáticos e mecânicos. Os sistemas hidráulicos operam com bombas, internas ou externas, para agitar o substrato. Os sistemas pneumáticos usam a recirculação do biogás através de borbulhamento para gerar turbulência dentro do biodigestor. Enquanto isso, os sistemas mecânicos empregam misturadores ou moto-bombas equipadas com hélices [39]

3.4 GEOPROCESSAMENTO E SIG

Geoprocessamento pode ser definido como a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional [43]. Outra definição diz que o geoprocessamento é um ramo de atividades, constituído por um conjunto de técnicas e métodos teóricos e computacionais para a coleta, entrada, armazenamento, tratamento e processamento de dados, a fim de gerar novos dados e ou informações espaciais ou georreferenciadas [44]. As informações georreferenciadas tem o atributo da localização como característica principal, ou seja, estão ligadas a uma posição específica do globo terrestre por meio de suas coordenadas.

Por sua vez, os SIG podem ser considerados uma das geotecnologias do grupo de atividades do geoprocessamento [44]. Todos os dados que possuam um componente espacial, ou seja, uma localização determinável, podem ser manuseados, armazenados e analisados por um SIG [45]. Esses sistemas podem ser definidos como uma caixa de ferramentas digital para armazenamento, tratamento, análise, processamento, transformação e exposição de dados espaciais georreferenciados [46]. Nesse sentido, os SIG são programas computacionais que permitem a realização de análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Os SIG permitem a localização dos dados georreferenciados no espaço e a representação espacial dos mesmos [43].

3.4.1 Tipos de dados SIG

Os dados espaciais, em SIG, têm dois formatos primários (arranjo de dados para armazenamento ou apresentação): raster/matricial e vector/vetorial. O formato matricial é baseado numa estrutura de grade de células, enquanto o formato vetorial é mais parecido com um mapa de linhas. Cada formato de dado tem suas vantagens e desvantagens, e os

profissionais de SIG reconhecem que em muitos projetos há a necessidade de ambas.

3.4.1.1 Vetorial

Por definição, vetores são elementos de dados que permitem descrever posição e direção. Em SIG, um vetor é a representação gráfica de feições como mapa, sem o efeito de generalização de uma grade matricial. As linhas são analógicas, isto é, não são quebradas em células ou em fragmentos, mas são contínuas do seu início ao seu final. Portanto, a forma representada é mais acurada, como um mapa real. De fato, os dados vetoriais são muito mais acurados do que os dados matriciais.

3.4.1.2 Matricial ou Raster

No formato matricial, a cena tem uma estrutura de células de grade. A cada célula da grade uma identidade de feição única é atribuído, normalmente um número (p.ex., montante de chuva, ou um código numérico de uma categoria de uso do solo) ou um rótulo textual (um nome ou um código de letras). A célula é a unidade mínima de mapeamento, o que significa que é o menor tamanho com que qualquer feição da paisagem pode ser representada e mostrada. Todas as feições na área de uma célula são reduzidas a uma simples identificação de célula. Isso significa que todos os objetos presentes na região coberta por uma célula são acumulados e combinados em uma única identificação; isso é uma generalização da paisagem e de suas feições.

3.4.2 Análise Multicritério em ambiente SIG

Os processos de tomada de decisão, geralmente, visam satisfazer a vários objetivos com base na avaliação de um ou mais critérios ou variáveis. Logo, a combinação e a avaliação destes critérios se fazem necessárias, sendo os procedimentos para fazê-lo denominado AMC. Dentro deste tipo de avaliação, mostra-se relevante a questão do risco, visto a necessidade de avaliar diferentes aspectos (a favor ou contra) nos processos de decisão, os quais contribuem para alavancar as opções de gestão e planejamento do espaço dentro de um determinado contexto [47]. O procedimento de AMC baseia-se no mapeamento de variáveis por plano de informação e na definição do grau de pertinência de cada plano e de cada um de seus componentes de legenda para a construção do resultado final, utilizando-se fatores de ponderação sempre que necessário [48]. Esta técnica tem sido empregada em diversos estudos relacionados ao planejamento ambiental, devendo ser utilizada em situações nas quais a análise de apenas uma variável não representa a realidade do fenômeno estudado [49].

O SIG diferencia-se dos demais sistemas de informação, pela sua capacidade de integrar dados espaciais e alfanuméricos, permitindo a visualização dos mesmos, por meio de mapas [50]. Apesar dos SIG e dos métodos de decisão de multicritérios serem duas

áreas distintas de pesquisa, os problemas de planejamento e gerenciamento do mundo real podem se beneficiar da combinação de suas técnicas e procedimentos [51].

Levando em consideração a quantidade de variáveis que engloba a questão da localização de áreas propícias para construção de plantas industriais de biogás, a AMC, aliada a um SIG, pode gerar resultados satisfatórios.

3.5 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E ANÁLISE PROSPECTIVA

Os Estudos de Prospecção Tecnológica, também conhecidos como estudos de futuro, *forecast, foresight ou future studies*, oferecem *insights* sobre as principais tendências globais, especialmente em áreas como a saúde, a inovação e o desenvolvimento, podendo segmentar essas tendências por setores da economia.. A análise prospectiva é especialmente útil em áreas como a produção de biogás, onde a capacidade de prever e preparar-se para desafios futuros é crucial para a proteção do meio ambiente e a garantia de uma fonte de energia sustentável.

Além disso, a combinação do estudo de prospecção tecnológica e da análise prospectiva fornece *insights* valiosos sobre o futuro e ajuda a desenvolver estratégias mais eficazes para lidar com as mudanças que estão por vir, tornando-se essencial para o crescimento e o desenvolvimento em áreas como a inovação. Isso é especialmente importante em países como o Brasil, que apresentam grandes oportunidades de desenvolvimento em relação à produção de biogás, mas também desafios para superar em termos de tecnologia e infraestrutura.

Essas análises auxiliam na identificação de tecnologias promissoras, pertinentes para organizações específicas, enquanto também apontam oportunidades de negócios e parcerias. A prática de monitoramento tecnológico, abrangida pela prospecção tecnológica e de inovação, visa a encontrar soluções apropriadas para identificar e priorizar agendas de *P&D*. Essa prática é coordenada com instituições de pesquisa, podendo até influenciar agendas de *P&D* em nível nacional e gerar demandas para toda a cadeia inovadora de determinado setor [52].

A análise prospectiva é definida como um conjunto de atividades e métodos utilizados para prever o comportamento de variáveis socioeconômicas, políticas, culturais e tecnológicas, bem como os efeitos resultantes de suas interações. A prospecção tecnológica pode variar em complexidade, abrangendo desde a análise de uma única tecnologia para uma empresa específica até exercícios prospectivos de escopo muito amplo, como para um setor econômico inteiro ou questões que afetam toda uma sociedade. Em suma, os estudos prospectivos são processos sistemáticos para compreender o futuro e podem abordar aspectos sociais, econômicos, políticos e tecnológicos [53].

3.5.1 Artigos Científicos

A disseminação dos resultados de pesquisas científicas é frequentemente realizada por meio da publicação de artigos em periódicos científicos, sendo este um dos mecanismos mais amplamente empregados pela comunidade científica. A divulgação formal dos resultados de uma pesquisa é essencial para garantir o devido reconhecimento da autoria por parte dos responsáveis pelo desenvolvimento da pesquisa [54]. Nesse contexto, o artigo científico se destaca como uma fonte de informação original e de alta qualidade. Além disso, os artigos científicos constituem uma base literária que sustenta os estudos existentes, ao mesmo tempo em que servem como fonte de inspiração para novas investigações.

Bases de pesquisa como Scopus®, Science Direct®, Google Acadêmico® são ferramentas poderosas e eficazes para fornecer um panorama do estado da arte, permitindo identificar pesquisas de ponta em determinada área do conhecimento. A utilização de bases de dados padronizadas e de qualidade contribui para o tratamento estatístico de dados com baixo risco de erros, agregando valor ao conhecimento disponível.

3.5.2 Patentes

A documentação patentária é considerada a fonte mais abrangente e minuciosa de informações técnicas disponíveis em escala global, oferecendo *insights* valiosos também sobre tendências do mercado [55].

Três fatores influenciam consideravelmente a riqueza de informações presentes nos documentos de patente. Primeiramente, há um grande volume de informações contidas em documentos de patentes, impulsionado pela globalização, o advento da internet e o crescimento de regiões emergentes como a China e a Índia.

O segundo fato é a crescente complexidade da pesquisa e inovação, levando a maior complexidade na atividade de patenteamento. Assim, as invenções estão se tornando mais complexas devido ao crescimento da pesquisa interdisciplinar e devido à forma como as reivindicações são elaboradas, a pesquisa tornou-se mais difícil.

Por último, as mudanças impulsionadas pela tecnologia têm se mostrado fundamentais; a chave da compreensão do conhecimento está na integração e correlação das informações e na gestão de dados [56].

Bases de pesquisa como Google Patents®, Espacenet®, Scopus®, WIPO® e Orbit ® são utilizadas para avaliação e diagnóstico do panorama tecnológico das tecnologias em diversos estudos de prospecção.

4 PANORAMA GERAL DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE ARTIGOS E PATENTES EM BIOGÁS

No presente estudo, foi realizado uma prospecção tecnológica com o intuito de observar o direcionamento da pesquisa e desenvolvimento na temática de biogás, baseada em: análise quantitativa e qualitativa de documentos técnicos (artigos e patentes), também conhecida como bibliometria e patentometria. O método de prospecção tecnológica adotado utiliza informações provenientes de artigos científicos, patentes e outras fontes, tais como relatórios técnicos setoriais de organizações públicas e privadas.

4.1 DIRETRIZES DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS

Para a busca e posterior mapeamento de artigos científicos sobre a produção de biogás, com foco em tipos de reatores, técnicas de tratamento e purificação do gás, foi utilizada a base de dados Scopus® (<http://www.scopus.com/>). A Scopus®, uma referência da Editora Elsevier, é uma fonte abrangente de literatura técnica e científica revisada por pares, fornecendo uma visão ampla do que está sendo publicado sobre um determinado tema. Mediante o uso dessa base, é possível localizar informações de instituições e autores específicos. A escolha da Scopus® se deveu à sua ampla cobertura, facilidade de download de diversos documentos e à relevância dos artigos científicos disponíveis, além das facilidades para análises macro.

A lista de palavras-chave utilizadas nas buscas foi derivada a partir da pesquisa na literatura, com foco nos seguintes documentos exibidos na Figura 4.1.

Figura 4.1: Principais documentos utilizados na pesquisa e definição de palavras-chave para o trabalho.

Documentos Avaliados	Elaboração	Ano
Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano	CIBiogás	2022
Purificação do Biogás - Nota Técnica	ABiogás	2021
Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato	Airton Kunz, et al	2019

Fonte: Produzido pelo Autor

A lista de palavras-chave elaborada a partir da pesquisa literária pode ser vista na Figura 4.2.

Figura 4.2: Palavras Chave utilizadas na pesquisa bibliográfica.

Temas	Palavras Chave							
Purificação e Tratamento	Biogas	Manure	animal	Removal	Treatment	Purification	PSA	
				sulfide	coal	charcoal	biochar	
Reatores				Biochemical	*sulf*	biological	moisture	
Agitadores				pond	lagoon	UASB	CSTR	
				agitator	agitation	mixing	mechanical	hydraulic

Fonte: Produzido pelo Autor

A partir das palavras, foi possível montar estratégias específicas para avaliação da evolução da pesquisa em biogás, avaliando títulos, resumos e palavras-chave de artigos científicos publicados entre os anos de 2017 e 2022 nas bases de pesquisa. As estratégias utilizadas podem ser visualizadas na Figura 4.3:

Figura 4.3: Estratégias de pesquisa utilizadas para a pesquisa bibliográfica.

Temas	Estratégias de pesquisa
Purificação e Tratamento	TITLE-ABS-KEY (biogas AND (removal OR treatment OR purification) AND psa) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY (biogas AND (removal OR treatment OR purification) AND (*sulf* OR sulphide) AND biochemical) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY (biogas AND (removal OR treatment OR purification) AND (*sulf* OR sulphide) AND (coal OR charcoal OR biochar)) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY (biogas AND (removal OR treatment OR purification) AND (*sulf* OR sulphide) AND biological) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY (biogas AND (removal OR treatment OR purification) AND (*sulf* OR sulphide) AND steel) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY ((manure OR animal) AND biogas AND (removal OR treatment OR purification) AND moisture) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
Agitadores	TITLE-ABS-KEY ((manure OR animal) AND biogas AND (agitator OR agitation OR mixing) AND mechanical) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY ((manure OR animal) AND biogas AND (agitator OR agitation OR mixing) AND hydraulic) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
Reatores	TITLE-ABS-KEY ((manure OR animal AND waste) AND biogas AND (pond OR lagoon)) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY ((manure OR animal AND waste) AND biogas AND cstr) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023
	TITLE-ABS-KEY ((manure OR animal AND waste) AND biogas AND uasb) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2023

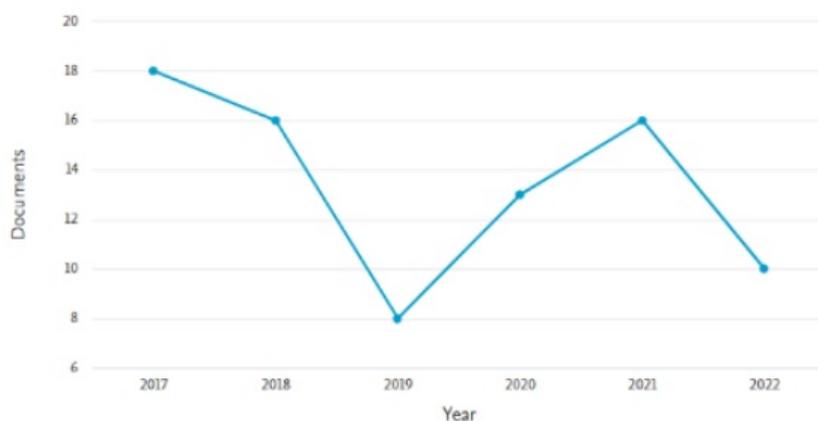
Fonte: Produzido pelo Autor

4.2 PANORAMA ATUAL EM ARTIGOS CIENTÍFICOS SOBRE BIOGÁS

4.2.1 Reatores para produção de biogás

Acerca do tema de reatores, os resultados obtidos por meio da pesquisa bibliográfica são exibidos da Figura 4.4:

Figura 4.4: Número de publicações envolvendo reatores CSTR, UASB e BLC entre os anos de 2017 e 2022.



Fonte: Scopus, 2023

Ao analisar a Figura 4.4, torna-se possível visualizar uma alternância entre períodos de alta e baixa no número de publicações envolvendo a temática de reatores de biogás. Tal fator pode estar relacionado ao período de tempo para implantação de novos experimentos de reatores e a geração de estudos científicos acerca dos experimentos, ou até mesmo, uma possível tendência de diminuição de publicações nesse segmento, podendo o foco estar sendo redirecionado para pesquisas em segmentos como agitadores e técnicas de purificação e tratamento de biogás, as quais serão abordadas mais adiante neste trabalho.

Os dados envolvendo o número de publicações envolvendo cada tipo de reator avaliado, podem ser visualizados na Figura 4.5:

Figura 4.5: Número de publicações atreladas a cada tipo de reator entre 2017 e 2022.

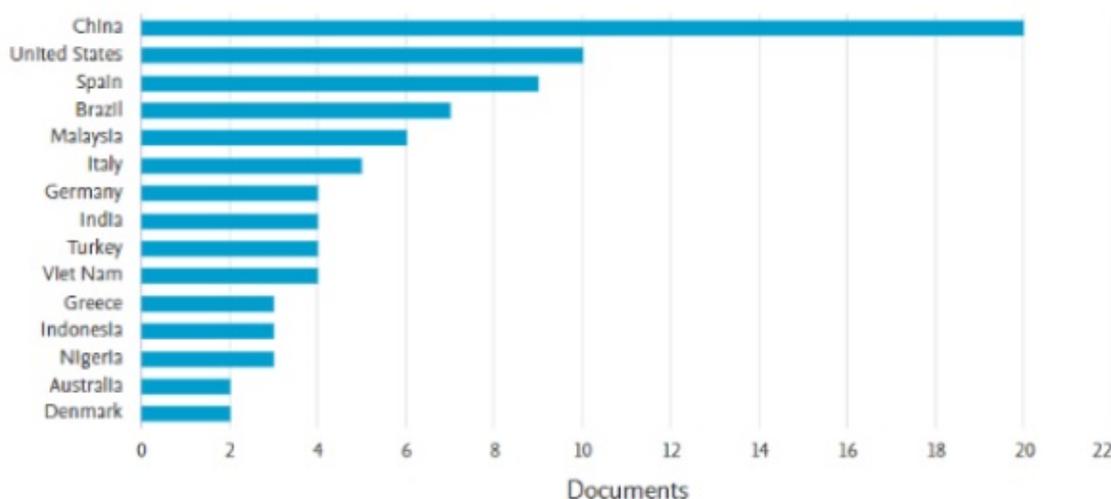


Fonte: Produzido pelo Autor com dados do Scopus, 2023

Na Figura 4.5, fica evidenciado uma alternância similar a apresentada na Figura 4.4, acerca do número de publicações totais para o segmento de reatores UASB, sendo assim uma causa dessa variabilidade. Além disso, identifica-se que as publicações para o segmento de reatores CSTR enfrentaram uma queda no número de estudos científicos divulgados entre os anos de 2018 e 2019, estabilizando logo em seguida e buscando uma recuperação entre os anos de 2021 e 2022. Por último, as publicações envolvendo a temática de BLC foram constantes ao longo dos anos, demonstrando um padrão de pesquisas que estão sendo dedicadas ao tema, mas enfrentou uma ligeira queda entre os anos de 2021 e 2022.

A nacionalidade dos autores envolvidos nas publicações pode ser visualizada a partir da Figura 4.6:

Figura 4.6: Número de publicações por país, de acordo com autores dos estudos, entre os anos de 2017 e 2022.



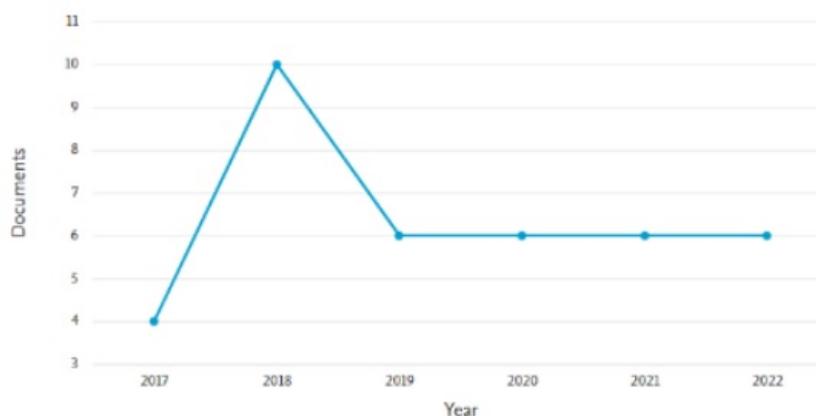
Fonte: Produzido pelo Autor com dados do Scopus, 2023

A partir da Figura 4.6, podemos visualizar a dominância de países como China, Estados Unidos e Espanha no estudo de reatores para produção de biogás. Vale destacar que tais países estão numa intensa busca de descarbonização de suas matrizes energéticas, de forma que o incentivo a pesquisas de produção de biogás ganha relevância, assim como vem acontecendo, em menor escala, no Brasil, o qual ocupa a quarta posição no número de pesquisadores brasileiros envolvidos nas publicações.

4.2.2 Agitação dentro de reatores

Acerca das publicações com a temática de agitadores, o número de artigos publicados nas bases de pesquisa, envolvendo agitadores mecânicos e hidráulicos, entre os anos de 2017 e 2022 pode ser visualizado na Figura 4.7 a seguir:

Figura 4.7: Número de publicações envolvendo agitadores mecânicos e hidráulicos entre os anos de 2017 e 2022.



Fonte: Scopus, 2023

Ao examinar a Figura 4.7, é evidente que há uma alternância entre períodos de aumento e diminuição entre os anos de 2017 a 2019, e uma estabilidade nos anos de 2019 a 2022 no número de publicações sobre agitadores em reatores de biogás. Essa variação pode ser atribuída ao tempo necessário para implementar novos experimentos de reatores e à subsequente produção de estudos científicos relacionados a esses experimentos, com a estabilização do número de publicações ao se consolidarem.

Em relação ao número de artigos científicos atrelado a cada tipo de agitador, é possível avaliar a evolução das publicações a partir da Figura 4.8 a seguir:

Figura 4.8: Número de publicações atreladas a cada tipo de agitador entre os anos de 2017 e 2022.

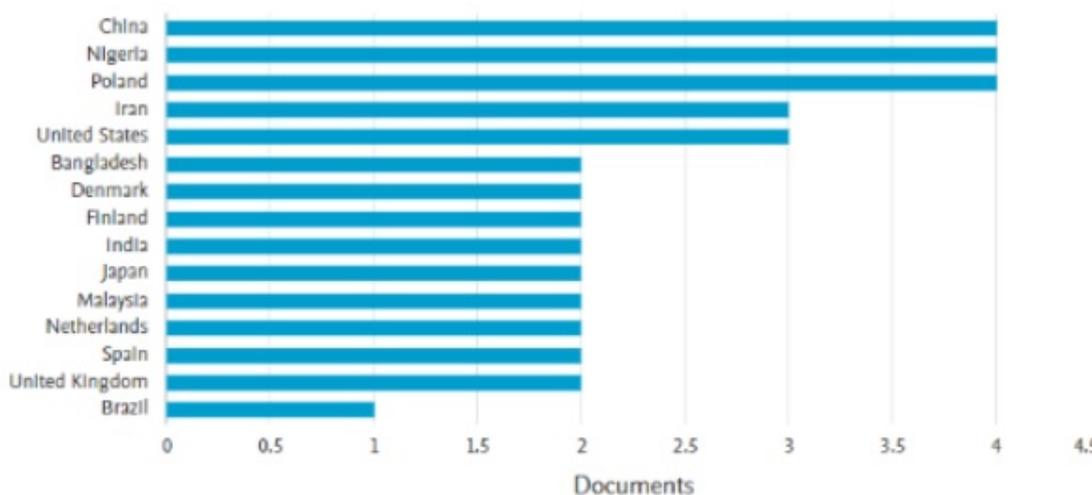


Fonte: Produzido pelo Autor com dados do Scopus, 2023

A partir da Figura 4.8, visualiza-se uma crescente pesquisa e produção de publicações acerca do segmento de agitadores hidráulicos, em comparação com os agitadores mecânicos. Tal fator pode ser explicado, pela diminuição de custos na operação de reatores ao se escolher agitadores hidráulicos, de forma que a pesquisa vem se direcionando a cada vez mais compreender o comportamento hidrodinâmico dos substratos nos leitos dos reatores para a produção de biogás.

A nacionalidade dos autores envolvidos nas publicações pode ser visualizada a partir da Figura 4.9:

Figura 4.9: Número de publicações por país, de acordo com autores dos estudos, entre os anos de 2017 e 2022.



Fonte: Scopus, 2023

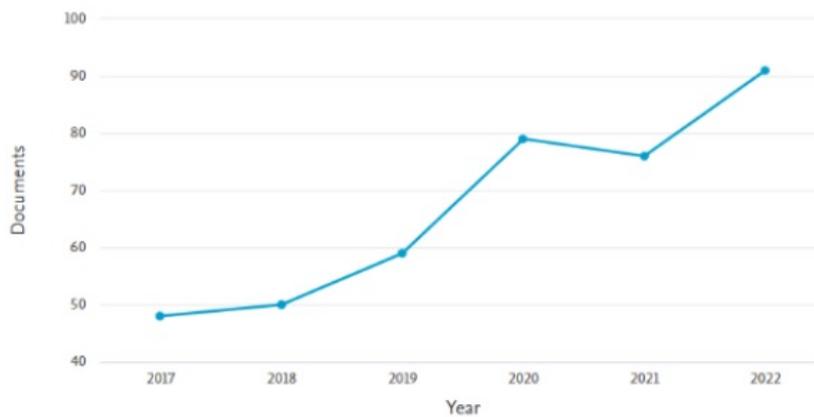
Ao analisar a Figura 4.9, fica evidente a predominância de países como China na temática de biogás, entretanto na pesquisa do segmento de agitadores em reatores

destacaram-se também países como Nigéria e Polônia, sendo seguidos por Irã e Estados Unidos.

4.2.3 Tratamento e Purificação do Biogás

Acerca das publicações com a temática de purificação e tratamento, o número de artigos publicados nas bases de pesquisa, envolvendo diferentes técnicas de purificação e tratamento, entre os anos de 2017 e 2022 pode ser visualizado na Figura 4.10 a seguir:

Figura 4.10: Número de publicações envolvendo técnicas de purificação e tratamento de biogás entre os anos de 2017 e 2022.

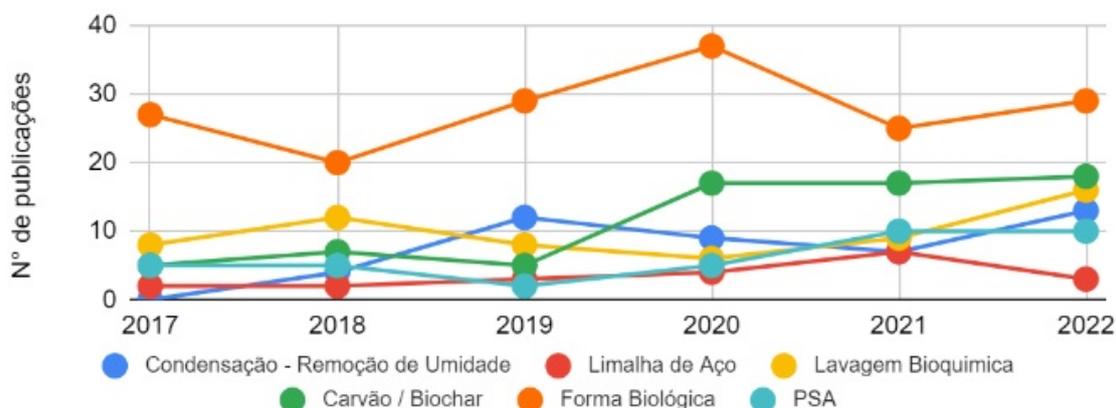


Fonte: Scopus, 2023

Ao examinar a Figura 4.10, torna-se possível avaliar um crescimento consistente no número de publicações na temática de purificação e tratamento de biogás, de forma que muitas pesquisas estão direcionando seus esforços a avaliar diferentes métodos para melhorar no valor agregado do biogás e um manejo operacional mais facilitado, buscando otimizar os rendimentos.

Em relação ao número de artigos científicos atrelado a cada tipo de técnica de purificação e tratamento, é possível avaliar a evolução das publicações a partir da Figura 4.11 a seguir:

Figura 4.11: Número de publicações atreladas a cada tipo de técnica de purificação e tratamento entre os anos de 2017 e 2022.

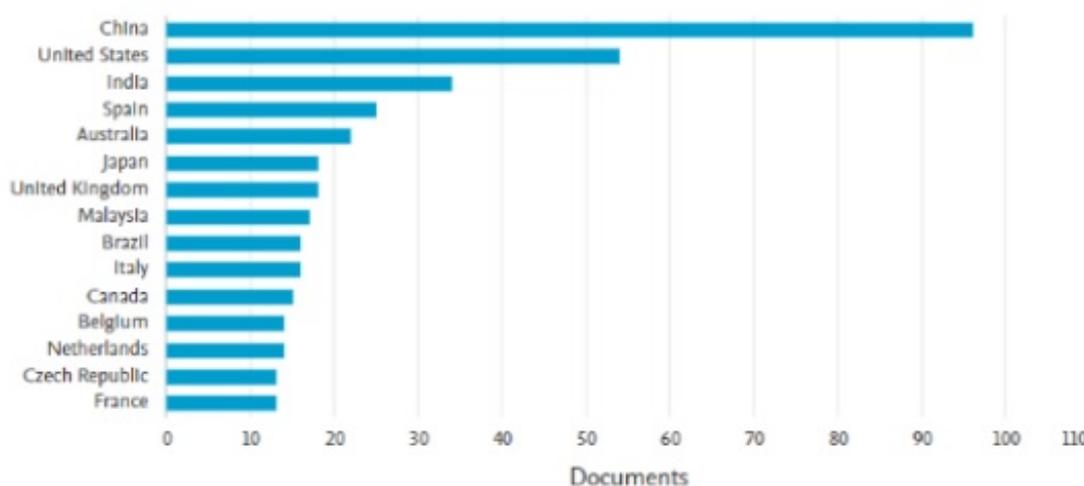


Fonte: Produzido pelo Autor com dados do Scopus, 2023

A partir da Figura 4.11, fica evidenciado a predominância da pesquisa e desenvolvimento de formas biológicas de purificação e tratamento de biogás, de modo a focar no aproveitamento de microrganismos para atuação em processos específicos envolvendo o biogás. Em segundo lugar, está a pesquisa no uso de carvão e biochar, os quais vêm em uma dinâmica crescente do número de publicações envolvendo esta temática. Em terceiro lugar, está o processo de lavagem bioquímica, o qual apresentou uma alternância de topos e fundos no número de publicações ao longo dos anos, mas apresenta um crescimento constante desde o ano de 2020.

A nacionalidade dos autores envolvidos nas publicações pode ser visualizada a partir da Figura 4.12:

Figura 4.12: Número de publicações envolvendo técnicas de purificação e tratamento de biogás por país, de acordo com autores dos estudos, entre os anos de 2017 e 2022.



Fonte: Scopus, 2023

Ao examinar a Figura 4.12, pode-se avaliar que a China e os Estados Unidos estão no topo de pesquisas envolvendo a temática de purificação e tratamento de biogás, de modo a serem duas potências em pesquisa e desenvolvimento que vêm promovendo inovações nesse campo da ciência, sendo seguidos por Índia, Espanha e Austrália.

A partir dessa análise, torna-se possível identificar como o financiamento de pesquisa e desenvolvimento no tema de biogás, possui atores principais, mas acompanhados de muitas outras nações que buscam captar o potencial energético do biogás em seus territórios.

4.3 DIRETRIZES DA PESQUISA PATENTÁRIA

A partir dessa abordagem, será possível a avaliação do status quo das tecnologias utilizadas na operação da indústria de biogás, e assim a sugestão das soluções tecnológicas mais recentes e apropriadas a serem utilizadas nas novas plantas de produção.

Assim, primeiramente, definiu-se palavras-chave mais apropriadas dentro da temática de biogás. A partir disso, torna-se possível a estruturação de estratégias de pesquisa que possam guiar a busca no Orbit Insight®, o qual possibilita a visualização do panorama tecnológico atual tanto em instituições de pesquisa, universidades, empresas e startups, através de dados de patentes organizados e infográficos para facilitação da interpretação.

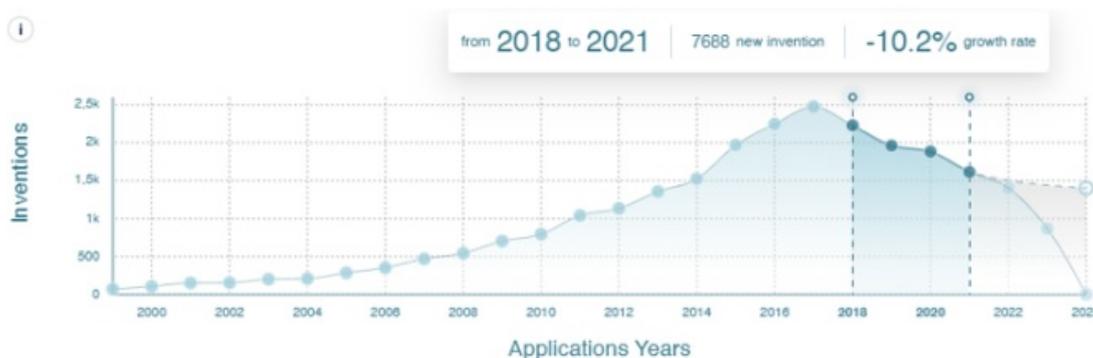
Dessa forma, utilizando palavras-chaves que remetessem a indústria em análise, como biogas, residues e production, somado ao uso de operadores, foi possível estruturar a seguinte estratégia de pesquisa, “*biogas*” AND “*residues*” AND “*production*”, a qual foi utilizada para a pesquisa patentária.

Com a estratégia montada, foi avaliado todo o período de 1999 a 2023, assim como o período de 2018 a 2021 na base de dados de patentes Orbit Insight®.

4.4 PANORAMA ATUAL EM PATENTES SOBRE BIOGÁS

Os resultados da análise prospectiva de patentes na base de dados Orbit Insights®, possibilitou a identificação de 26.461 patentes solicitadas na temática de biogás originado de resíduos de matéria orgânica entre os anos de 1999 e 2023, e 7.688 novas patentes solicitadas ao longo do período de 2018 a 2021, com uma taxa de crescimento negativa de 10,6% entre os anos, visualizado na Figura 4.13.

Figura 4.13: Número de patentes depositadas ao longo dos anos de 1999 a 2023 na temática de biogás originado de resíduos.



Fonte: Orbit Insights®, 2024

As patentes, entre o período de 1999 e 2023, enquadraram-se principalmente nos campos técnicos *Environmental Technology* (1º Lugar - 12.175 Correspondências), *Basic Materials Chemistry* (2º Lugar - 9.047 Correspondências) e *Biotechnology* (3º Lugar - 7.976 Correspondências), como evidenciado na Figura 4.14.

Figura 4.14: Relação de principais campos técnicos abordados pelas patentes.

Technical domains	
<input type="checkbox"/> Environmental Technology	12175
<input type="checkbox"/> Basic Materials Chemistry	9047
<input type="checkbox"/> Biotechnology	7976
<input type="checkbox"/> Other Special Machines	3418
<input type="checkbox"/> Chemical Engineering	3130
<input type="checkbox"/> Materials, Metallurgy	1506
<input type="checkbox"/> Food Chemistry	1045
<input type="checkbox"/> Engines, Pumps, Turbines	876
<input type="checkbox"/> Organic Fine Chemistry	809
<input type="checkbox"/> Thermal Processes And Apparatus	662
<input type="checkbox"/> Electrical Machinery, Apparatus, Energy	595
<input type="checkbox"/> Civil Engineering	526
<input type="checkbox"/> Macromolecular Chemistry, Polymers	485
<input type="checkbox"/> Textile And Paper Machines	388
<input type="checkbox"/> Surface Technology, Coating	266
<input type="checkbox"/> Medical Technology	243
<input type="checkbox"/> Machine Tools	218
<input type="checkbox"/> Pharmaceuticals	210

Fonte: Orbit Insights®, 2024

Também foi avaliado quais foram as instituições responsáveis pela maior quantidade

de patentes depositadas ao longo do período entre 1999 e 2023, de forma que a *Tongji University* (China) conquistou o primeiro lugar na análise tendo 178 patentes atribuídas à ela, sendo seguida pela empresa BASF (Alemanha) com 98 patentes, em terceiro lugar a *Jiangsu Academy of Agricultural Science - JAAS* (China) com 83 patentes, em quarto lugar *Biogas Science Research Institute of the Ministry of Agriculture - BIOMA* (China) e em quinto lugar a *China Agricultural University* (China) com 78 patentes, como evidenciado na Figura 4.15.

Figura 4.15: Relação de principais depositantes de patentes na temática de biogás originado de resíduos.

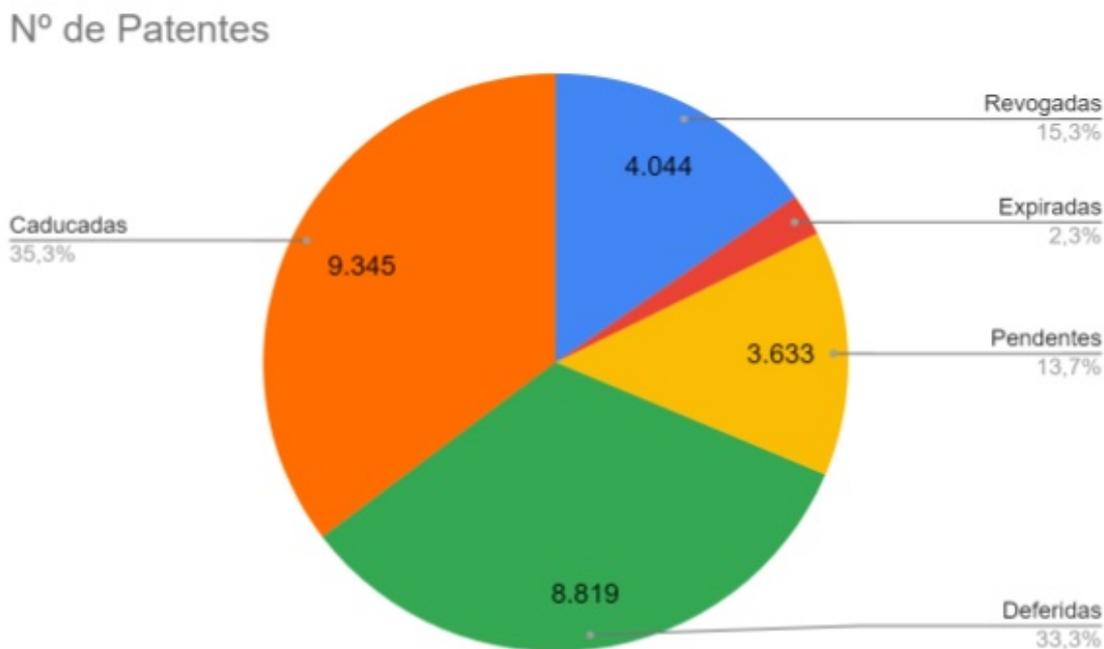
Top assignees	
<input type="checkbox"/> Tongji University	178
<input type="checkbox"/> Basf	98
<input type="checkbox"/> Jiangsu Academy Of Agricultural Sciences	83
<input type="checkbox"/> Biogas Science Research Institute Ministry Of Agricul...	82
<input type="checkbox"/> China Agricultural University	78
<input type="checkbox"/> Jiangnan University	76
<input type="checkbox"/> Zhejiang University	76
<input type="checkbox"/> Guangzhou Institute Of Energy Conversion - Chinese...	74
<input type="checkbox"/> Beijing Tian An Bioscience & Technology	72
<input type="checkbox"/> China Petroleum & Chemical	61
<input type="checkbox"/> Kunming University Of Science & Technology	59
<input type="checkbox"/> Tsinghua University	57
<input type="checkbox"/> Fraunhofer	51
<input type="checkbox"/> Northeast Agricultural University	49
<input type="checkbox"/> Qingdao Technological University	47
<input type="checkbox"/> Dsm Ip Assets	46

Fonte: Orbit Insights®, 2024

Ainda de acordo com a análise das 26.461 patentes depositadas entre o período de 1999 e 2023, dentro do grupo dos 100 principais depositantes de patentes, os 5 primeiros mencionados anteriormente correspondem a 10% do total de patentes depositadas pelo grupo.

Avaliando todas as patentes depositadas, também foi possível definir quais os status atuais das mesmas até o momento da pesquisa, de forma que a categoria com maior representação foram patentes que caducaram, e em seguida por patentes que foram deferidas, como evidenciado na Figura 4.16.

Figura 4.16: Situação atual em categorias das patentes depositadas ao longo do período de 1999 a 2023.



Fonte: Produzido pelo Autor com dados do Orbit Insights®,2024

Ao analisar cada segmento de depositantes, tivemos os seguintes resultados para as principais organizações, enquadradas como instituições acadêmicas dentro do Orbit Insights®, apresentado na Figura 4.17.

Figura 4.17: Relação de principais instituições acadêmicas na temática de biogás originado de resíduos.

<input type="checkbox"/>	NAME	CLASSIFICATION	ACRONYM	TYPE	COUNTRY
<input type="checkbox"/>	Tongji University			University	China
<input type="checkbox"/>	Universidade Federal de Minas Gerais		UFMG	University	Brazil
<input type="checkbox"/>	University of South Florida			University	United S..
<input type="checkbox"/>	Korea Institute of Construction Technology			University	South K..
<input type="checkbox"/>	Universidad del Valle		UNIVALLE	University	Colombia
<input type="checkbox"/>	University of Florida		UFL	University	United S..
<input type="checkbox"/>	Regents of the University of California			University	United S..
<input type="checkbox"/>	Kumamoto University			University	Japan
<input type="checkbox"/>	Tianjin University		TJU	University	China
<input type="checkbox"/>	Konkuk University		KU	University	South K..
<input type="checkbox"/>	Korea Advanced Institute of Science and Tec...		KAIST	University	South K..
<input type="checkbox"/>	Stanford University			University	United S..

Fonte: Orbit Insights®,2024

Para o segmento de principais organizações, enquadradas como empresas dentro da

base de dados do Orbit Insights®, obteve-se os seguintes resultados apresentados na Figura 4.18.

Figura 4.18: Relação de principais empresas na temática de biogás originado de resíduos.

NAME	CLASSIFICATION	ACRONYM	TYPE	COUNTRY
 Fraunhofer USA			Company	 United S.
 Viessmann Climate Solutions SE			Company	 Germany
 Veolia Environnement			Company	 France
 Air Liquide			Company	 France
 logen Corporation			Company	 Canada
 LanzaTech			Company	 United S.
 Tokyo Gas			Company	 Japan
 Hitachi Zosen Inova			Company	 Switzerla.
 Anaergia			Company	 Canada
 Degrémont SAS			Company	 France
 Novozymes A/S			Company	 Denmark
 VERBIO			Company	 Germany
 kubota			Company	 Japan
 Kobe Steel			Company	 Japan
 DSM-Firmenich AG			Company	 Switzerla.
 Kajima Tatemono			Company	 Japan

Fonte: Orbit Insights®,2024

Para o segmento de principais organizações, enquadradas como startups dentro da base de dados do Orbit Insight®, obteve-se os seguintes resultados apresentados na Figura 4.19.

Figura 4.19: Relação de principais startups na temática de biogás originado de resíduos.

NAME	CLASSIFICATION	ACRONYM	TYPE	COUNTRY
 Kiverdi			SME / Startup	 United S.
 SWING			SME / Startup	 Germany
 getproject			SME / Startup	 Germany
 Biopract GmbH			SME / Startup	 Germany
 Anaeco			SME / Startup	 Australia
 Xogen Technologies			SME / Startup	 Canada
 Fiberight			SME / Startup	 United S.
 SMI			SME / Startup	 United S.
 Guild			SME / Startup	 United S.
 Heartland Water Technology			SME / Startup	 United S.
 Korea Western Power			SME / Startup	 South K.
 Biogas Fuel Cell			SME / Startup	 Spain
 OMNIGREEN RENEWABLES			SME / Startup	 United S.

Fonte: Orbit Insights®,2024

5 PANORAMA GERAL DO BIOGÁS NO BRASIL

Neste capítulo, serão abordados dados e características acerca da participação do biogás na matriz energética brasileira, além do cenário produtivo e status atual das plantas de produção de biogás com informações acerca de porte, fonte de substrato, aplicação energética e localização como forma de contextualização e atendimento ao objetivo específico nº 1 deste trabalho.

5.1 BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA

A energia que um país dispõe é extraída de diversas fontes primárias, constituindo a matriz energética deste país. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) define a matriz energética como o conjunto de fontes primárias de energia disponíveis para atender a demanda energética de um país, estado ou até mesmo globalmente [3].

Embora a matriz energética global seja predominantemente composta por fontes não renováveis, a parcela de fontes renováveis está aumentando. Em 2021, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) as fontes renováveis representaram apenas 14,1% da matriz energética mundial [57]. No entanto, esse cenário está mudando à medida que as energias renováveis ganham espaço em detrimento das fontes não renováveis. Nesse contexto, o Brasil se destaca por ter uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo. O país tem uma participação importante de energias renováveis em sua matriz energética, totalizando 44,8%. Essa proporção é consideravelmente maior que a média global de 14,1% e até mesmo superior à média de 11,5% dos países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Esses números [57, 3] colocam o Brasil em uma posição privilegiada em relação à adoção de fontes de energia renovável.

A representação visual da matriz energética brasileira pode ser observada na Figura 5.1.

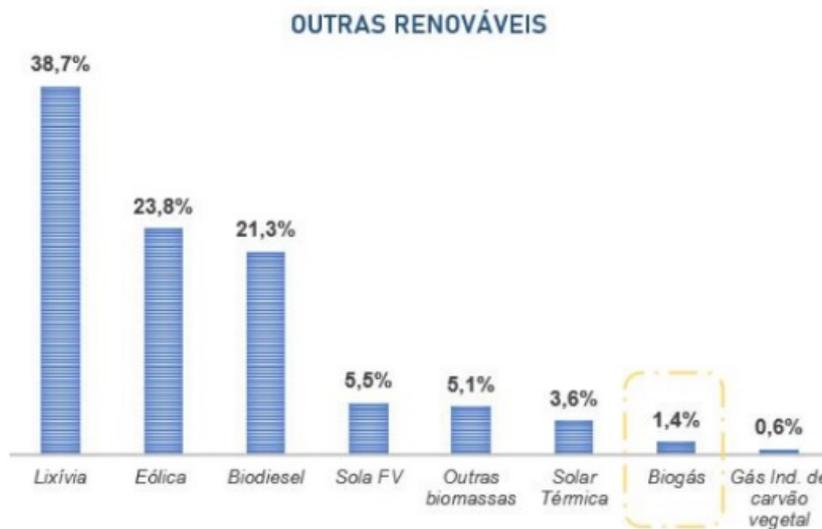
Figura 5.1: Matriz energética brasileira - 2021



Fonte: Adaptado de Resenha energética brasileira, MME e Balanço Energético Nacional (BEN), EPE; 2022.

Apesar do avanço notável na adoção de fontes de energia renovável no Brasil, a contribuição do biogás ainda é bastante limitada. No ano de 2021, a participação do biogás na matriz energética brasileira era de apenas 0,12%, correspondendo a apenas 1,4% da categoria mais ampla de "outras renováveis"[3]. Esse cenário é ilustrado na Figura 5.2, onde se nota que o biogás tem uma parcela bastante restrita dentro do contexto das energias renováveis no país.

Figura 5.2: Participação do biogás em "outras renováveis"

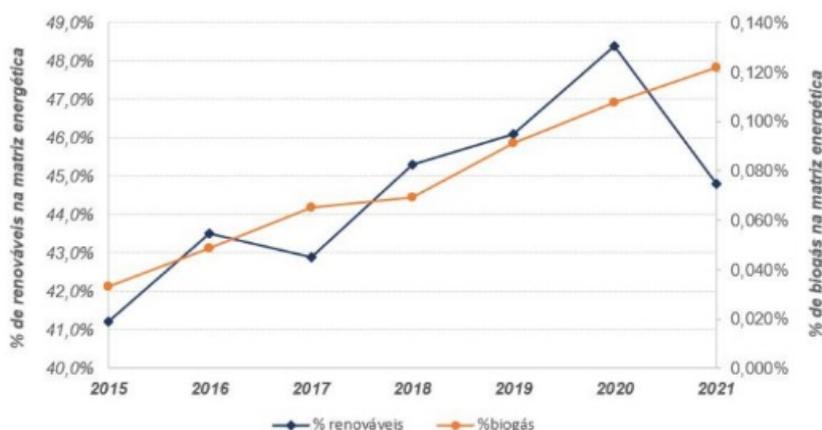


Fonte: Adaptado de BEN, EPE; 2022.

No entanto, analisando o histórico da matriz energética brasileira no período de 2015 a 2021 (conforme exibido na Figura 5.3), é evidente que à medida que as fontes de energia renovável ganhavam terreno, o biogás também se tornava mais proeminente. Embora em 2021 tenha sido observada uma redução na participação das fontes renováveis na matriz, devido à queda na oferta de energia hidráulica devido à escassez hídrica e ao aci-

onamento de usinas térmicas [3], o biogás continuou a exibir um crescimento constante. Esse contexto aponta para uma tendência de expansão da Indústria de Biogás no Brasil, sustentando a motivação subjacente ao presente estudo.

Figura 5.3: Evolução, entre o período de 2015 a 2021, da participação das energias renováveis e do biogás, em especial, na matriz energética brasileira



Fonte: Produzido pelo Autor (BEN, 2022; 2021; 2020; 2019; 2018; 2017; 2016).

5.2 CENÁRIO PRODUTIVO DO BIOGÁS

Até o ano de 2021, a produção anual de biogás totalizava cerca de 2,3 bilhões de metros cúbicos [11]. No entanto, o país apresenta a capacidade de ampliar em curto prazo quase 5 vezes sua produção, correspondendo a 10,8 bilhões de metros cúbicos, e um potencial total muito maior, com capacidade para produzir aproximadamente 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano de biogás bruto [11]. Essa projeção leva em consideração os setores industrial, agrícola e de saneamento. É notável que apenas 3% desse potencial é efetivamente aproveitado, indicando que existe uma vasta margem de oportunidade para impulsionar o crescimento da produção de biogás no Brasil, com uma perspectiva de aumento em cerca de 97% [11].

No período de 2017 a 2021, o número de instalações de plantas de biogás em operação no Brasil aumentou consideravelmente, impulsionando a produção nacional. Esse crescimento resultou em mais do que o dobro da produção de biogás destinado ao uso energético, como ilustrado na Figura 5.4 [11].

Figura 5.4: Crescimento da Indústria de Biogás entre o período de 2017 a 2021



Fonte: Panorama do Biogás no Brasil 2021, CIBIOGÁS; 2022

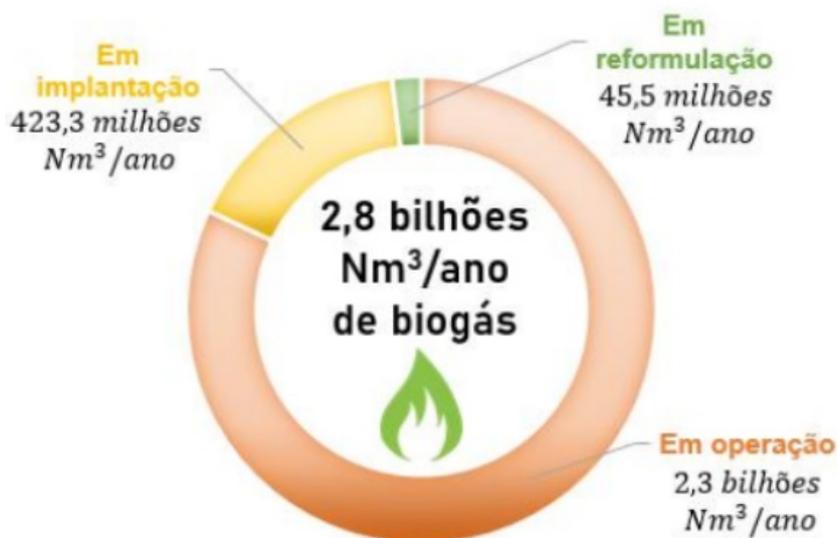
Para maximizar a exploração do vasto potencial de produção de biogás no país (84,6 bilhões de metros cúbicos por ano), é imperativo impulsionar o crescimento da produção nos próximos anos. O Brasil deve atingir uma produção de biogás de 6,9 bilhões de metros cúbicos por ano até 2030 [58], representando menos de 10% do potencial total. Assim, é crucial analisar as localidades geográficas com maior relevância nacionalmente e regionalmente para instalação de novas unidades geradoras de biogás que poderiam catalisar o aumento do potencial nacional de produção de biogás

5.3 PLANTAS DE BIOGÁS NO BRASIL

Até o ano de 2021, os dados do Biogas Map e Biogas Data [11], registraram um total de 811 plantas de biogás distribuídas por todo o território brasileiro. Essas plantas foram categorizadas de acordo com seu status operacional: 755 plantas estavam identificadas como "em operação", representando 93% do total; 44 plantas estavam "em implantação"; e 12 plantas estavam "em reformulação".

As plantas em operação são responsáveis pela produção de 2,35 bilhões de metros cúbicos de biogás anualmente [11]. Levando em consideração o potencial de produção das plantas em processo de implantação e reformulação, o Brasil tem o potencial de alcançar uma produção anual de 2,8 bilhões de metros cúbicos (Figura 5.5).

Figura 5.5: Distribuição do volume de biogás produzido no Brasil de acordo com o status operacional



Fonte: Biogas Map e Biogas Data (CIBIOGÁS; 2022)

5.3.1 Plantas em operação

Tendo em vista que as plantas em operação são as que, de fato, se encarregam da produção de biogás no Brasil, é válido um estudo mais detalhado e crítico das mesmas.

5.3.1.1 Porte

As plantas de biogás no Brasil são classificadas em três categorias com base em seu porte (pequeno, médio e grande), determinado pelo volume de biogás produzido [11], como ilustrado na Figura 5.6.

Figura 5.6: Classificação do porte das plantas de acordo com o volume de biogás produzido

Porte da Planta	Volume de biogás produzido (Nm ³ /ano)
Pequeno	≤ 1 milhão
Médio	> 1 milhão e ≤ 5 milhões
Grande	> 5 milhões

Fonte: Biogas Map (CIBIOGÁS; 2021)

O Brasil é dominado por plantas de pequeno porte, representando 79% das instalações em operação, porém contribuindo apenas com 8% da produção total do país. Em contraste, as plantas de grande porte, correspondendo a 7% do número total de instalações,

são responsáveis por 82% de toda a produção nacional. Essa discrepância é evidenciada na Figura 5.6 e pode ser um dos fatores explicativos da produção de biogás atual ser tão irrelevante diante do vasto potencial nacional, correspondendo a um aproveitamento de somente 3% do potencial total.

Figura 5.7: Plantas em operação no Brasil agrupadas de acordo com o porte

Porte	PLANTAS		VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO	
	Quantidade	Porcentagem	Quantidade Nm³/ano	Porcentagem
Pequeno	595	79%	178.340.000	8%
Médio	109	14%	236.660.000	10%
Grande	51	7%	1.930.000.000	82%
TOTAL	755	100%	2.345.000.000	100%

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

5.3.1.2 Fonte de substrato

A produção de biogás no Brasil é alimentada por matéria orgânica proveniente de três principais fontes (conforme Capítulo 3): resíduos agropecuários, resíduos industriais e, por fim, esgotos sanitários e/ou RSU, obtidos de ETE e aterros sanitários.

As plantas de biogás em operação no Brasil foram categorizadas de acordo com a origem do substrato, como apresentado na Figura 5.8. A geração de biogás a partir de resíduos agropecuários é predominante (80% das plantas usam esses resíduos como matéria-prima). Esse cenário reflete a história do desenvolvimento do biogás no país, uma vez que os primeiros avanços e incentivos para sua geração e uso surgiram a partir de resíduos agropecuários em áreas rurais. Por essa razão, é natural que o país possua mais conhecimento técnico sobre a produção de biogás a partir desses resíduos, o que contribui para sua maior disseminação.

Figura 5.8: Agrupamento, a partir da fonte de substrato, das plantas de biogás em operação no Brasil

Fonte do Substrato	PLANTAS		VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO	
	Quantidade	Porcentagem	Quantidade Nm³/ano	Porcentagem
Agropecuária	606	80%	240.630.000	10%
Indústria	84	11%	367.680.000	16%
RSU e Esgoto	65	9%	1.740.000.000	74%
TOTAL	755	100%	2.348.310.000	100%

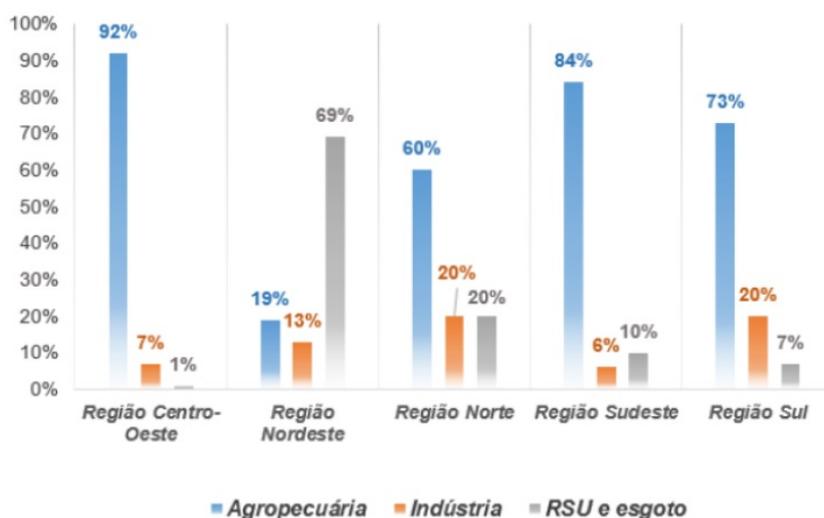
Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

Porém, é importante ressaltar que, embora as plantas que usam resíduos agropecuários sejam mais numerosas, elas contribuem apenas com 10% de toda a produção de biogás

no país. Esse fato se deve ao predomínio de plantas de pequeno porte nas áreas rurais, historicamente voltadas para o uso local do biogás, em vez de sua geração distribuída.

Ao abrir a distribuição de plantas de acordo com a origem de substrato por grandes regiões do Brasil (Figura 5.9), nota-se, que o padrão nacional de maior número de plantas voltadas para a utilização de resíduos da agropecuária se repete dentro das grandes regiões.

Figura 5.9: Distribuição de plantas de acordo com a origem de substrato por grandes regiões do Brasil



Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

5.3.1.3 Aplicação energética

O levantamento das plantas de biogás conduzido pela CIBiogás focalizou aquelas que empregam o biogás para fins energéticos. Essa abordagem permitiu categorizar as plantas de acordo com suas aplicações energéticas, conforme evidenciado na Figura 5.9. Nota-se que a geração de energia elétrica a partir do biogás é amplamente disseminada e se destaca em relação às outras aplicações. No entanto, chama a atenção a escassa presença de plantas produtoras de biometano (GNR) voltadas para o Setor de Transporte.

No ano de 2021, o Setor de Transporte representou o maior consumidor de energia no Brasil, absorvendo 32,54% do Consumo de Energia Total (OIE) [3]. Além disso, o transporte foi o subsetor energético mais emissor em termos de gases de efeito estufa no país. O elevado consumo de energia nesse setor evidencia sua influência substancial na matriz energética nacional e, devido à sua considerável poluição, a descarbonização do país está intrinsecamente ligada à diminuição das fontes de energia fósseis no transporte, que em 2021 contava com apenas 23% de fontes renováveis [3].

No contexto do Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e 50% até 2030 ([59, 60]. Para alcançar essas metas, é imperativo implantar mudanças substanciais no Setor Energético, particularmente

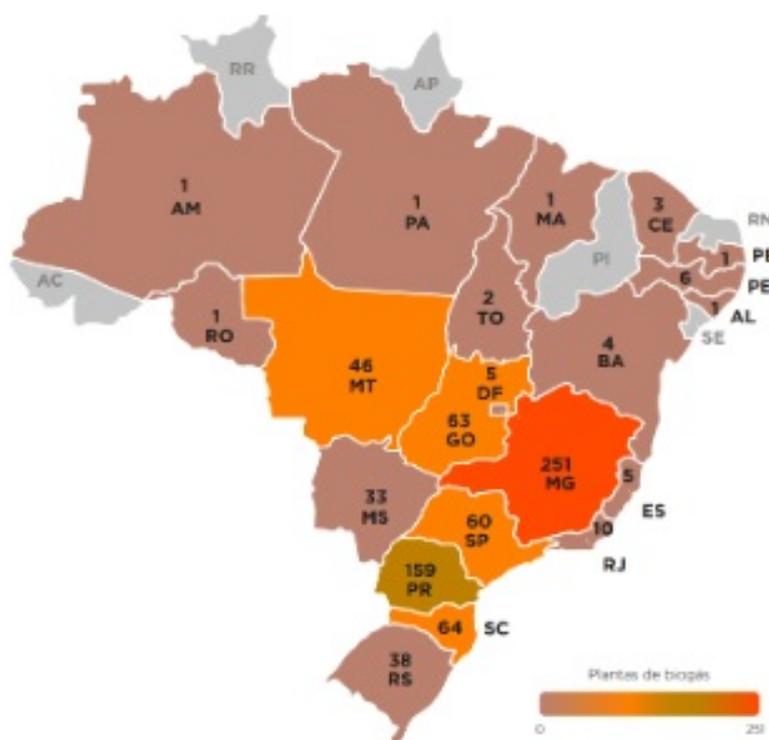
no transporte, dada sua relevância tanto em termos de consumo de energia quanto de poluição ambiental. O plano do Brasil no âmbito do Acordo de Paris visa expandir o uso de biocombustíveis, incluindo biocombustíveis avançados, conhecidos como de segunda geração por empregarem resíduos em vez de matérias-primas dedicadas em sua produção [59].

Considerando esses fatos, existe uma notável oportunidade e incentivo para ampliar a utilização do biometano (GNR) no Setor de Transporte. Embora a aplicação na geração de energia elétrica esteja mais estabelecida, uma vez que não exige um processo de purificação tão extenso e complexo quanto o necessário para o biometano, é fundamental concentrar esforços para consolidar e expandir a produção de biogás como combustível veicular. Isso visa tornar o Setor de Transporte, de grande importância no Brasil, mais sustentável e renovável.

5.3.1.4 Localização das plantas de biogás no Brasil

A localização atual das plantas produtoras de biogás também é exibida ao longo do relatório, e vemos na Figura 5.10 a concentração em alguns estados brasileiros como Minas Gerais e Paraná.

Figura 5.10: Contagem por estado da quantidade de plantas de biogás no Brasil

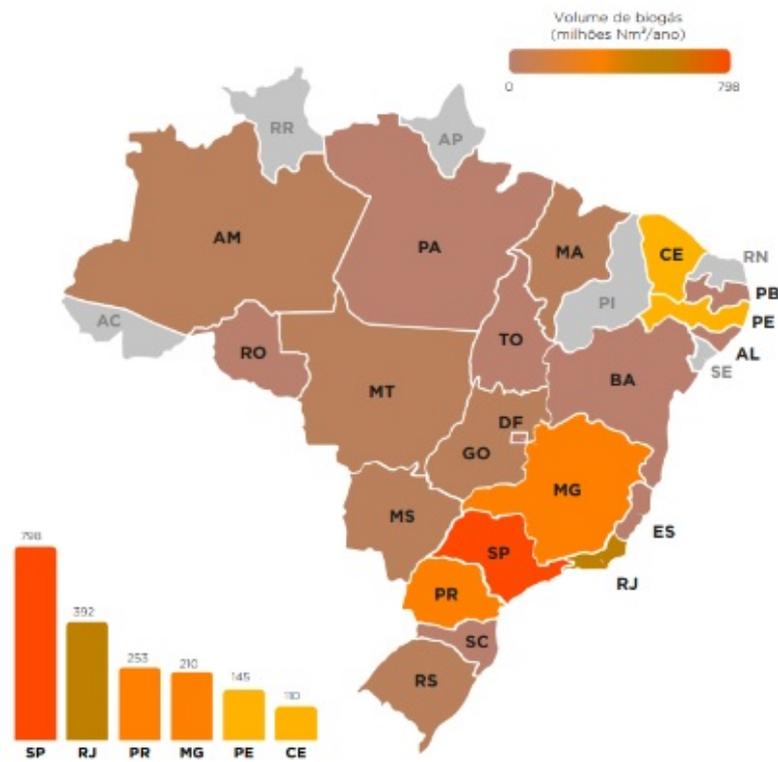


Fonte: CiBiogás,2022

Entretanto, mesmo com a maior quantidade em números de plantas nos estados apontados, a quantidade produzida de biogás segue um diferente padrão, como podemos ver

na Figura 5.11, sendo os maiores produtores São Paulo e Rio de Janeiro.

Figura 5.11: Ranking dos estados brasileiros em relação a volume de biogás produzido



Fonte: CiBiogás,2022

6 ÁREA DE ESTUDO - REGIÃO SUL

Neste capítulo, serão abordados os motivos da escolha da área de estudo, além de dados e características acerca do cenário produtivo e status atual das plantas de produção de biogás na Região Sul com informações acerca de porte, fonte de substrato, aplicação energética e localização. Adicionalmente será apresentado o panorama tecnológico das unidades de produção de biogás na Região Sul do país, acerca das tecnologias utilizadas nas etapas de pré-tratamento, produção e purificação do biogás, além das principais aplicações energéticas. Este capítulo servirá como forma de contextualização e atendimento ao objetivo específico número 2 e 3 deste trabalho. O potencial da indústria de biogás está distribuído em todo território nacional, porém, a região Sul do Brasil se destaca, por apresentar pujante crescimento do agronegócio, sendo este o segmento com maior representatividade em número de plantas de biogás em operação no país, mas com baixo volume produzido.

A região Sul do Brasil detém uma participação relevante de atividades vinculadas ao agronegócio em sua economia. Grande parte destas atividades estão voltadas à produção e processamento de proteína animal e seus derivados, que por sua vez, são responsáveis pela geração de volumes consideráveis de biomassa residual. A região também é considerada um importante celeiro, onde culturas como soja, milho, trigo e arroz são produzidos e escoados via transporte rodoviário e ferroviário até os portos no litoral ou para abastecer o mercado interno.

Entretanto, o desastre climático ocorrido no Rio Grande do Sul foi uma tragédia marcada por intensas chuvas que provocaram enchentes devastadoras e deslizamentos de terra e impactaram bastante a economia da região Sul. Em setembro de 2023 e abril de 2024, o estado enfrentou um período de precipitações extraordinariamente fortes, resultando em enchentes rápidas e severas que afetaram várias regiões, com rios transbordando e inundando áreas urbanas e rurais.

As enchentes causaram a destruição de infraestruturas, incluindo pontes, estradas e edificações, deixando muitas comunidades isoladas e dificultando o acesso para equipes de resgate e ajuda humanitária. Além disso, deslizamentos de terra ocorreram em diversas localidades, destruindo casas e causando danos significativos às plantações, o que impactou gravemente a agricultura local.

Este evento climático extremo destacou a vulnerabilidade do Rio Grande do Sul e de

outros estados da região Sul a desastres naturais e a necessidade de políticas de prevenção e mitigação mais robustas.

Dessa forma, o desenvolvimento econômico da indústria de biogás, especialmente através do uso de resíduos da agropecuária, pode desempenhar um papel fundamental na reconstrução do estado do Rio Grande do Sul após o desastre climático. A produção de biogás a partir de resíduos agropecuários oferece uma fonte de energia renovável e estável, que pode ser utilizada para gerar eletricidade e calor, garantindo o fornecimento energético para comunidades e indústrias afetadas, promovendo a autossuficiência energética e reduzindo a dependência de fontes não-renováveis.

A indústria de biogás pode ainda contribuir para a resiliência climática do Rio Grande do Sul ao promover práticas sustentáveis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A adoção de tecnologias de energia renovável ajuda a mitigar os impactos das mudanças climáticas, uma das causas dos desastres climáticos cada vez mais frequentes. Ao desenvolver a indústria de biogás, o estado pode diversificar sua economia rural, que atualmente depende fortemente da agricultura convencional, proporcionando uma fonte adicional de renda para os agricultores e contribuindo para a estabilidade econômica das comunidades rurais.

6.1 CENÁRIO PRODUTIVO DO BIOGÁS NA REGIÃO SUL

Os três estados do Sul acumulam um potencial de quase 3 bilhões Nm³/ano de biogás, o que representaria 6.129,81 GW a mais de energia para o Sistema Interligado Nacional (SIN) ou 2.321.932 residências abastecidas, a partir de substratos da suinocultura, bovinocultura, avicultura, unidades de processamento de mandioca, laticínios, abatedouros, cervejarias e usinas sucroenergéticas, como exibido na Figura 6.1.

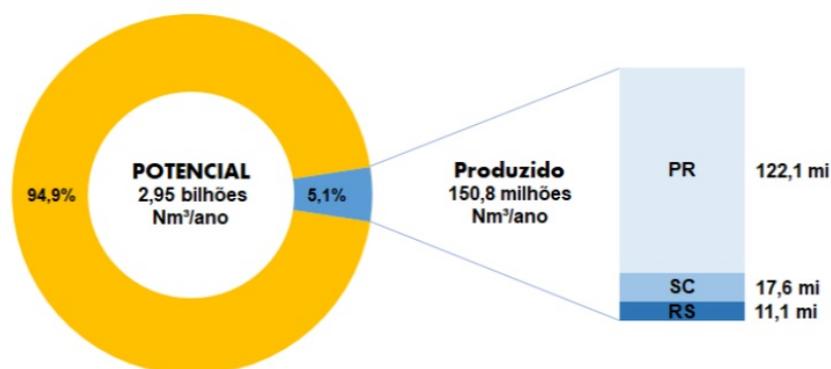
Figura 6.1: Potencial total de produção de biogás na Região Sul e suas equivalências



Fonte: CiBiogás,2022

De forma análoga à realidade nacional, a região Sul explora apenas 5,1% (cerca de 150,8 milhões Nm³/ano) do potencial de produção de biogás que possui [61], como pode ser visualizado na Figura 6.2, evidenciando um potencial de expansão.

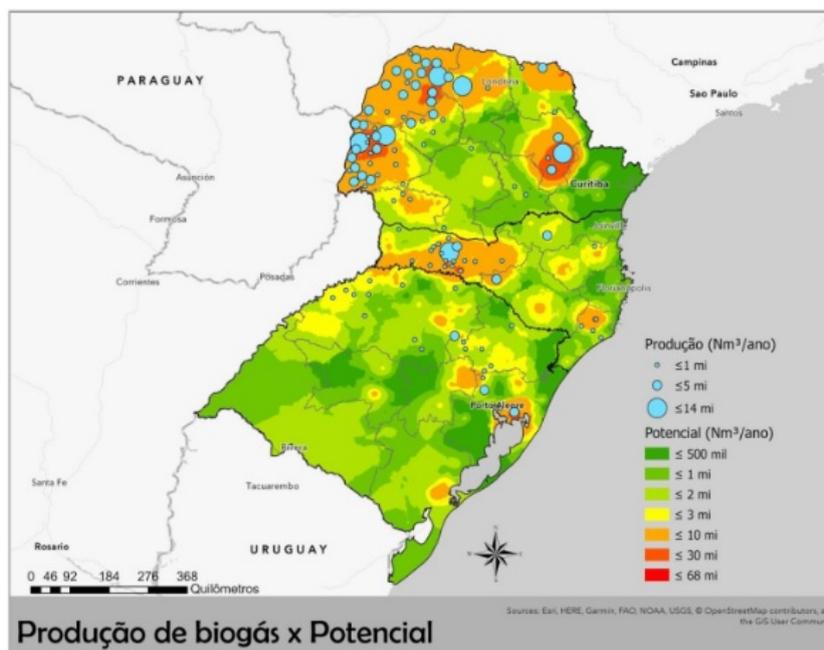
Figura 6.2: Volume de biogás produzido na Região Sul comparado ao potencial a ser explorado



Fonte: CiBiogás,2020

Pode-se visualizar esse potencial geograficamente na região [61], como exibido na Figura 6.3.

Figura 6.3: Distribuição espacial do localização atual das plantas de biogás da região Sul e o potencial ao longo dos estados



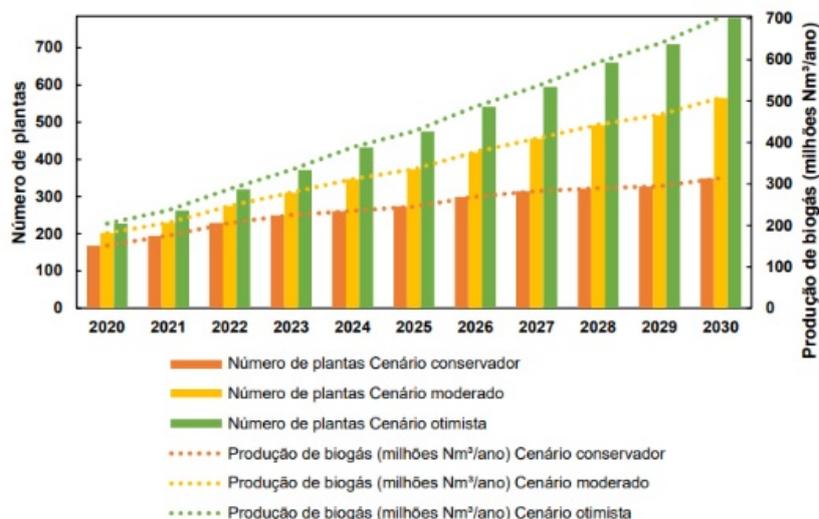
Fonte: CiBiogás,2020

A Indústria Agropecuária é o segmento com maior número de plantas de biogás em operação nos estados sul brasileiros, englobando 71% das unidades de produção da região, e que concentra o maior potencial de produção, com volume acumulado de 1,4 bilhão Nm³/ano. Dentre os substratos mais utilizados, cerca de 66%, são resíduos provenientes da suinocultura cujo potencial de produção é de 890,9 mi Nm³/ano [61, 62].

Ao longo do período entre 2015 e 2019, as unidades produtoras de biogás em operação no sul do Brasil, que realizam seu aproveitamento energético, cresceram a uma taxa média de 21% a.a. Somente entre 2018 e 2019, houve um aumento de 23% no número de novas plantas em operação. O mesmo avanço pode ser observado no volume de biogás aproveitado, que entre 2018 e 2019 contou com um crescimento de 13% [61].

Seguindo a tendência de crescimento dos anos subsequentes, realizou-se uma estimativa de expansão do setor na região para os próximos dez anos a partir do modelo de Holt-Winters [63, 64] (Suavização Exponencial Tripla), considerando três cenários distintos, classificados como conservador (crescimento médio de 7% a.a.), moderado (crescimento médio de 11% a.a.) e otimista (média de 13% a.a.) [61], apresentado na Figura 6.4.

Figura 6.4: Projeção de crescimento para plantas com produção de biogás - sul do Brasil

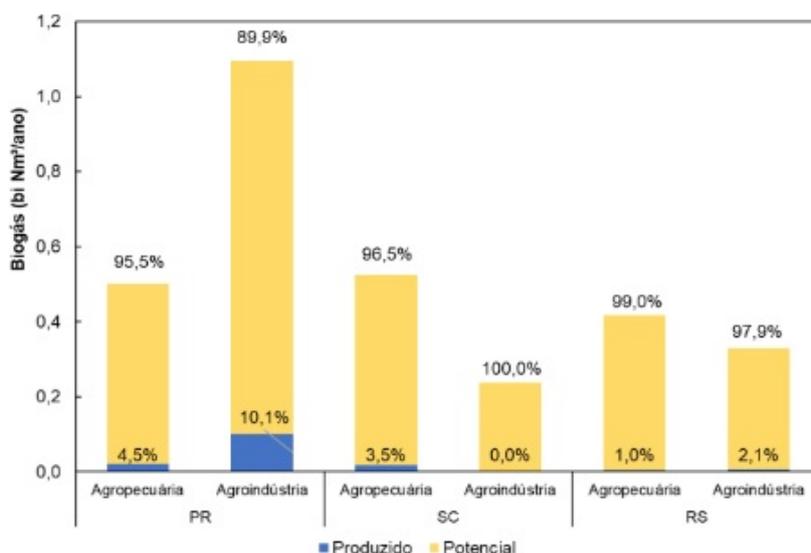


Fonte: CiBiogás, 2020

O cenário moderado segue a linha de tendência de crescimento atual de unidades produtoras de biogás, sendo os cenários conservador e otimista uma variação média de 2 e 4% a.a. (para mais e para menos respectivamente) na expectativa de crescimento. O cenário conservador indica uma adesão de 183 novas plantas de biogás até 2030 com uma produção de 314 milhões de Nm³/ano de biogás. O cenário moderado prevê 565 unidades produtoras de biogás em operação no sul do Brasil até o ano de 2030, produzindo cerca de 509 milhões de Nm³/ano de biogás (cerca de 17% do potencial atual). Já o cenário mais otimista destaca um total de 781 plantas de biogás até 2030, com uma produção de biogás de 703 milhões Nm³/ano (em torno de 24% do potencial atual)[61].

É possível também identificar a baixa adoção na produção e aproveitamento de biogás tanto na indústria agropecuária quanto agroindustrial nos estados da região Sul, de forma a possibilitar um grande crescimento nesses dois segmentos, como podemos observar na Figura 6.5.

Figura 6.5: Volume de biogás produzido em comparação com o potencial a ser explorado na Região Sul, separado por estados e setores agropecuário e agroindústria



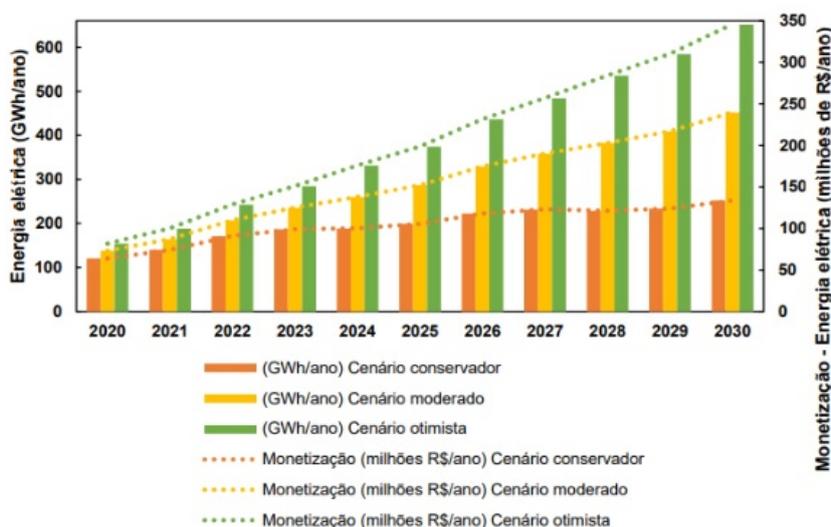
Fonte: CiBiogás,2020

6.2 CENÁRIO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ORIUNDA DE BIOGÁS NA REGIÃO SUL

Já avaliando-se as unidades produtoras de biogás para geração de energia elétrica, 68% das plantas em operação no Sul fazem uso do biogás na forma de energia elétrica, consumindo cerca de 155 milhões Nm³/ano, totalizando uma potência instalada aproximada de 41,5 MW [61].

A perspectiva de crescimento para plantas que utilizam o biogás para geração de energia elétrica e a estimativa de monetização para os próximos dez anos, pode ser visualizada na Figura 6.6. A análise inclui a projeção para diferentes cenários (segundo o modelo de Holt-Winters [63, 64]), sendo que, o cenário moderado segue a linha de tendência de crescimento atual do uso do biogás na produção de energia elétrica (média de 13% a.a.), já para os cenários conservador e otimista, foi adotada uma variação de 3 e 5% a.a. (para mais e para menos respectivamente) na expectativa de crescimento [61].

Figura 6.6: Projeção de crescimento para plantas com produção de energia elétrica - sul do Brasil



Fonte: CiBiogás,2020

O cenário conservador, com uma perspectiva de crescimento médio do setor de 8% a.a., indica uma oportunidade de produção de 252 GWh/ano de energia elétrica a partir de novas plantas de biogás, podendo gerar uma monetização de 134 milhões de reais por ano. O cenário moderado (crescimento médio do setor de 13% a.a.) propõe uma produção de 452 GWh/ano de energia elétrica até 2030, com monetização de 240 milhões de reais/ano. Já o cenário mais otimista, que destaca um crescimento médio de 16% a.a., prevê uma produção de 652 GWh/ano de energia elétrica até 2030, com monetização de 346 milhões de reais [61].

Assim, a Indústria Agropecuária surge como uma grande reserva inexplorada e necessita de cada vez mais estudos que subsidiem a adoção de arranjos produtivos para o desenvolvimento da indústria de biogás advindo do setor, em especial para instalação de unidades produtoras de biogás voltadas para a geração de energia em modelo *Gas-to-Wire*.

6.3 SUINOCULTURA NA REGIÃO SUL

O Brasil integra o grupo de países que mais produzem e exportam carne suína no mundo. Dentro da cadeia nacional da Suinocultura, destacam-se os estados do sul do Brasil como maiores produtores e exportadores de carne suína do país[30], fator este que reforça a necessidade de uma maior concentração de animais alojados para atendimento da demanda de mercado (EMBRAPA, 2020), como exibido a seguir pelas Figuras 6.7 e 6.8

Figura 6.7: Suinocultura por regiões



Fonte: Associação Brasileira dos Criadores de Suínos,2021

Figura 6.8: Produção de carnes no Brasil de 2017 a 2021 (toneladas de carcaças)

	BOVINOS	CRESC.	SUÍNOS	CRESC.	FRANGOS	CRESC.
2017	7.681.538		3.824.682		13.607.352	
2018	7.954.742	3,56%	3.950.759	3,30%	13.511.750	-0,70%
2019	8.218.851	3,32%	4.125.728	4,43%	13.516.525	0,04%
2020	7.824.888	-4,79%	4.482.048	8,64%	13.765.603	1,84%
2021	7.408.322	-5,32%	4.890.652	9,12%	14.615.320	6,17%
ACUMULADO 2021-2017		-3,56%		27,87%		7,41%

Fonte: Associação Brasileira dos Criadores de Suínos,2021

A suinocultura da região sul tem potencial para produzir 890,8 mi Nm³/ano de biogás[62], de forma a ser possível visualizar o potencial produtivo de cada estado na Figura 6.9.

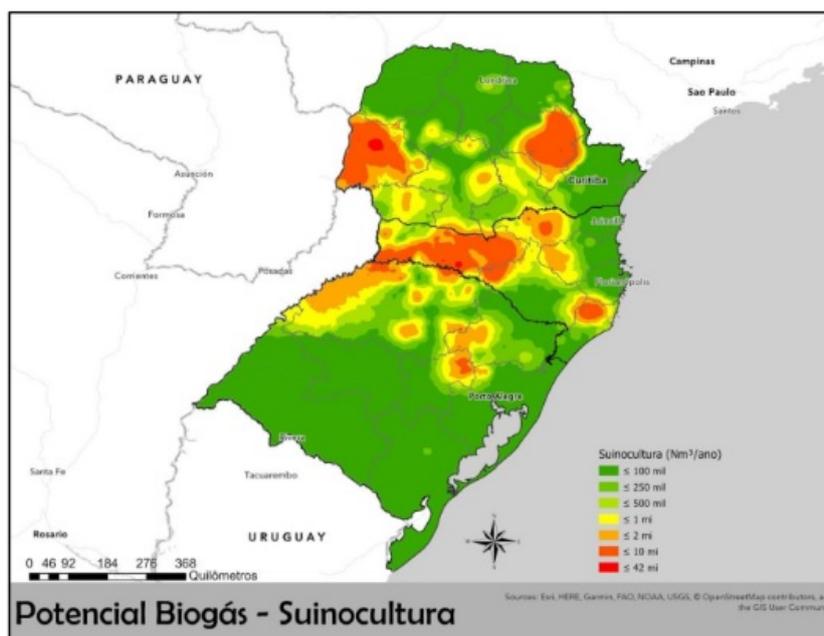
Figura 6.9: Ranking de Potencial de produção de biogás da suinocultura na Região Sul

Ranking Estadual	Potencial (Nm ³ /ano)
Santa Catarina	384,3 mi
Rio Grande do Sul	256,6 mi
Paraná	249,9 mi

Fonte: CIBiogás,2020

O potencial de produção de biogás da suinocultura no sul do Brasil (890,8 mi Nm³/ano) tem capacidade de gerar 1,8 mil GWh/ano de energia elétrica [62]. Pode-se ver esse potencial de biogás na suinocultura distribuído geograficamente [62] na Figura 6.10.

Figura 6.10: Potencial espacializado de produção de biogás da suinocultura nos estados do Sul do Brasil.



Fonte: CIBiogás,2020

Os três estados do Sul acumulam um potencial de quase 900 milhões Nm³/ano de

biogás, o que representaria 1.849,06 GW a mais de energia para o SIN ou 700.171 residências abastecidas, suprimindo até 6% da demanda rural de energia no país [62], a partir de substratos da suinocultura como exibido na Figura 6.11.

Figura 6.11: Potencial total de produção de biogás derivado da suinocultura na Região Sul e suas equivalências



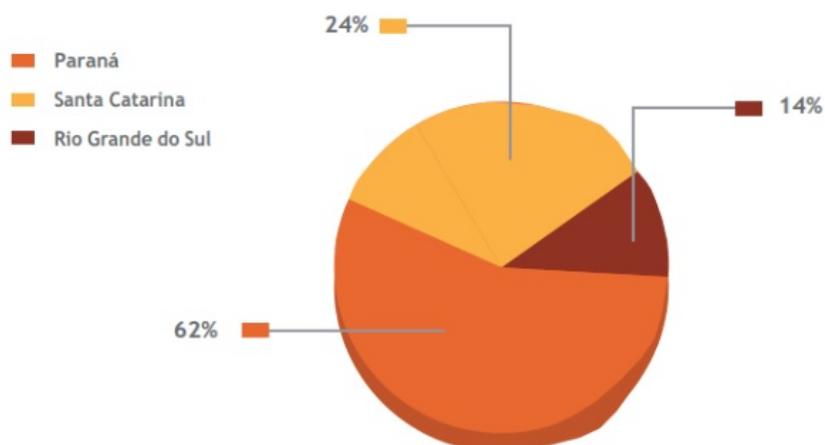
Fonte: CIBiogás,2020

6.4 PANORAMA TECNOLÓGICO DAS PLANTAS DE BIOGÁS NA REGIÃO SUL

A partir de mapeamento [11], com visitas que concentraram-se em plantas cujas unidades de produção processavam substratos provenientes de suinocultura, bovinocultura, avicultura, mandioca, leite e/ou efluentes resultantes do abate de animais foi possível um diagnóstico do status tecnológico atual da região Sul.

A identificação das plantas foi realizada por meio da plataforma digital BiogasMap [11], que registra unidades de produção de biogás com aplicações elétricas, térmicas e/ou biometano. O desfecho foi a escolha de 58 plantas de biogás, abrangendo 36 unidades no Paraná (62%), 14 em Santa Catarina (24%) e 8 no Rio Grande do Sul (14%), visualizado na Figura 6.12.

Figura 6.12: Plantas avaliadas por estado da região sul.



Fonte: CIBiogás, 2022

O substrato usado em cada planta pode ser visualizado na Figura 6.13.

Figura 6.13: Número total de plantas avaliadas por substrato na região sul.

Substrato	Número total de plantas visitadas no sul do Brasil
Suínocultura	28
Fecularia	16
Codigestão	8
Bovinocultura	5
Abatedouro	1

Fonte: Adaptado de CiBiogás, 2022

Figura 6.14: Distribuição dos substratos utilizados nas plantas de biogás na região sul.



Fonte: Adaptado de CiBiogás, 2022

Para cada planta, um levantamento abrangente de natureza técnica, financeira e social foi conduzido com a finalidade de compor um mapeamento detalhado. A partir desse diagnóstico, possibilitou-se uma identificação do status quo tecnológico das unidades industriais da região sul do país e permitindo a avaliação do ritmo que a Indústria do Biogás vem incorporando novos equipamentos e sistemas dentro de suas cadeias produtivas, e qual a origem do suprimento das novas tecnologias. Assim, viabiliza-se o desenho de políticas de industrialização e de instrumentos financeiros como taxas de importação e subsídios a fábricas nacionais, por parte do poder público.

6.4.1 Tecnologias empregadas

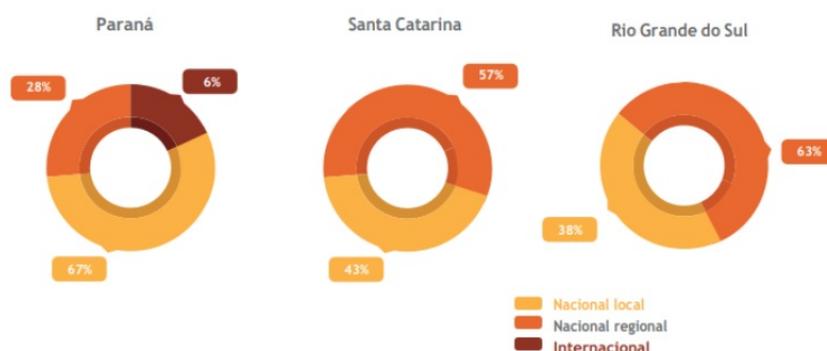
6.4.1.1 Origem das tecnologias

A localização dos fornecedores de equipamentos para os sistemas de biodigestão exerce um impacto sobre os custos de implantação, manutenção e assistência técnica. Muitos equipamentos utilizados na produção de biogás foram adaptados de outras tecnologias. Dito isso, atualmente, cerca de 90% das máquinas e equipamentos necessários para produção e utilização do biogás e do biometano são produzidos no país. Equipamentos como bombas, motogeradores e materiais para construção civil, como cimento, aço e lonas são a base para implementação e operação de biodigestores [10].

As origens das tecnologias empregadas nos sistemas de biodigestão, os equipamentos utilizados para a aplicação do biogás e o monitoramento das plantas em três categorias: origem local (fornecedores no mesmo território da planta de biogás), origem regional (fornecedores localizados no estado onde a planta está implantada ou em outras partes do Brasil) e origem internacional (fornecedores com tecnologias provenientes de fora do Brasil)[65].

Os resultados indicam que os fornecedores locais estão em um constante processo de desenvolvimento, representando 53% das plantas consultadas[65], como pode ser visualizado na Figura 6.16. É possível identificar uma relação direta e proporcional entre a concentração de plantas de biogás e a disponibilidade de fornecedores, o que reflete o desenvolvimento impulsionado pela demanda do mercado, que é moldada por produtores e agroindústrias [11].

Figura 6.15: Origem da Tecnologia do Sistema de Biodigestão por Estado.



Fonte: CiBiogás, 2022

Nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os fornecedores têm uma predominância regional, enquanto no estado do Paraná, o cenário é de maior desenvolvimento, incorporando fornecedores tanto nacionais quanto internacionais. No Paraná, é possível observar um número consideravelmente maior de fornecedores em comparação aos outros estados.

6.4.1.2 Transporte do Substrato

Algumas plantas de produção de biogás adotam arranjos técnicos que envolvem o transporte de substratos para uma central de tratamento, onde o material é armazenado, preparado e processado em sistemas de biodigestão anaeróbica. No entanto, apenas 9% das plantas analisadas adotam esse modelo de transporte de substratos. Geralmente, essas unidades de produção que optam pelo transporte de substratos adotam a codigestão, ou seja, alimentam o biodigestor com dois ou mais tipos de substratos [65].

Além disso, é importante considerar o raio de coleta dos substratos para arranjos com transporte de biomassa, uma vez que isso afeta os custos operacionais. Nas unidades analisadas, as distâncias percorridas variaram de 5 a 150 km. As maiores distâncias foram associadas às unidades que recebem resíduos de diversos setores, principalmente do Setor Agroindustrial [65].

6.4.1.3 Pré-tratamento

A etapa inicial em uma planta de biodigestão, a partir da identificação das características dos substratos, é a definição de um pré-tratamento (Conforme Seção 3.2.3). Cerca de 75% das plantas analisadas adotam algum tipo de pré-tratamento em seus substratos. Entre as opções disponíveis, os pré-tratamentos físicos são os mais utilizados, correspondendo a aproximadamente 40% das unidades que empregam substratos provenientes de efluentes da suinocultura e processamento de mandioca. Além disso, cerca de 35% das fecularias consultadas optam por pré-tratamentos biológicos. Isso indica que os pré-tratamentos

físicos são mais amplamente adotados devido aos custos envolvidos e à disponibilidade de equipamentos no mercado [65].

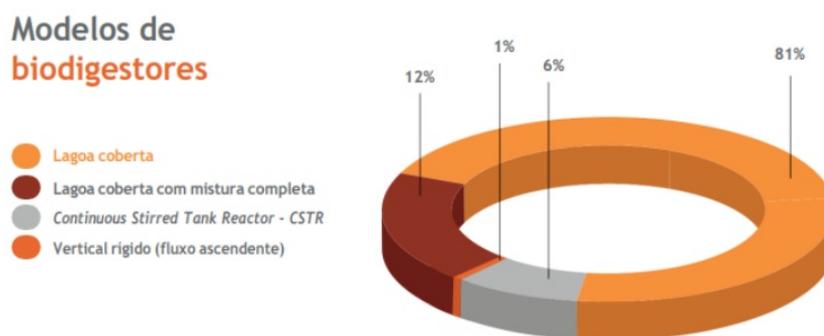
6.4.1.4 Tecnologias de biodigestão

O ponto central de uma unidade de produção de biogás é o biodigestor (Conforme Seção 3.2.5), de maneira que os tipos identificados em operação no Sul do Brasil, foram identificados quatro modelos, sendo:

- Biodigestor Lagoa Coberta (BLC);
- Biodigestor Lagoa Coberta (BLC) com mistura completa;
- Tanque de Agitação Contínua (CSTR) e;
- Biodigestor vertical rígido.

O sistema de BLC é o mais comumente encontrado, presente em 81% das plantas analisadas, conforme Figura 6.16. O BLC é caracterizado por possuir um baixo nível tecnológico, além de ser de fácil construção e operação. Devido a essas vantagens, ele é amplamente utilizado em propriedades rurais e agroindústrias para o tratamento de efluentes com baixa taxa de sólidos totais.

Figura 6.16: Modelos de biodigestores utilizados em plantas de biogás na Região Sul.



Fonte: CiBiogás, 2022

Quanto aos substratos empregados nos BLC, observa-se uma variedade de opções. Abatedouros de animais lideram o uso desse sistema, sendo adotado em 100% das unidades consultadas, seguidos pelas feculárias, que utilizam o BLC em 95% dos casos[65], conforme a Figura 6.17.

Figura 6.17: Modelo do Biodigestor e substrato utilizado em plantas de biogás na Região Sul.



Fonte: CiBiogás, 2022

6.4.1.5 Aquecimento do substrato

Apesar das vantagens associadas ao uso de sistemas de aquecimento em biodigestores, sua adoção ainda é relativamente baixa, sendo encontrada em apenas 14% das instalações consultadas, como pode ser visualizado na Figura 6.18. O método de aquecimento mais comum empregado envolve a transferência térmica por meio de serpentinhas que transportam água aquecida dentro do biodigestor. Os tubos de polietileno reticulado, conhecidos como PEX, são frequentemente utilizados para essa finalidade, estando presentes em 38% das plantas analisadas[65].

Esses sistemas de aquecimento foram identificados em dois tipos de biodigestores, o CSTR e o BLC de mistura completa. Ambos compartilham características construtivas circulares que facilitam a instalação da tubulação no interior do biodigestor. Dentre os biodigestores CSTR inspecionados, todos apresentavam algum método de aquecimento implementado, enquanto nos BLC de mistura completa, apenas 20% faziam uso desse sistema de aquecimento[65].

Figura 6.18: Uso geral e por tipos de sistemas de aquecimento em plantas de biogás na Região Sul.

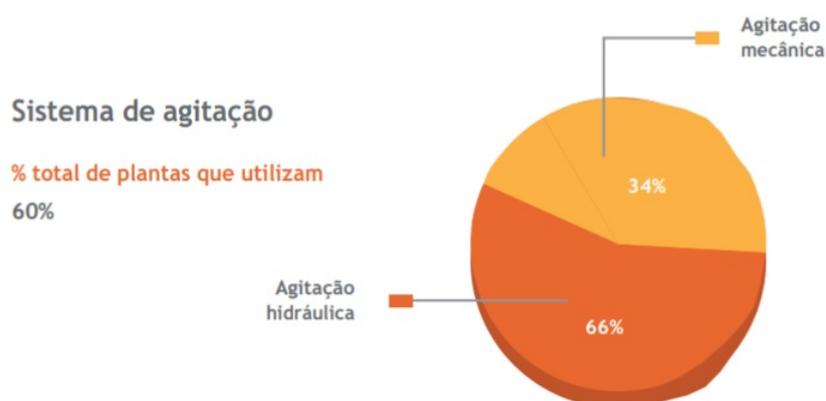


Fonte: CiBiogás, 2022

6.4.1.6 Agitação do substrato

Na análise das instalações pesquisadas, a agitação foi observada em 60% delas, sendo que os sistemas de agitação hidráulicos são os mais prevalentes, abrangendo 66% das instalações, enquanto os sistemas mecânicos compreendem 34% do total, como pode ser visualizado na Figura 6.19. Notavelmente, cerca de 86% dos BLC contam com sistemas de agitação hidráulica, com a maioria deles empregando efluentes da suinocultura para essa finalidade. Por outro lado, as plantas que processam efluentes de feccularia em geral não adotaram sistemas de agitação. Nos casos analisados, apenas 14% empregam agitação hidráulica [65].

Figura 6.19: Uso geral e por tipos de sistemas de agitação em plantas de biogás na Região Sul.



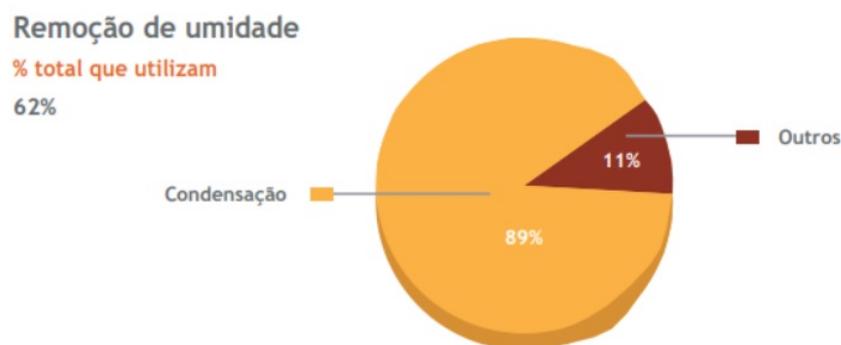
Fonte: CiBiogás, 2022

6.4.1.7 Tratamento do Biogás

- **Remoção de vapor d'água**

Os componentes que estão presentes no biogás, junto com o metano, têm um impacto negativo no seu poder calorífico. Isso é notável com a umidade, que não só reduz o valor energético do biogás, mas também pode causar corrosão em equipamentos, instrumentos e estruturas quando combinada com sulfeto de hidrogênio. Na remoção de vapor d'água, cerca de 62% das instalações analisadas tomam medidas para eliminar a umidade do biogás, com o método de condensação sendo o mais amplamente adotado, sendo utilizado em 89% das plantas [65], como pode ser visualizado na Figura 6.20.

Figura 6.20: Uso geral e por tipos de sistemas de remoção de umidade em plantas de biogás na Região Sul.

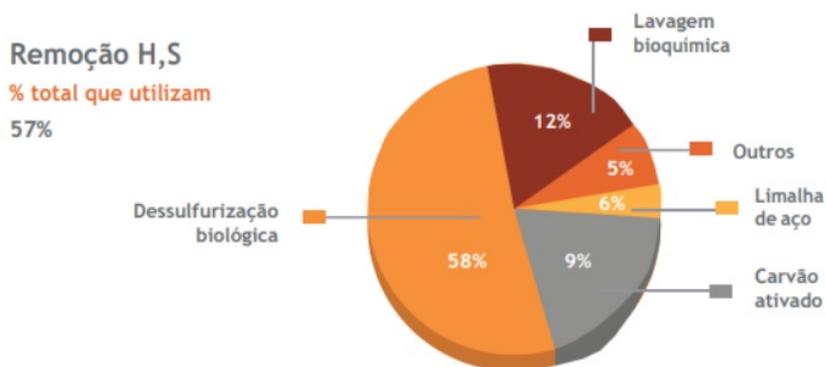


Fonte: CiBiogás, 2022

• Dessulfurização

Assim como a remoção da umidade, a eliminação do sulfeto de hidrogênio é essencial. No entanto, apenas 57% das instalações implementam tratamentos para remover o sulfeto de hidrogênio do biogás, como pode ser visualizado na Figura 6.21. Para realizar essa remoção, os métodos mais frequentemente empregados incluem a dessulfurização biológica, a utilização de carvão ativado e a lavagem bioquímica [65].

Figura 6.21: Uso geral e por tipos de sistemas de remoção de sulfeto de hidrogênio em plantas de biogás na Região Sul.

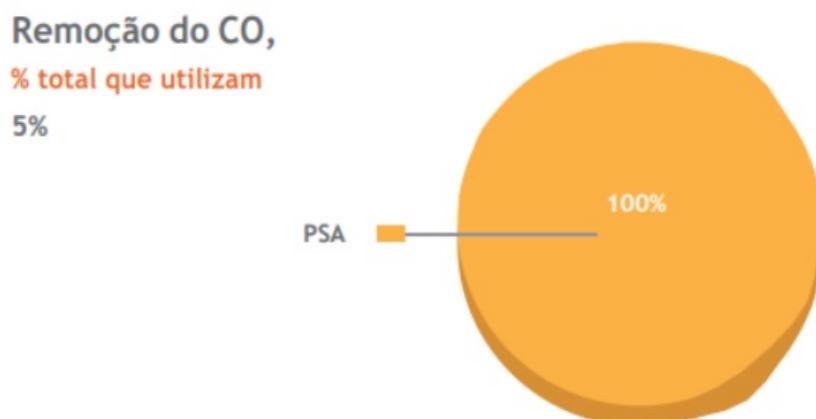


Fonte: CiBiogás, 2022

• Remoção de CO₂

Outro ponto importante no tratamento do biogás está a remoção do dióxido de carbono, onde as plantas avaliadas somente 5% utilizam sistemas do tipo, e todas adotam PSA [65], como pode ser visualizado na Figura 6.22.

Figura 6.22: Uso geral e por tipos de sistemas de remoção de dióxido de carbono em plantas de biogás na Região Sul.

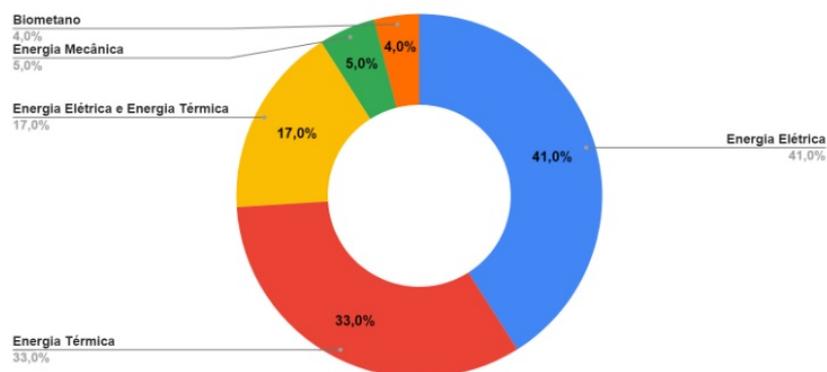


Fonte: CIBiogás, 2022

6.4.1.8 Aplicações do biogás

O biogás fornece energia renovável adequada para aplicações diversas, como pode ser evidenciado na Figura 6.23, onde visualiza-se cada uma das destinações utilizadas e sua respectiva participação nas plantas avaliadas da Região Sul.

Figura 6.23: Aplicações de uso do biogás em plantas de biogás na Região Sul.



Fonte: CiBiogás, 2022

A conversão da energia química contida nas moléculas do biogás em energia mecânica por meio da combustão é o processo subjacente ao aproveitamento do biogás como energia elétrica [66]. Nas plantas de biogás na região sul do Brasil que foram examinadas, a conversão do biogás em energia elétrica é a aplicação predominante, ocorrendo em 41% das instalações. Além disso, aproximadamente 33% das plantas utilizam o biogás como fonte de energia térmica, empregando-o para o aquecimento em processos como cocção de alimentos, aquecimento em sistemas de produção animal e substituindo o uso de madeira como fonte de calor [65].

A energia mecânica do biogás é aplicada em cerca de 5% das instalações, principalmente em motobombas para bombear o digestato em lavouras e pastagens. Geralmente, essa aplicação mecânica é complementar às três principais modalidades de aproveitamento do biogás (térmica, elétrica e biometano). No entanto, o uso do biogás para a produção de biometano ainda é pouco difundido nas plantas de biogás examinadas, sendo observado em apenas 5% delas [65].

7 METODOLOGIA

Neste capítulo, será abordado a metodologia utilizada neste trabalho para a análise multicritério realizada em software SIG, somada à metodologia feita para a prospecção tecnológica por meio de pesquisa bibliográfica e patentária. Para as duas metodologias, serão elencados as fontes dos dados, estratégias de pesquisa e funções no software SIG utilizadas. O conteúdo deste capítulo visa atender aos seguintes objetivos específicos deste trabalho:

1. Analisar o panorama geral do biogás no Brasil, e mais especificamente na região Sul debatendo pontos como: participação na matriz energética, cenário produtivo, potencial de produção, plantas em operação e como estas se distribuem em relação ao porte, substrato, aplicação e localização no território brasileiro;
2. Identificar e analisar localizações geográficas prioritárias para instalação de novas unidades produtoras de biogás;
3. Mapear tecnologias de tratamento anaeróbio de matéria orgânica e de purificação de biogás.

7.1 ANÁLISES ESPACIAIS

7.1.1 Análise Espacial Multicritério

Para realizar uma AMC adequada, foi necessário uma pesquisa bibliográfica inicial por artigos científicos que possuíssem metodologia e aplicações similares, de forma a identificar principais parâmetros a serem avaliados e peso de influência de cada camada de dados na análise. Ao identificar uma metodologia passível de ser replicada para o contexto brasileiro, torna-se necessário a correlação das camadas de dados utilizadas na metodologia original com suas contrapartes de dados no Brasil. Essa busca por camadas de dados nacionais pode ser realizada em bases de dados do governo federal como a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), ou bases de instituições públicas em seus respectivos endereços eletrônicos. Após a aquisição dos planos de informação a serem utilizados e a sua transformação em arquivos *raster*, utiliza-se os pesos atribuídos na metodologia original, respectivamente, para cada uma das camadas de dados. Tais pesos, originam-se

de atestados de especialistas no setor a ser analisado, e devem totalizar um valor integral de 100%. Com as camadas *raster* atreladas aos respectivos pesos, torna-se possível através da ferramenta *Raster Calculator* em SIG, computar um *raster* final, representativo de todos os planos de informação, de acordo com sua significância para a análise.

Assim, estruturou-se uma lista de palavras-chave que remetesse ao tema deste estudo, e que estivessem alinhadas com o uso de geoprocessamento, a partir da AMC, sendo ela um processo hierárquico analítico, aplicado ao campo de usinas de conversão de biomassa para biogás e utilização na geração de energia elétrica. Dessa forma foi possível obter uma lista de palavras-chave apropriadas, a qual pode ser visualizada na Figura 7.1.

Figura 7.1: Palavras-Chave utilizadas na estratégia de pesquisa bibliográfica inicial para início da AMC.

Palavras Chave
Geoprocessing
Biomass
Biogas
Bioenergy-based power plant
GIS
Analytic Hierarchy Process
AHP
Muticriteria Modeling

Fonte: Produzido pelo Autor

A estratégia utilizada foi montada de modo a evitar repetições de palavras-chave que tivessem o mesmo significado e que obtivesse a maior quantidade de artigos possível. Dessa forma o arranjo de palavras-chave e de operadores que compuseram a estratégia foi (*biomass OR biogas OR bioenergy-based*) AND *ahp* AND *gis*, e resultou em um total de 21 artigos científicos, os quais foram avaliados individualmente para aplicabilidade de utilização dentro dos objetivos do presente trabalho.

Avaliando os artigos obtidos da estratégia e filtrando quais estavam mais correlacionados com o objetivo de avaliação de novas localizações de usinas de conversão de biomassa

para biogás e utilização na geração de energia elétrica, por meio de geoprocessamento, definiu-se pela utilização dos parâmetros e pesos de referência [67] para a AMC.

A realização da AMC espacial foi realizada em ambiente de *software* SIG, onde os dados geográficos, obtidos de fontes diversas como a INDE, são inseridos inicialmente dentro do *software* e processados a partir de análises espaciais. Os dados utilizados e a origem dos mesmos estão elencados na Figura 7.2.

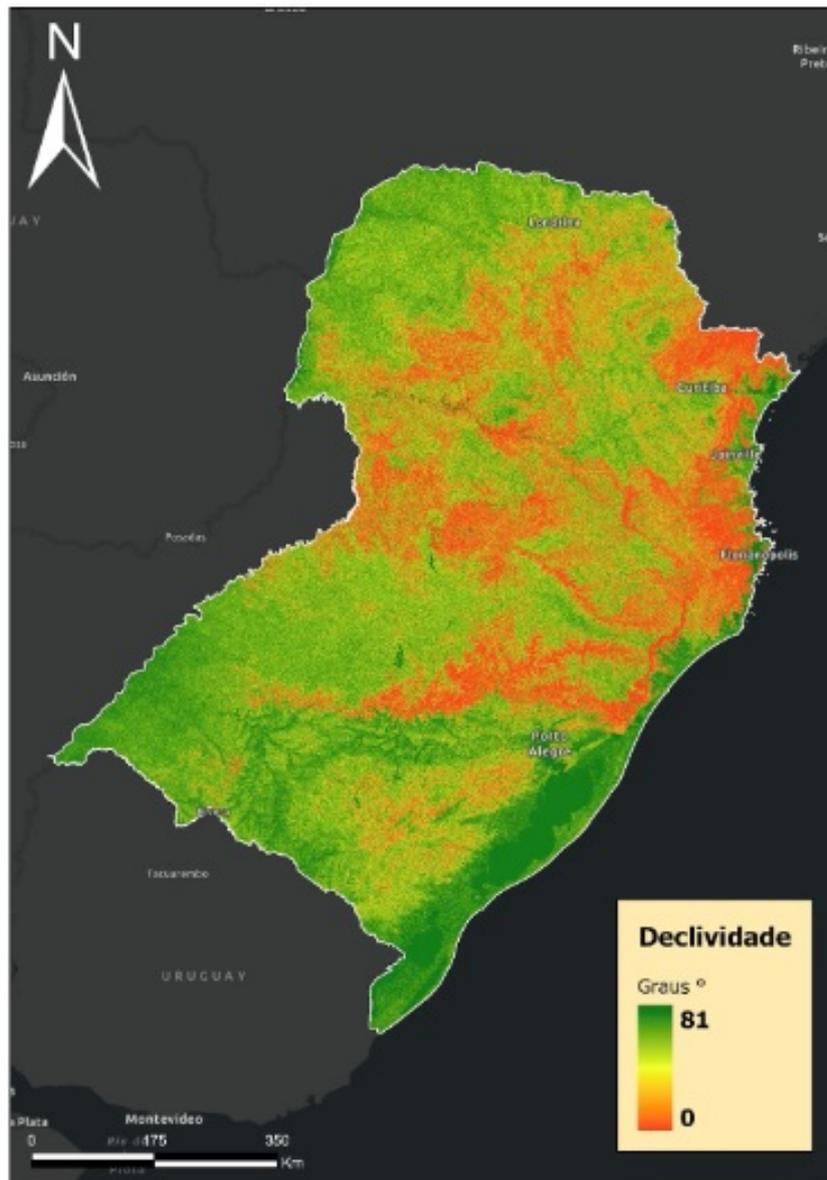
Figura 7.2: Dados utilizados dentro da AMC espacial de geoprocessamento e sua origem.

Nº	Dados	Origem dos dados
1	Declividade (Graus, °)	SRTM, 2000
2	Localização de corpos hídricos	MapBiomias, 2022
3	Localização de áreas urbanas	MapBiomias, 2022
4	Localização de linhas de transmissão	EPE, 2023
5	Localização de rodovias	Ministério dos Transportes, 2023
6	Produção de Biogás advindo de Suinocultura a Nível Municipal	CiBiogás, 2020

Fonte: Produzido pelo Autor

A visualização espacial dos dados são apresentadas a seguir:

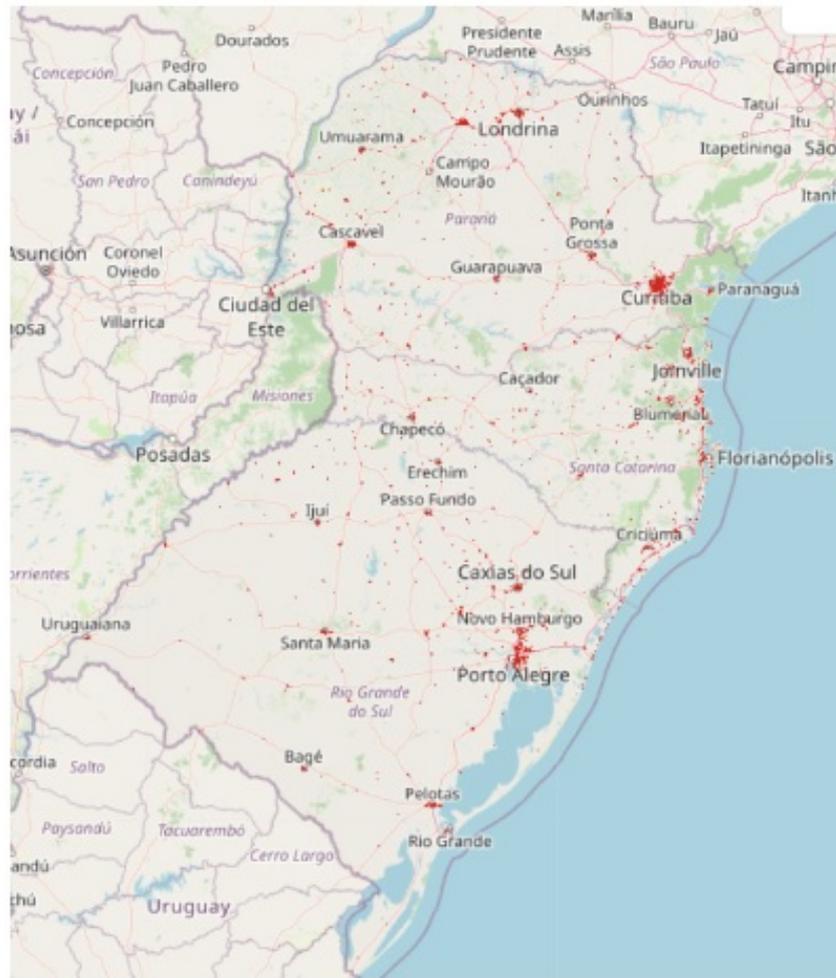
Figura 7.3: Declividade, em graus, na região sul do Brasil.



Fonte: SRTM, 2000

Na Figura 7.3, evidencia-se a presença de muitas áreas relativamente planas na região Sul, de forma predominante, nas zonas Sudoeste (Região Geográfica Intermediária de Uruguaiana), Sul (Região Geográfica Intermediária de Pelotas), Oeste (Região Geográfica Intermediária de Ijuí), Leste (Região Geográfica Intermediária de Porto Alegre) e Noroeste (Região Geográfica Intermediária de Passo Fundo) do estado do Rio Grande do Sul. Em comparação, nas zonas Nordeste (Região Geográfica Intermediária de Caxias do Sul) e Central (Região Geográfica Intermediária de Santa Cruz do Sul - Lajeado) do Rio Grande do Sul, e nos estados do Santa Catarina e Paraná possuem regiões mais declivosas.

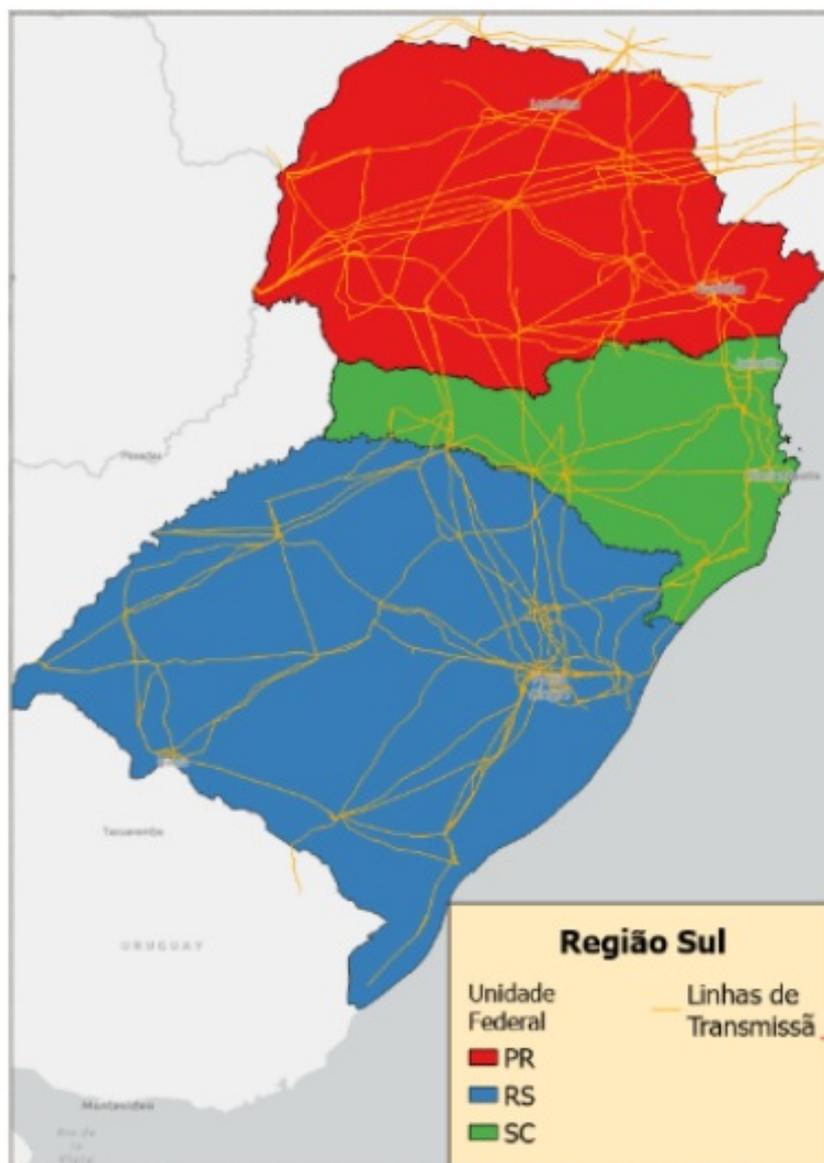
Figura 7.5: Localização das áreas urbanas, em vermelho, na região sul do Brasil.



Fonte: MapBiomias, 2022

Visualiza-se na Figura 7.5, a presença de centros urbanos de grande extensão territorial nas capitais de cada estado da região Sul (Porto Alegre, Curitiba, Florianópolis), assim como ocupações urbanas satélites a esses centros, representando um processo indicativo de conurbação. Também é possível identificar que as direções Norte e Oeste do estado do Paraná possuem centros urbanos consolidados e com áreas elevadas como Cascavel, Londrina e Umuarama, representando um forte processo de interiorização no estado.

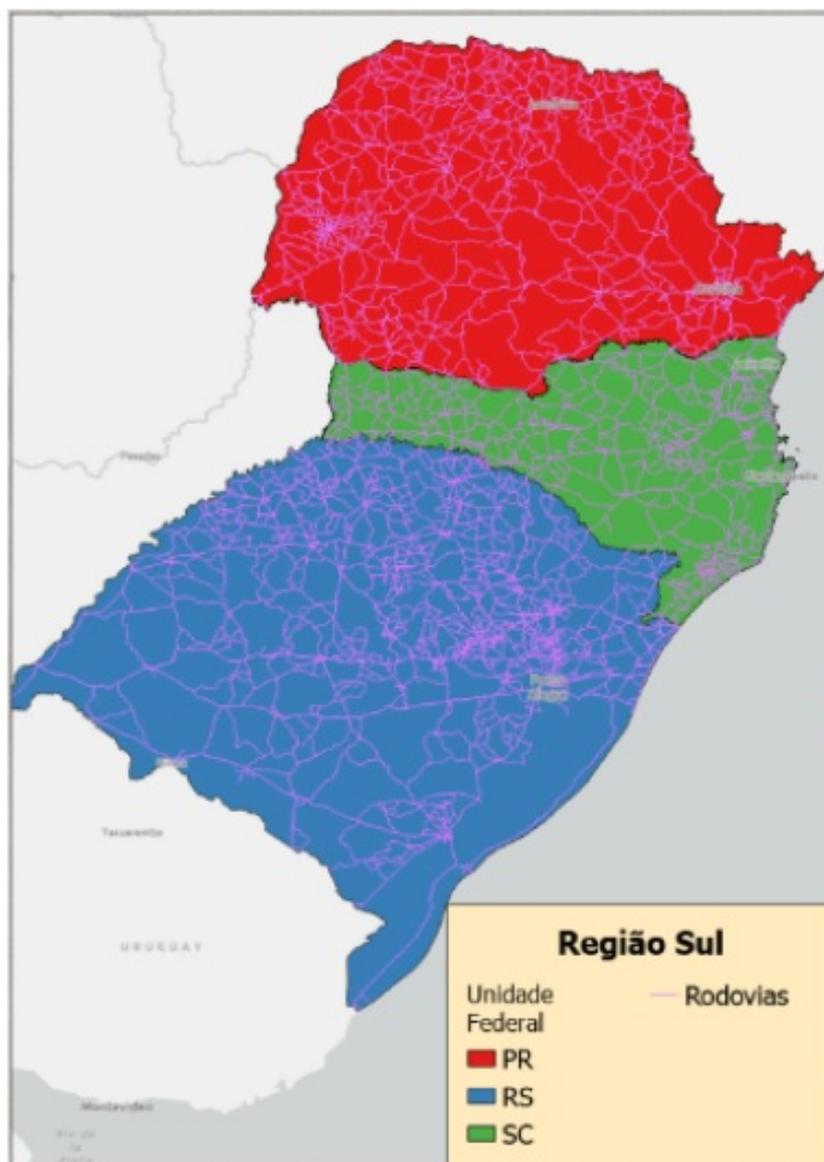
Figura 7.6: Localização das linhas de transmissão de energia elétrica na região sul do Brasil.



Fonte: EPE, 2023

A partir da Figura 7.6, é possível visualizar uma grande distribuição e conectividade de linhas de transmissão entre os estados da Região Sul. Entretanto, identifica-se uma ausência de concentração de infraestrutura na zona Central e Sul do estado do Rio Grande do Sul, além da falta de linhas de transmissão também nas zonas Norte e Extremo Oeste do estado do Paraná, e ao Norte do estado de Santa Catarina.

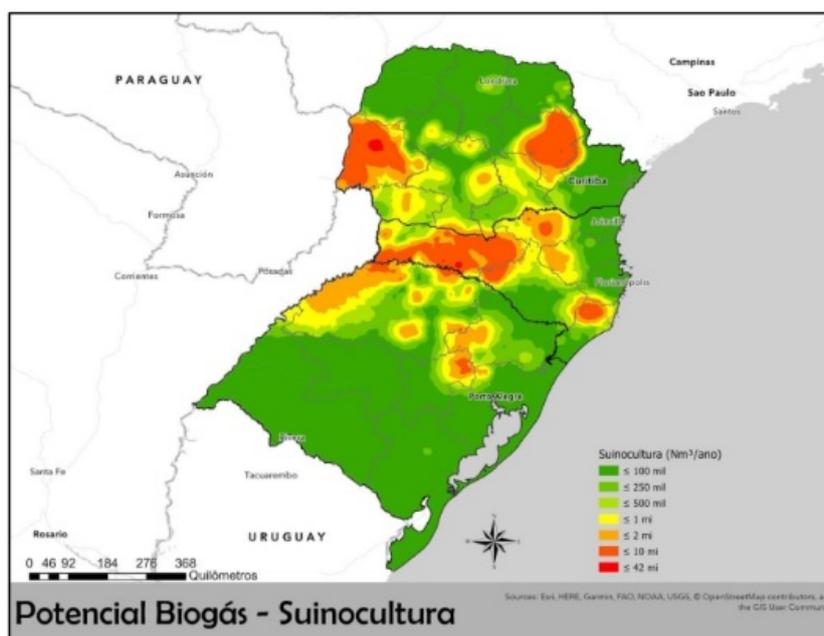
Figura 7.7: Localização das estradas rodoviárias da região sul do Brasil.



Fonte: DNIT, 2023

Na Figura 7.7, fica evidenciado a alta complexidade e concentração da infraestrutura rodoviária nos estados da região Sul. Assim como ocorreu no restante do Brasil, os investimentos maciços na conectividade rodoviária do país, tornaram esse modal de transporte o mais utilizado, entre os outros, como ferroviário, aéreo e navegação, de forma que a região Sul também seguiu o contexto brasileiro.

Figura 7.8: Potencial de produção de biogás da suinocultura nos estados do Sul do Brasil.

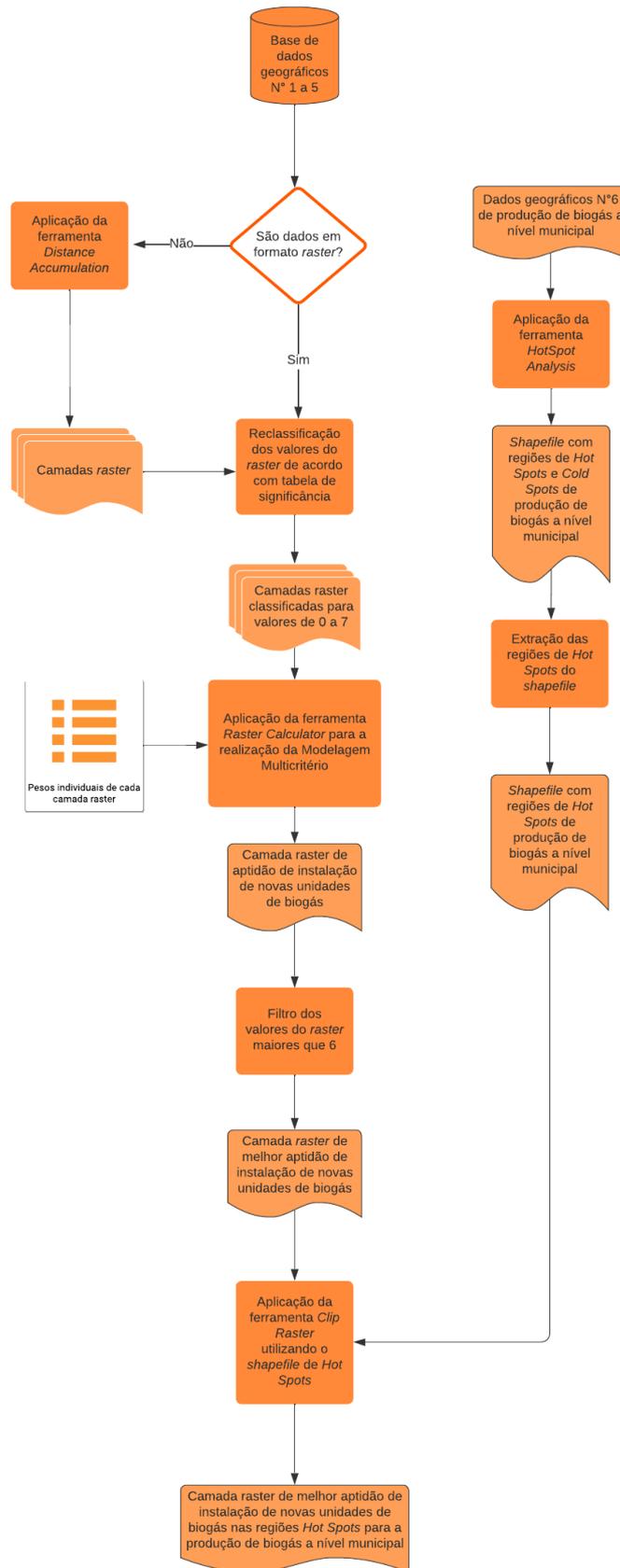


Fonte: CIBiogás, 2020

É possível visualizar na Figura 7.8, a concentração do potencial de biogás na região Sul, advindo da suinocultura. Tal potencial possui mais força em regiões geográficas específicas dos estados, sendo elas nas direções Noroeste (Região Geográfica Intermediária de Ijuí) e Norte (Região Geográfica Intermediária de Passo Fundo) do estado do Rio Grande do Sul. Já no estado do Paraná, concentra-se nas direções Oeste (Região Geográfica Intermediária de Chapecó e Região Geográfica Caçador), Norte (Região Geográfica Intermediária de Joinville) e Sudeste (Região Geográfica Intermediária de Criciúma). Por fim, no estado de Santa Catarina, o potencial concentra-se nas direções Sudoeste (Região Geográfica Intermediária de Cascavel) e Leste (Região Geográfica Intermediária de Ponta Grossa).

O fluxograma que representa o passo a passo utilizado nesta parte da metodologia é representado na Figura 7.9 para visualização e compreensão. Nele são mencionadas ferramentas como *HotSpot Analysis*, *Distance Accumulation* e *Raster Calculator* que compõem parte do pacote *Spatial Analyst* do software SIG ArcGIS®, utilizado para a realização deste trabalho.

Figura 7.9: Fluxograma da metodologia de análise espacial de geoprocessamento.



Fonte: Produzido pelo Autor

Para a AMC, os parâmetros utilizados [67] como entrada para dar início a etapa são mostrados na Figura 7.10

Figura 7.10: Parâmetros avaliados na modelagem espacial multicritério e origem dos dados.

Parâmetros	Origem dos dados
Declividade (Graus, °)	SRTM, 2000
Distância de corpos hídricos (m)	MapBiomias, 2022
Distância de áreas urbanas (m)	MapBiomias, 2022
Distância de linhas de transmissão (m)	EPE, 2023
Distância de rodovias (m)	Ministério dos Transportes, 2023

Fonte: Adaptado de NANTASAKSIRI, 2021

A reclassificação dos valores das camadas *raster* foi feita a partir da Figura 7.11 [67].

Figura 7.11: Classificação de significância para conversão de valores dos rasters dos parâmetros.

Parâmetros	Classificação de significância							
	7 Muito Alto	6	5	4 Medio	3	2	1 Muito Baixo	0 Restrições
Declividade (Graus, °)	0-2	2-5	5-8	8-10	10-15	-	-	>15
Distância de corpos hídricos (m)	1000-5000	-	5000-10000		10000-20000		500-1000, >20000	0-500
Distância de áreas urbanas (m)	3000-5000		5000-10000		10000-20000		1000-3000, >20000	0-1000
Distância de linhas de transmissão (m)	100-5000	5000-8000	8000-11000	11000-20000	20000-30000	30000-40000	>40000	0-100
Distância de rodovias (m)	100-5000	5000-8000	8000-11000	11000-20000	20000-30000	30000-40000	>40000	0-100

Fonte: NANTASAKSIRI, 2021

Os pesos atribuídos para cada parâmetro a ser utilizado dentro da AMC podem ser visualizados na Figura 7.12 [67]. A variação dos valores dos pesos representa a relevância do parâmetro dentro da avaliação para alocação de uma nova unidade geradora de biogás.

Figura 7.12: Pesos de relevância atrelados a cada parâmetro de entrada da AMC.

Parâmetros	Pesos de Relevância Atribuídos
Declividade (Graus, °)	0,065
Distância de corpos hídricos (m)	0,333
Distância de áreas urbanas (m)	0,296
Distância de linhas de transmissão (m)	0,120
Distância de rodovias (m)	0,185

Fonte: NANTASAKSIRI, 2021

Após a atribuição dos pesos a cada camada *raster* dos parâmetros, é possível obter um índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás, em modelo *Gas-to-Wire*. O índice varia entre o número 0, sendo este a representação espacial dos

locais menos favoráveis para novas unidades, até o número 7, sendo este a representação espacial dos locais mais favoráveis para novas unidades [67].

Pelo fato do índice de aptidão variar entre 0 a 7, aplica-se nas próximas análises tanto o espectro completo de valores do índice quanto o índice filtrado para os valores entre 6 a 7, de maneira a compreender somente as melhores localizações possíveis para instalação de novas unidades produtoras de biogás.

7.1.2 Análise Espacial *Hot Spots*

Em paralelo, com os dados de potencial de produção de biogás advindo da suinocultura a nível municipal na região sul, aplica-se a ferramenta *Hot Spot Analysis*, a qual calcula a estatística G_i^* , baseada em distâncias estatísticas e calculada a partir de um conjunto de vizinhos para cada localização para cada município na camada de dados [68], definida pela Equação 7.1.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{s \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}^2}{n} - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij}\right)^2}} \quad (7.1)$$

Onde:

- W_{ij} valor na matriz de proximidade para o município i com o município j em função da distância (d);
- x_i e x_j são os valores dos atributos considerados nos municípios i e j ;
- d é distância entre municípios;
- n o número de municípios (polígonos).

A análise de *Hot Spots* é uma ótima ferramenta que nos permite identificar a localização do agrupamento e da dispersão em um conjunto de dados. Isto é especialmente útil quando lidamos com muitas informações individuais em um contexto regional, como os dados de potencial produtivo de biogás dos municípios em um período específico ou ao longo do tempo, de forma que muitos dados ficam pulverizados na análise, tornando difícil determinar visualmente exatamente onde estão os pontos “quentes” e “frios” em nossos dados. Também é útil para análise temporal, ajudando a determinar mudanças sazonais de localização nos dados que estão sendo examinados.

Assim, um município, identificado como i , com um potencial de valor alto é interessante, mas pode não ser um *Hot Spot* estatisticamente significativo. Para ser um *Hot Spot* estatisticamente significativo, o município i deverá ter um potencial de produção de biogás de valor alto e também deverá ser rodeado, com uma baixa distância d , por outros municípios com potenciais de valores altos.

7.1.3 Sobreposição final de camadas resultantes das análises espaciais

Após a aplicação da ferramenta *Hot Spot Analysis*, filtra-se o conjunto de municípios considerados *Hot Spot*, para obter-se as regiões no sul do país com maior potencial de biogás a ser aproveitado, advindo da suinocultura.

Ao obter as regiões com maior potencial, torna-se possível realizar uma sobreposição entre estas regiões e o índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás, de maneira a identificar locais propícios para instalação e com boa oferta de matéria orgânica advinda da suinocultura.

Posteriormente a identificação dos locais mais propícios para instalação e com bom potencial para produção de biogás, realiza-se uma avaliação qualitativa acerca das plantas existentes na região sul e que utilizam substrato agropecuário para a produção de biogás, avaliando-se quantidade de planta e escala de produção nos locais identificados nas etapas anteriores.

8 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das metodologias elencadas anteriormente, em formato de mapas e gráficos com descrição.

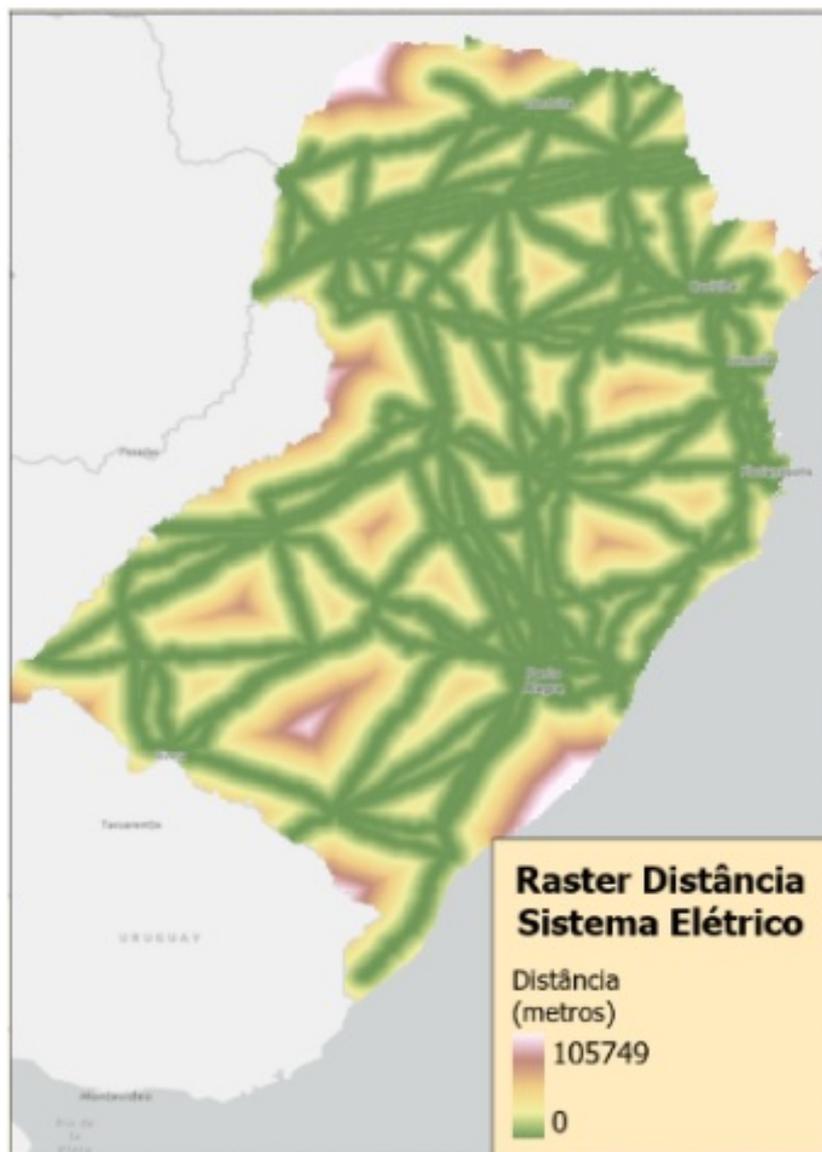
8.1 MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITÉRIO

Após o processamento inicial da localização geográfica dos dados mencionados na Tabela 7.2, mediante o uso da ferramenta *Distance Accumulation* no *software* ArcGIS®, obtivemos as Figuras 8.1, 8.2, 8.3, sendo elas visualizações espaciais do crescimento do raio de distância para cada dado avaliado dentro da Região Sul.

8.1.1 Cálculo do raio de distância aos dados de entrada

- Linhas de transmissão

Figura 8.1: Raio em relação ao sistema elétrico numa escala de amarelo/marrom, mais distante, para verde,mais perto.

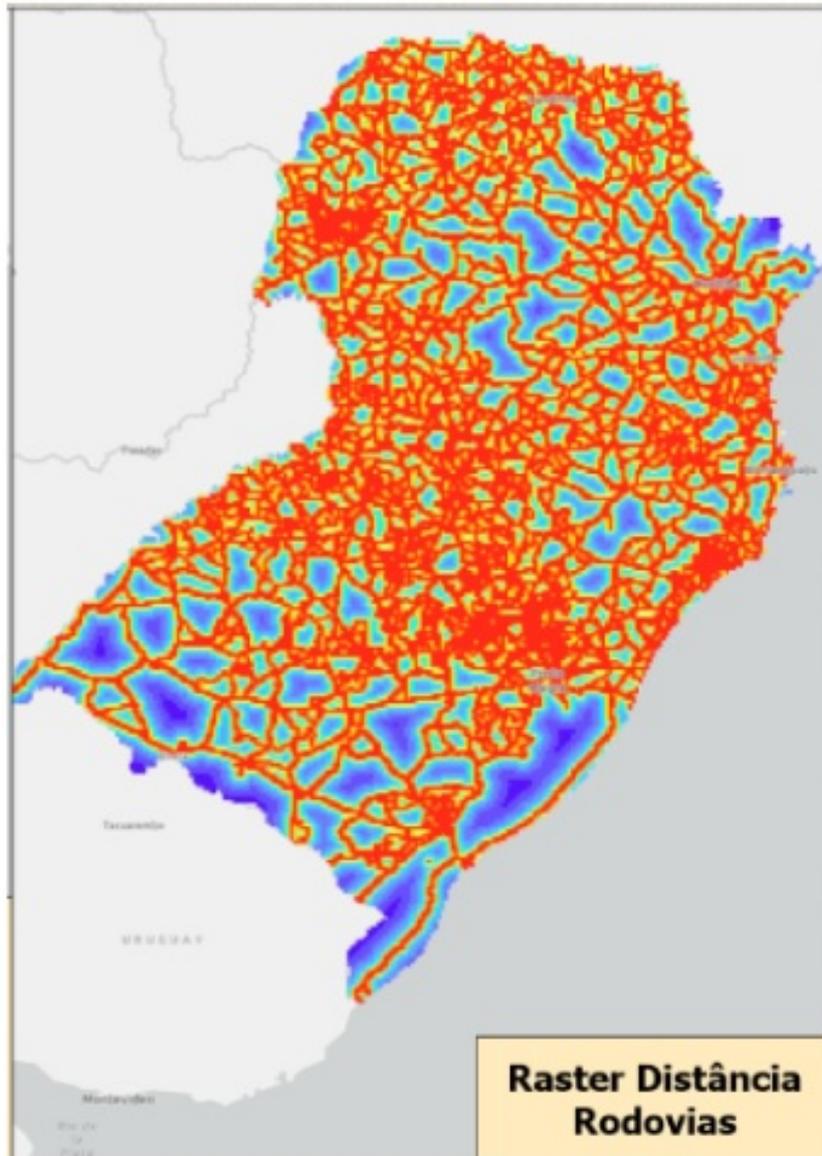


Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 8.1, observa-se uma extensa rede de linhas de transmissão interligando os estados da Região Sul. Contudo, nota-se a escassez de infraestrutura concentrada na região central e sul do Rio Grande do Sul, assim como a ausência de linhas de transmissão nas áreas norte e extremo oeste do Paraná, e ao norte de Santa Catarina, sendo estas zonas representadas com os maiores valores de raio de distância até o encontro de infraestrutura de transmissão de energia elétrica.

- **Estradas Rodoviárias**

Figura 8.2: Raio em relação à malha rodoviária numa escala de azul, mais distante, para vermelho, mais perto.

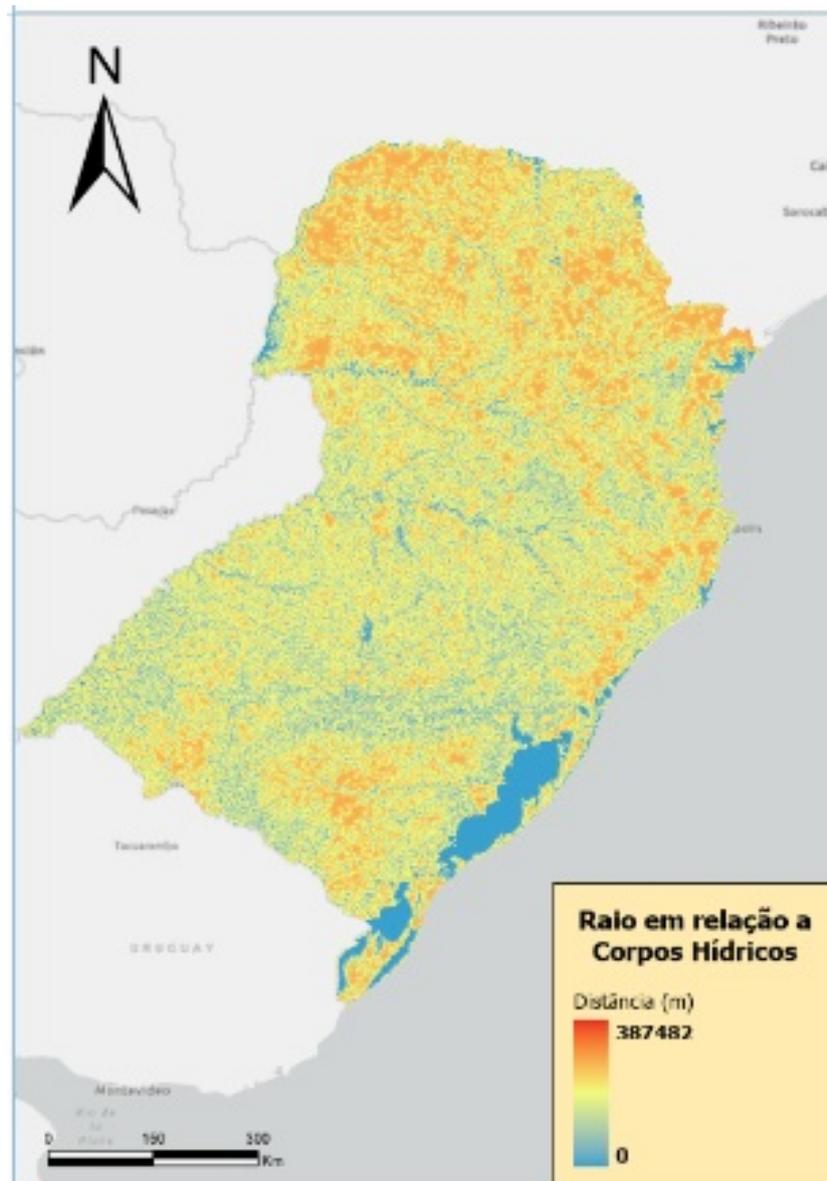


Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 8.2, é perceptível a alta complexidade e densidade da infraestrutura rodoviária nos estados da região Sul. Assim, o número de áreas distantes de rodovias na região Sul é mínima.

- **Corpos Hídricos**

Figura 8.3: Raio em relação aos corpos hídricos numa escala de vermelho, mais distante, para azul, mais perto.



Fonte: Produzido pelo Autor

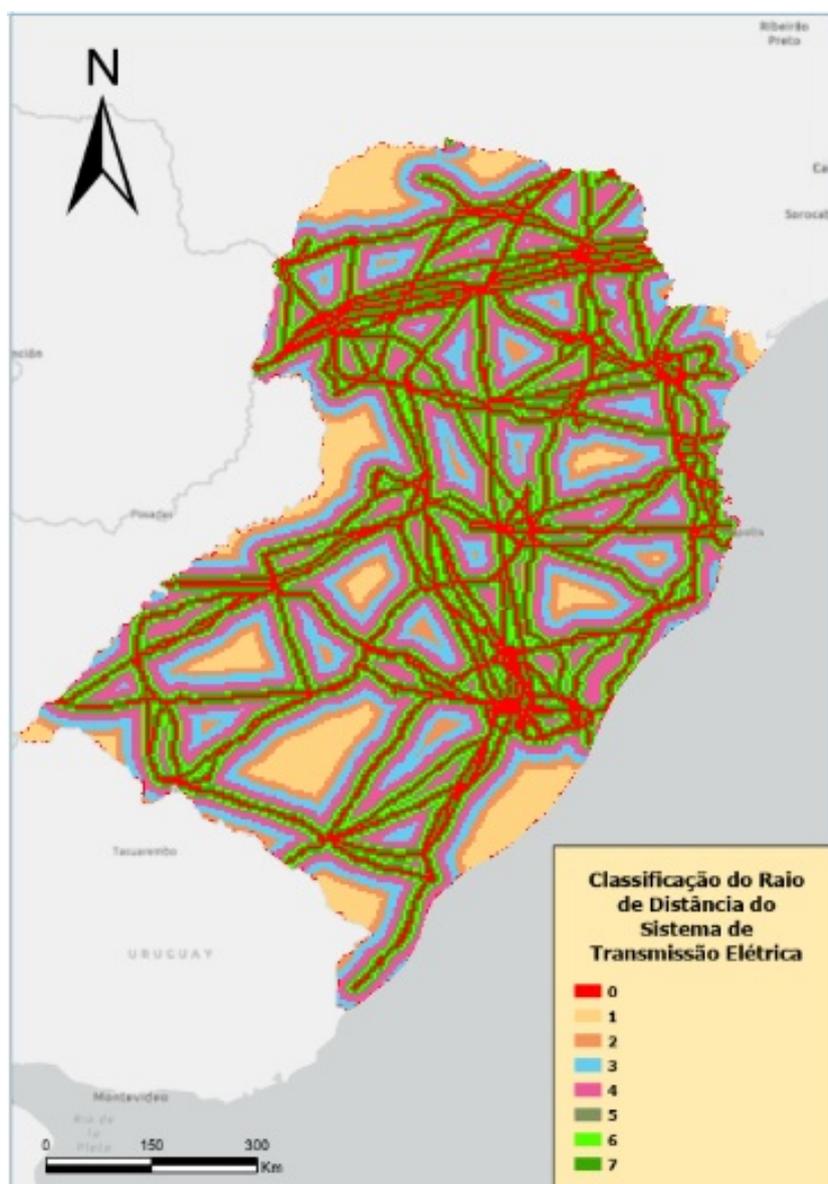
Na Figura 8.3, é possível observar que os principais corpos d'água estão situados nas fronteiras entre os estados da Região Sul e nos limites desta região com as regiões Sudeste e Centro-Oeste. Além disso, destaca-se a presença de lagoas extensas no estado do Rio Grande do Sul, especialmente nas regiões leste e sudeste do estado. Assim, pela existência de corpos d'água interiores, como açudes e lagoas, além de uma extensa rede hidrográfica, a proporção de áreas próximas a corpos hídricos é maior que as que encontram-se distantes do acesso a elas, sendo que a concentração destas áreas com maiores distâncias está predominantemente no estado de Santa Catarina.

8.1.2 Reclassificação dos valores dos raios de distância

Em sequência no processo da AMC, como pode ser visualizado no fluxograma, representado pela Figura 7.9, utilizou-se a ferramenta *Remap* dentro do *software* ArcGIS®, de maneira a reclassificar os valores dos *rasters* obtidos na etapa anterior de acordo com a Figura 7.11 na seção de metodologia deste trabalho. A visualização espacial dos *rasters* reclassificados é exibida pelas Figuras 8.4 a 8.7.

- **Linhas de transmissão**

Figura 8.4: Dados reclassificados do raio de distância em relação às linhas de transmissão de energia elétrica na região sul do Brasil.



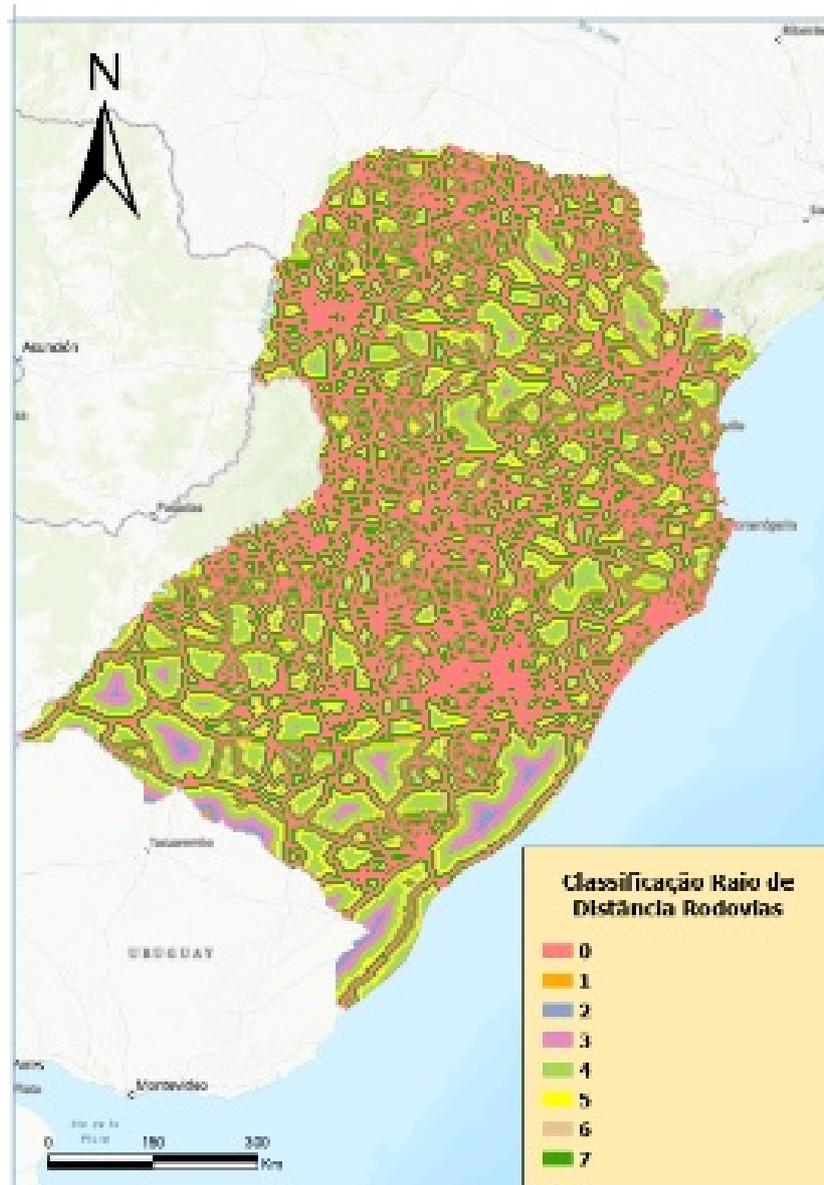
Fonte: Produzido pelo Autor

É evidenciado na Figura 8.4, a presença de linhas de transmissão ao longo dos estados da região Sul, entretanto, visualiza-se também uma proporção alta de áreas no estado que

receberam classificações baixas (classes 1, 2 e 3), de forma que empreendimentos voltados a produção de energia encontram muitas dificuldades para instalação nessas zonas, por além de envolverem grandes investimentos, a ausência de infraestrutura para escoamento da energia também necessitaria ser construída.

- **Estradas Rodoviárias**

Figura 8.5: Dados reclassificados do raio de distância em relação às rodovias na região sul do Brasil.



Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 8.5, torna-se possível observar a alta incidência de classificações altas (classes 5, 6 e 7), de forma a demonstrar a alta capilaridade da infraestrutura rodoviária na região sul, e os benefícios de se implantar uma unidade de produção de biogás as

margens de uma rodovia, facilitando o deslocamento de mão de obra, equipamentos e serviços tanto na fase de construção quanto de operação das usinas.

- **Corpos Hídricos**

Figura 8.6: Dados reclassificados do raio de distância em relação aos corpos hídricos na região sul do Brasil.

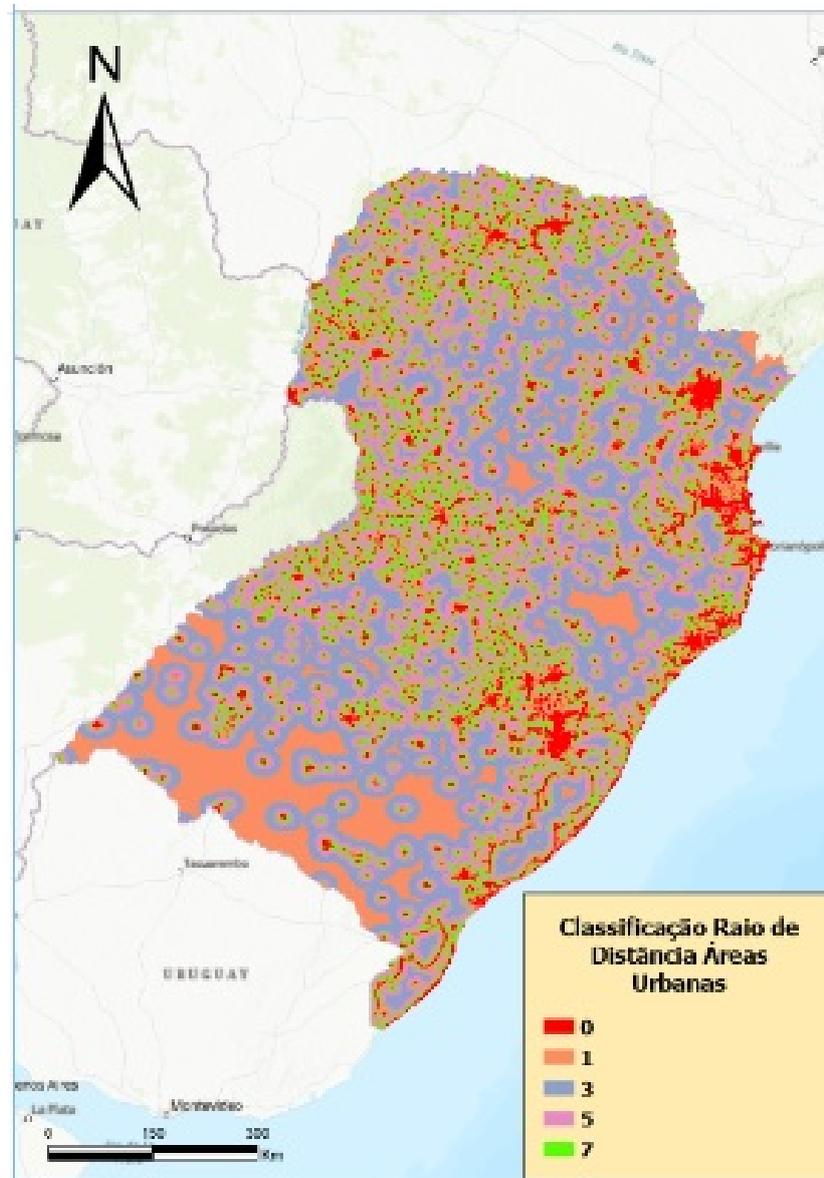


Fonte: Produzido pelo Autor

A partir da Figura 8.6, torna-se possível visualizar que grande parte da extensão territorial dos estados da região Sul está classificada como 7, correspondendo a uma alta significância para instalação de unidades de produção de biogás nestas áreas, devido a minimização dos possíveis impactos ambientais negativos de contaminação de águas superficiais com rejeitos dos processos e a disponibilização de água para uso dentro do processo de produção do biocombustível.

- **Áreas Urbanas**

Figura 8.7: Dados reclassificados do raio de distância em relação às áreas urbanas na região sul do Brasil.



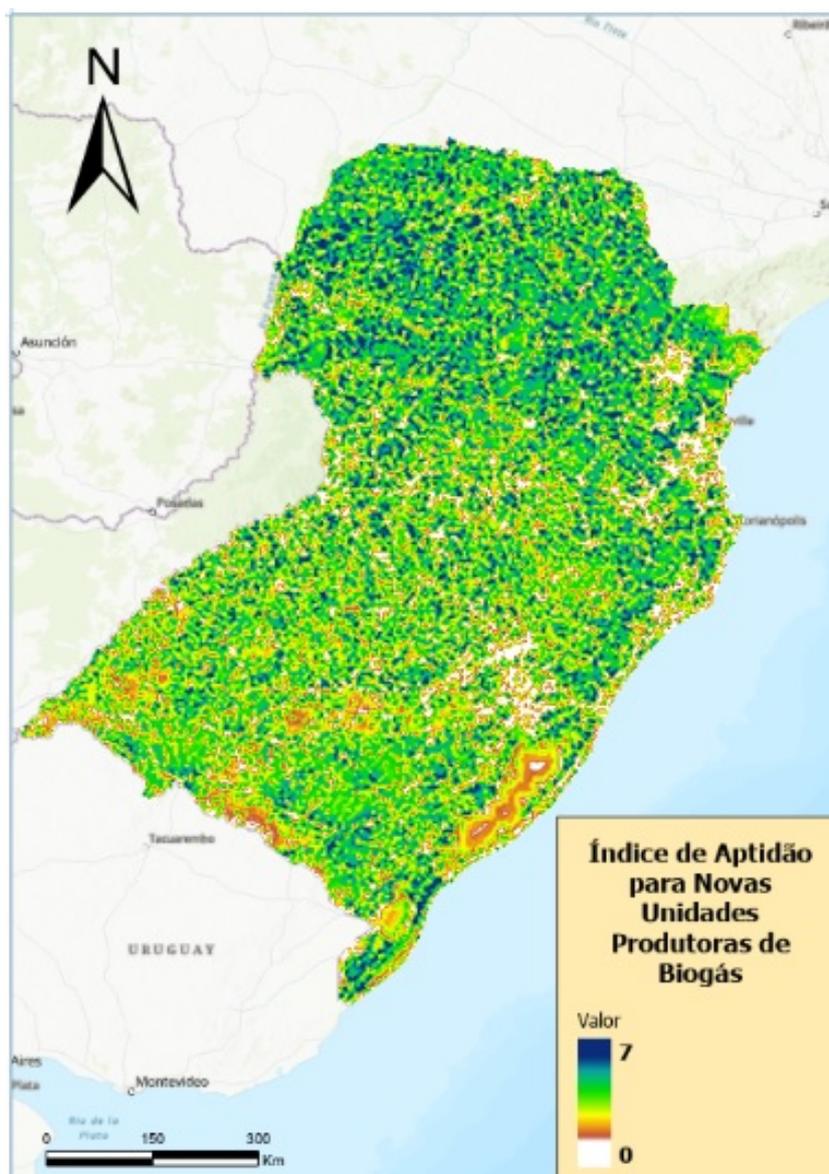
Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 8.7, fica evidenciado a baixa disponibilidade de áreas classificadas no quesito de proximidade com área urbana como de alta significância (classes 5 e 7) para instalação de unidades de produção de biogás na região Sul. Tal fator pode ser explicado, pela necessidade de proximidade de regiões urbanas, para garantia de mão de obra e serviços para a construção e operação das usinas, entretanto não podem ser tão próximas aos centros urbanos, pois não são consideradas atrativas para zonas urbanas devido a questões como poluição sonora e atmosférica.

8.1.3 Cálculo do índice de aptidão para novas plantas de biogás

Para a etapa seguinte, com a obtenção dos *rasters* classificados, se realiza uma sobreposição das camadas *raster* dos dados, alocando-se um peso específico para cada, de acordo com a Figura 7.12, oriunda da seção de metodologia deste artigo, de modo a obter o índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás. A visualização espacial do índice de aptidão pode ser vista na Figura 8.8 e do índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, pode ser visualizado na Figura 8.9.

Figura 8.8: Índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.



Fonte: Produzido pelo Autor

A partir da Figura 8.8, visualiza-se que as áreas classificadas com maior aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás (classes 5 a 7), encontram-se em sua

maioria espalhadas ao longo dos estados de Santa Catarina e Paraná, e em menor ênfase no estado do Rio Grande do Sul. Assim, é possível identificar uma grande capacidade de instalação de novos empreendimentos na região Sul.

Figura 8.9: Índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.



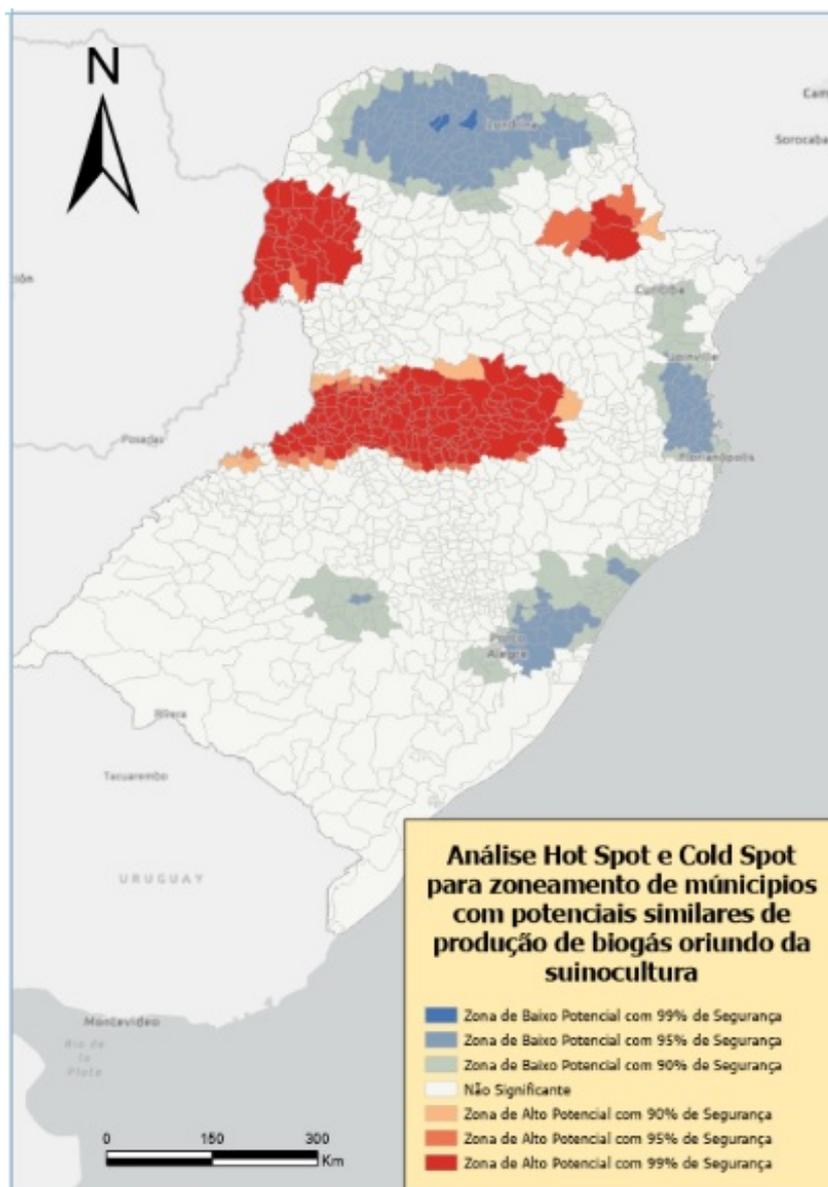
Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 8.9, ao filtramos os valores para as classificações no topo da escala (6 a 7), fica evidenciado como o estado de Santa Catarina, ao norte, se destaca na proporção de áreas com alta aptidão para instalação de empreendimentos voltados para a produção de energia elétrica, englobando também as usinas para produção de biogás.

8.1.4 Análise de *Hot Spots* de produção de biogás

Os resultados da aplicação da ferramenta *Hot Spot Analysis* nos dados de potencial de produção de biogás, advindo da suinocultura, a nível municipal podem ser visualizados na Figura 8.10

Figura 8.10: Potencial de produção de biogás, oriundo da suinocultura, dividido em Zonas Hot Spot, em vermelho, Zonas Cold Spot, em azul, e municípios não relevantes, em branco.



Fonte: Produzido pelo Autor

A partir da Figura 8.10, torna-se possível identificar que na região Sul, encontram-se 3 manchas *Hot Spot* com alto potencial para a produção de biogás oriundo da suinocultura, sendo a primeira delas nas zonas Oeste e Central do estado do Paraná, respectivamente nas regiões geográficas intermediárias de Chapecó e Caçador. A segunda mancha *Hot*

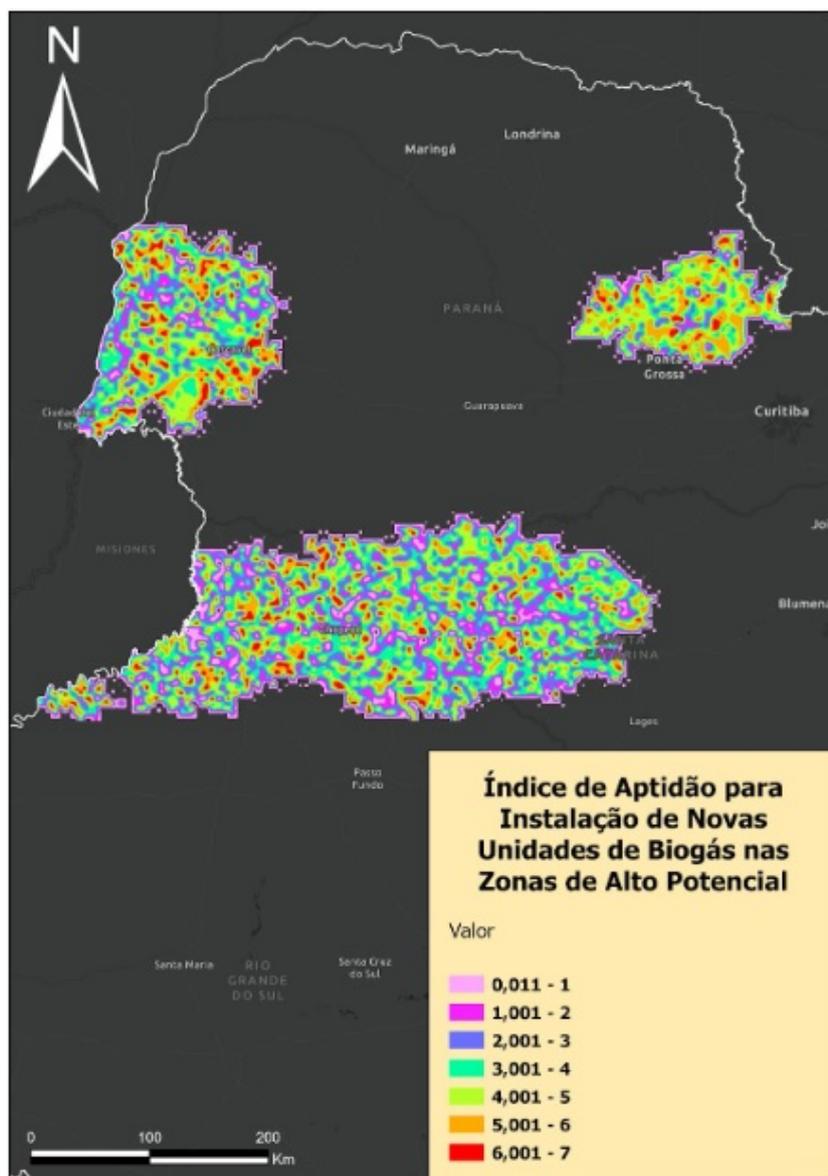
Spot está localizada na zona Sudoeste do estado de Santa Catarina, na região geográfica intermediária de Cascavel. A terceira mancha também está situada no estado de Santa Catarina, na região geográfica intermediária de Ponta Grossa, na zona Leste do estado.

Acerca das manchas *Cold Spot*, foi possível observar 4 manchas ao longo da região Sul com baixo potencial para a produção de biogás, advindo da suinocultura. A primeira mancha e a segunda mancha encontram-se no estado do Rio Grande do Sul, sendo localizadas, respectivamente, na região geográfica intermediária de Porto Alegre, a leste do estado, e na região geográfica intermediária de Santa Maria, na parte central do estado. A terceira mancha pode ser encontrada no estado do Paraná, englobando as regiões geográficas intermediárias de Florianópolis e Blumenau, a leste do Estado. A quarta e última mancha, está localizada na zona Norte do estado de Santa Catarina, correspondendo às regiões geográficas intermediárias de Maringá e Londrina.

8.1.5 Sobreposição índice de aptidão e *Hot Spots*

Ao sobrepor as zonas *Hot Spot* para 2 cenários, sendo o primeiro cenário a utilização do índice de aptidão com espectro completo de valores para as áreas das zonas, obteve-se como resultado a visualização espacial representada na Figura 8.11. Para o segundo cenário, ao utilizarmos o índice de aptidão com filtro somente para os valores entre 6 a 7, obtemos como resultado a visualização espacial representada na Figura 8.12

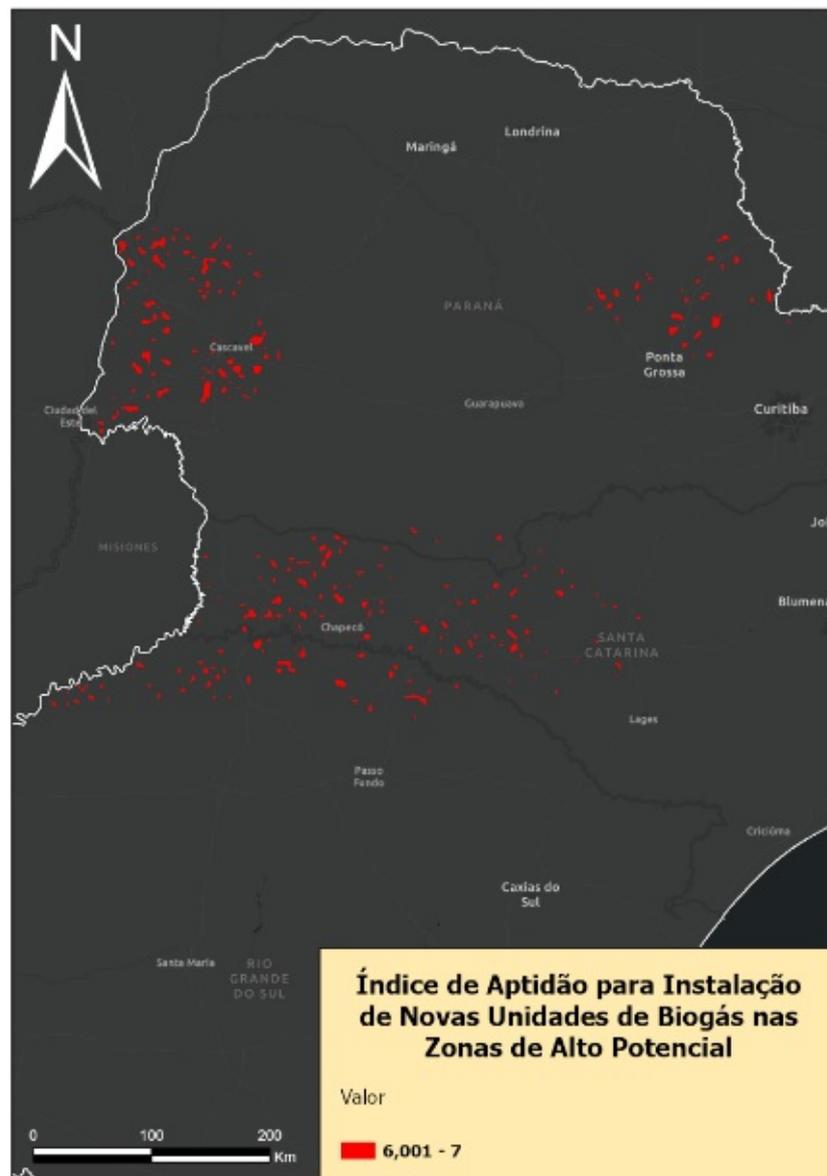
Figura 8.11: Sobreposição entre as zonas Hot Spot e o índice de aptidão para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.



Fonte: Produzido pelo Autor

Ao analisar a Figura 8.11, visualiza-se que ao longo das zonas *Hot Spot*, encontram-se cenários bastante variados acerca da aptidão de instalação de novas unidades de biogás, de forma que mesmo em um ambiente de alta potencial de produção do biocombustível, nem todo lugar é considerado viável o surgimento de plantas industriais.

Figura 8.12: Sobreposição das zonas Hot Spot e o índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, para instalação de novas unidades produtoras de biogás na região sul do Brasil.



Fonte: Produzido pelo Autor

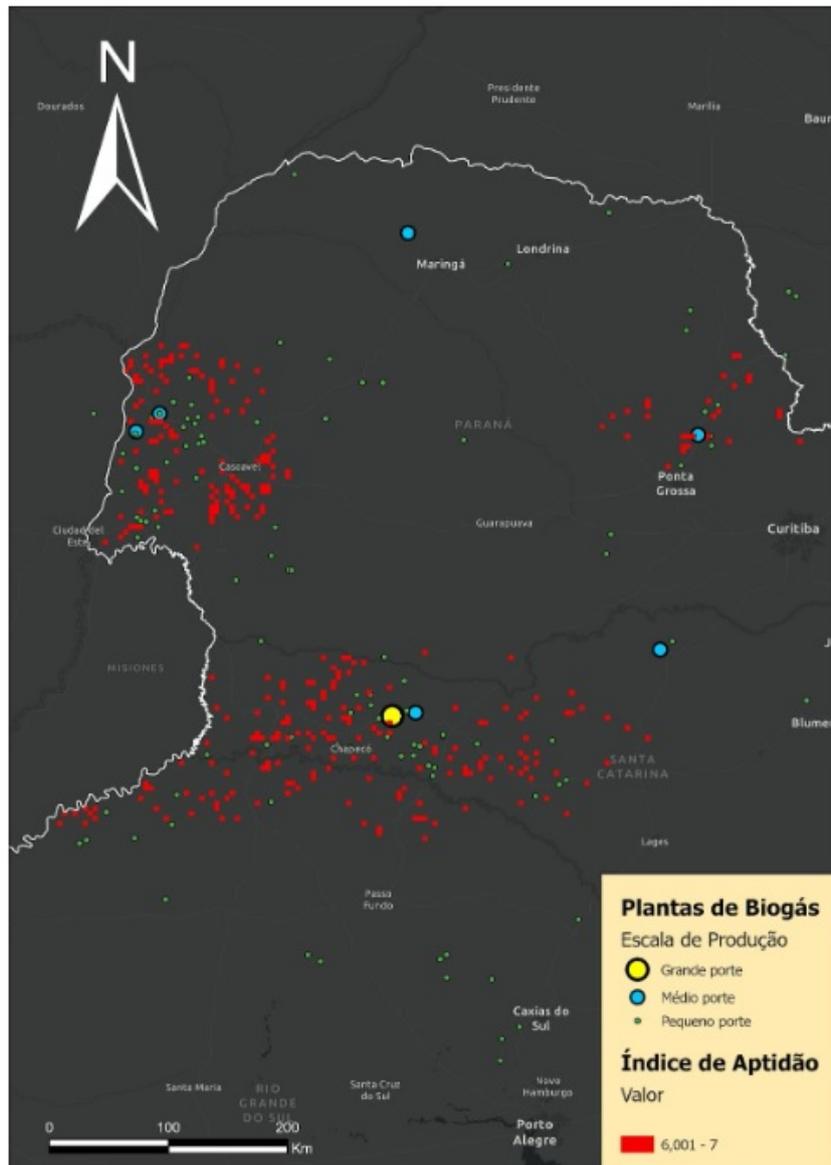
A partir da Figura 8.12, torna-se possível identificar a existência de localidades, em sua maioria dispersas e descontínuas, que incorporam tanto uma alta aptidão para instalação de novas unidades quanto estarem inseridas dentro de zonas com alta potencial de produção de biogás.

8.1.6 Avaliação das localizações de plantas de biogás existentes na região sul, em relação aos índices de aptidão e *Hot Spots*

Ao avaliarmos a localização das plantas produtoras de biogás existentes na região sul e que utilizam substratos agropecuários com o índice de aptidão, filtrado para valores

entre 6 a 7, nas zonas *Hot Spot* é possível identificar a dispersão espacial das unidades produtoras de biogás ao longo da região sul e a escala de produção delas. A visualização espacial dessas informações pode ser visualizada na Figura 8.13.

Figura 8.13: Localização das plantas de biogás que usam substratos agropecuários em relação ao índice de aptidão, filtrado para valores entre 6 a 7, nas zonas *Hot Spot* da região sul do Brasil.



Fonte: Produzido pelo Autor com dados de localizações do Biogas Map, 2022

A partir da Figura 8.13, fica evidente que mesmo zonas com alta aptidão para instalação de empreendimentos voltados para a geração de energia elétrica, como as usinas de produção de biogás *Gas-to-Wire*, as quais possuem poucas unidades de grande e médio porte na Região Sul. Vale destacar que somente a região geográfica intermediária de Chapecó no estado de Santa Catarina possui uma planta de larga escala para produção de biogás com substratos agropecuários, sendo esta a única na região Sul completa.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Neste trabalho abrangeu-se características técnicas da composição e produção de biogás, além de sua respectiva cadeia de valor por meio de um panorama nacional do status da indústria no Brasil e um detalhamento maior da mesma na região sul do país.

Buscando como objetivo principal, a identificação de localizações geográficas para a instalação de unidades geradoras de biogás por intermédio de softwares SIG e avaliar o panorama das tecnologias envolvidas na produção e purificação de biogás, foi desenvolvido ao longo do trabalho duas metodologias, dentre as quais foram possíveis obter as seguintes considerações finais e conclusões a partir dos resultados obtidos em cada uma delas.

9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1.1 Modelagem Espacial Multicritério

A modelagem espacial multicritério envolveu a aquisição de dados geográficos georreferenciados acerca da região sul, da capacidade produtiva de biogás por município e da indústria existente de biogás presente atualmente na região.

Com a base de dados montada, foi possível a aplicação de técnicas de geoprocessamento para verificar a distribuição espacial dos parâmetros de uso de solo e infraestrutura na região sul, de modo a proporcionar a identificação de áreas propícias para instalação de novas unidades produtoras de biogás. Somado a isso, a base de dados possibilitou também a visualização do estado atualizado da capacidade produtiva na região, permitindo a identificação e agrupamento de municípios em regiões com alto potencial produtivo de biogás, com foco nos resíduos oriundos da suinocultura

A partir da combinação entre as áreas propícias para instalação de novas unidades produtoras de biogás e as regiões com alto potencial produtivo de biogás vindo da suinocultura, tornou-se possível a definição de zonas únicas para o desenvolvimento de novas plantas produtoras de biogás, dedicadas ao uso de substratos agropecuários, em especial da indústria de suínos.

Com essas zonas em mãos, visualizou-se a localização das unidades industriais produtoras de biogás existentes na região sul, e identificou-se que nenhuma planta de grande porte se encontra dentro dos limites dessas zonas únicas para o desenvolvimento da indústria de biogás.

Assim, visualiza-se como o potencial produtivo do biogás a ser explorado ainda é muito grande na região sul, e facilita a canalização de investimentos do setor público e privado para facilitar e acelerar o processo de construção e desenvolvimento de hubs produtivos de unidades industriais, dedicadas ao uso de substratos agropecuários nessas zonas.

Além disso, a metodologia pode ser replicada tanto para outras regiões quanto outros tipos de substratos, facilitando a avaliação da capacidade de ampliação da infraestrutura de biogás no país.

9.1.2 Pesquisa Bibliográfica de Artigos Científicos

A partir das estratégias de pesquisas definidas, foi possível a procura em bases de dados internacionais de artigos científicos, para 3 temáticas que envolvem o uso de tecnologias na indústria de biogás, sendo elas modelos de reatores, tipos de agitadores e processos e tecnologias para purificação de biogás.

Com os resultados obtidos, identificou-se na temática de reatores uma alternância relevante com picos e quedas nos números de pesquisas dos tipos UASB e CSTR no nicho ao longo dos últimos anos, podendo estar atrelada a questões de financiamento.

A partir da avaliação, visualizou-se que os principais países que dedicam esforços de P&D nesse campo são China, Estados Unidos e Espanha compondo o top 3, além de que houve um crescimento relevante no número de estudos de reatores do tipo lagoa coberta no tratamento de dejetos animais, de modo a se correlacionar com a predominância desse tipo de reator na região sul, como descrito na Seção 6.4 do trabalho.

Entretanto, é válido ressaltar que o modelo lagoa coberta mesmo sendo preponderante no país para tratamento de resíduos agropecuários, é um reator que necessita de uma grande área para instalação e possui uma geração mediana de biogás quando comparado aos outros modelos de reatores.

Para a temática de agitadores, observou-se um crescimento de pesquisas no tema no ano de 2018, entretanto regrediu para uma constante nos últimos anos, sendo os países com maior dedicação de esforços de P&D nesse nicho são China, Nigéria e Polônia, além de haver uma predominância do tipo hidráulico ao longo dos estudos científicos analisados, de maneira que também houve uma correlação com o panorama tecnológico da região sul, descrito na Seção 6.4, em que 66% dos agitadores também são do tipo hidráulico, logo estão avançados tecnologicamente.

Na última temática analisada de processos e tecnologias para purificação de biogás,

a análise dos estudos científicos demonstrou um crescimento positivo relevante de pesquisas nesse nicho ao longo dos anos, tendo como principais países responsáveis por esse crescimento, a China, os Estados Unidos e a Índia, além de possibilitar identificar que o processo mais estudado é a de remoção biológica, seguido pelo uso de carvão e biochar, e em terceiro lugar a lavagem bioquímica, todos focados na remoção de enxofre do biogás. A partir dessas análises, foi possível correlacionar com o panorama tecnológico da região sul, e constatar que as unidades produtivas de biogás da região que realizam remoção de enxofre (57% do total) têm entre os processos mais utilizados exatamente os 3 elencados, sendo que 58% delas utilizam dessulfurização biológica, 12% realizam lavagem bioquímica e 9% utilizam carvão ativado.

Assim, foi possível constatar que as plantas de produção de biogás encontram-se adequadas ao que vem sendo mais pesquisado no campo de biogás atualmente nas universidades do mundo, de maneira que o gargalo para a indústria é dar escala na construção de novas unidades produtivas e realizar o retrofit das unidades já construídas mas que ainda não se utilizam dessas tecnologias pesquisadas nas 3 temáticas.

9.1.3 Análise Prospectiva de Patentes

A prospecção tecnológica de patentes permitiu avaliar quais são os principais atores depositantes ao longo das últimas décadas na temática de biogás originado de resíduos, de forma que os resultados coincidiram em grande parte com os da pesquisa bibliográfica, em que a China demonstrou-se ser predominante na área, tanto na parte de estudos científicos quanto no depósito de patentes.

Assim, o país está na vanguarda na compreensão do biogás e estudo do mesmo, sendo um ator muito forte e que busca revolucionar sua matriz energética, a qual ainda é muito dependente do uso de termelétricas a carvão. A partir disso, é possível identificar que o incentivo ao desenvolvimento de recursos humanos e a estruturação e depósito de patentes faz parte do cotidiano da pesquisa científica na China, podendo o Brasil buscar adotar medidas similares para o seu desenvolvimento nesse campo, já que possui grande potencial de geração de energia a partir de biogás, reduzindo sua dependência externa de tecnologias e recursos humanos para a ampliação da indústria de energia renovável a partir de biomassa no país.

Entretanto na parte empresarial, a China não possui grandes companhias que atuem na área, estando as patentes depositadas restritas às organizações acadêmicas, o que é diferente do panorama dos Estados Unidos e países europeus, os quais possuem grandes empresas responsáveis por direcionar os investimentos na indústria de biogás.

Assim como no ramo empresarial, no ambiente de inovação das *startups*, os Estados Unidos assim como a Alemanha estão na dianteira do desenvolvimento desse tipo de empresas que podem vir a se tornar grandes participantes da indústria de biogás no futuro.

9.2 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foi apresentado uma avaliação do status atual da participação do biogás na matriz elétrica e energética brasileira, e o seu vasto potencial de produção em diferentes aplicações industriais, em especial na região Sul do país.

Assim, concluiu-se que a metodologia de geoprocessamento aplicada se mostrou adequada para a avaliação das potencialidades e dos impeditivos para instalação novas plantas de produção de biogás, advindo da suinocultura. A partir dessa metodologia, tornou-se possível identificar que as regiões geográficas intermediárias de Chapecó e Caçador no estado do Paraná, e as de Cascavel e Ponta Grossa no estado de Santa Catarina são os principais polos para instalação de novas unidades industriais voltadas para a produção de biogás, com origem agropecuária. Isso se traduz no fato que tais regiões unem tanto uma alta disponibilidade de substrato para inserção no processo produtivo das plantas industriais quanto uma alta capilaridade de localidades consideradas ideais para instalação destas plantas.

Em paralelo, foi possível identificar, através da metodologia de pesquisa bibliográfica de artigos científicos, que países como Estados Unidos e China se destacam na produção acadêmica acerca do biogás. Isso pode estar relacionado ao fato que tais países são responsáveis por grande parte das emissões de gases de efeito estufa globais e estão numa intensa busca de descarbonização de suas matrizes energéticas [69], de forma que o incentivo a pesquisas de produção, tratamento e purificação de biogás ganha relevância.

Por fim, a partir da metodologia de análise prospectiva de patentes, tornou-se possível observar que a China, Estados Unidos e Alemanha, são os principais depositantes de patentes no tema de biogás. Nesse contexto, a China é representada por instituições acadêmicas como proponentes das patentes, e os Estados Unidos e Alemanha, representados por empresas e startups, voltadas ao depósito de patentes.

9.3 TRABALHOS FUTUROS

A partir dessas conclusões, visualizou-se a possibilidade de possíveis trabalhos futuros como a avaliação da geração de energia elétrica das novas usinas *Gas-to-Wire* a serem instaladas de acordo com o formato de conversão do biogás em eletricidade através da utilização de conjunto moto-gerador ou de turbinas, pois possuem eficiências diferentes, de forma a influenciar no rendimento final de energia da usina para a rede.

Outro trabalho seria a avaliação do rendimento de biogás com a substituição dos modelos de reatores lagoa coberta para reatores UASB e CSTR, podendo ser analisado tanto o aumento ou diminuição da quantidade de biogás produzida para o tratamento de um mesmo resíduo agropecuário, quanto no âmbito financeiro-econômico, avaliando custos, viabilidade financeira e tempo de retorno de investimento ao realizar essa transição de

modelos de reatores.

Como última possibilidade de trabalho futuro, seria uma avaliação por análise FOFA (Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças, ou SWOT do inglês) do biogás na China, analisando políticas públicas, desenvolvimento industrial, aprimoramento de recursos humanos, entre outros pontos na temática de biogás.

Referências Bibliográficas

- 1 SANTOS, E. M. da S. A relação do homem com o processamento de energia e seu consumo. *Inclusão Social*, v. 12, n. 1, 2018.
- 2 SIMABUKULO, L. A. N. et al. Energia, industrialização e modernidade: história social. *PROJETO ELETROMEMÓRIA-HISTÓRIA DA ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO, Universidade Estadual de São Paulo. Produções... São Paulo, SP: fflch*, p. 1–34, 2006.
- 3 ENERGÉTICA, E. de P. *Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário. Intensidade de carbono das fontes de energia*. [S.l.]: Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2022/03)[Decarbonization of the Road Transport . . . , 2022.
- 4 GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista Usp*, n. 72, p. 6–15, 2007.
- 5 FREITAS, G. S.; DATHEIN, R. As energias renováveis no brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. *Nexos Econômicos*, v. 7, n. 1, p. 71–94, 2013.
- 6 OLIVEIRA, G. et al. O que significa descarbonizar? uma visão da sociedade atual sem energia fóssil. *Sustentabilidade e descarbonização: desafios práticos*, CECS–Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade Universidade do Minho, p. 9–27, 2020.
- 7 QUÉRÉ, C. L. et al. Global carbon budget 2016. *Earth System Science Data*, Copernicus GmbH, v. 8, n. 2, p. 605–649, 2016.
- 8 RIBEIRO, L. F.; DUTRA, S. et al. Estratégias para o futuro energético do brasil: Análise do plano nacional de energia 2050. *CIPEEX*, v. 4, 2023.
- 9 BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no brasil. *Interciencia*, Asociación Interciencia Venezuela *interciencia@ gmail. com*, v. 43, n. 10, p. 680–688, 2018.
- 10 ABIOGAS, P. *Programa Nacional do Biogás e do Biometano*,(2022).

- 11 CIBIOGÁS, C. D. E.-B. Nota técnica: N 001/2022—panorama do biogás no brasil em 2021. *CIBiogás*. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2022/09/REVIS2022>.
- 12 PARSAEE, M.; KIANI, M. K. D.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and bioenergy*, Elsevier, v. 122, p. 117–125, 2019.
- 13 ABIOGÁS, P. *Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano*, (2018) 80.
- 14 MORAIS, T. N. *APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS AGRO-PECUÁRIOS NO MODELO DE ANÁLISE INTEGRADA BRASILEIRO*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.
- 15 CARDOSO, F.; BOMTEMPO, J. V.; BORSCHIVER, S. Elaboração de roadmap tecnológico para a produção de biogás a partir de vinhaça. *Cadernos de Prospecção*, v. 10, n. 3, p. 495–495, 2017.
- 16 PETRÓLEO, G. N. e. B. Agência Nacional de. *Resolução ANP N° 886: Especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional*. [S.l.]: ANP, 2022.
- 17 AMBIENTE, M. de M. Programa nacional metano zero. In: . [S.l.: s.n.], 2022.
- 18 ROYA, B. et al. Biogás: uma energia limpa. *Revista Eletrônica Novo Enfoque*, v. 13, n. 13, p. 142–149, 2011.
- 19 POBLETE, I. B. de S.; ARAÚJO, O. d. Q. F.; MEDEIROS, J. L. de. Simulação e análise de produção e condicionamento de biogás. 2019.
- 20 SILVA, M. L. B. da; MEZZARI, M. P. Tratamento e purificação de biogás.
- 21 PETRÓLEO, G. N. e. B. Agência Nacional de. *Resolução ANP N° 906: Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e as instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional*. [S.l.]: ANP, 2022.
- 22 FLORES, M. C. Viabilidade econômica do biogás produzido por biodigestor para produção de energia elétrica—estudo de caso em confinador suíno. *Marcelo Costa Flores*, p. 31–32, 2014.
- 23 MICRO, S. B. d. A. às; EMPRESAS, P. *Data Sebrae*. 2020.

- 24 SPERLING, M. V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. [S.l.]: Editora UFMG, 1996. v. 1.
- 25 ABES, A. de Engenharia Sanitária e A. O que é saneamento básico? *ABES*. Disponível em: <http://www.abes-mg.org.br/visualizacao-de-artigos/ler/10374/o-que-e-saneamento-basico>, 2020.
- 26 MATA, N. D. D. Panorama geral da produção e utilização do biogás no Brasil.
- 27 GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & saúde coletiva*, SciELO Brasil, v. 17, p. 1503–1510, 2012.
- 28 TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário*. [S.l.]: ABNT, 1986.
- 29 MOTTA, F. d. Produza sua energia: biodigestores anaeróbios. *Recife gráfica*, Editora AS, 1986.
- 30 SUÍNOS, A. B. de Criadores de. *Dados de Mercado - 2021*. [S.l.]: ABCS, 2021.
- 31 BIOGÁS, G. P. do. Geração e utilização. *Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V.(FNR), Leipzig*, 2010.
- 32 CHERNICHARO, C. d. L. et al. Reatores anaeróbios. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, v. 5, p. 2, 1997.
- 33 KARLSSON, T. et al. Manual básico de biogás. *Lajeado: Editora da Univates*, 2014.
- 34 ARAÚJO, A. P. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- 35 DEGANUTTI, R. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*, SciELO Brasil, 2002.
- 36 FRIGO, K. D. de A. et al. Biodigestores: seus modelos e aplicações. *Acta Iguazu*, v. 4, n. 1, p. 57–65, 2015.
- 37 SOARES, R.; SILVA, S. d. Evolução histórica do uso de biogás como combustível. *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso–IFT: Cuiabá*, 2010.
- 38 MELO, D. F. d. et al. Quantificação, classificação e direcionamento dos resíduos gerados na produção de suínos-estudo de caso. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

- 39 KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022., 2022.
- 40 CASARIN, M. A. et al. Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura. 2016.
- 41 PRAMANIK, S. K. et al. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports*, Elsevier, v. 8, p. 100310, 2019.
- 42 KARIM, K. et al. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 96, n. 16, p. 1771–1781, 2005.
- 43 MEDEIROS, J. S. de; CÂMARA, G. Geoprocessamento para projetos ambientais. 2001.
- 44 ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento conceitos e definições. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF*, v. 7, n. 2, 2017.
- 45 JR, A. P.; ROMERO, M. d. A.; BRUNA, G. C. Curso de gestão ambiental. In: *Curso de gestão ambiental*. [S.l.: s.n.], 2014. p. xx–1245.
- 46 KURIYAMA, B. T. Sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (sig) na análise dos impactos referentes à cultura canavieira e reflorestamento: a subtração dos biomas nativos no município de itirapina-sp. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2009.
- 47 CEREDA, A.; RÖHM, S. A. Analysis of environmental fragility using multi-criteria analysis (mce) for integrated landscape assessment. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, JSTOR, v. 8, n. 1, p. 28–37, 2014.
- 48 OVIEDO-PASTRANA, M. et al. Mapa do desenvolvimento da pecuária leiteira no estado de minas gerais, brasil: nova abordagem na pecuária para integração espacial de variáveis produtivas. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, SciELO Brasil, v. 66, p. 1147–1154, 2014.
- 49 SANTOS, A. A. dos. Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas de fragilidade ambiental no parque estadual da serra do rola moça. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- 50 CABRAL, A. Análise multicritério em sistemas de informação geográfica para a localização de aterros sanitários. *O caso da região sul da Ilha de Santiago, Cabo Verde*, 2012.

- 51 MALCZEWSKI, J. *GIS and multicriteria decision analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1999.
- 52 BORSCHIVER, S.; ALMEIDA, L. F.; ROITMAN, T. Monitoramento tecnológico e mercadológico de biopolímeros. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 18, p. 256–261, 2008.
- 53 BORSCHIVER, S.; SILVA, A. d. Technology roadmap–planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia. *Rio de Janeiro: Interciência*, 2016.
- 54 PIZZANI, L.; SILVA, R. C.; HAYASHI, M. C. P. I. Bases de dados e bibliometria: a presença da educação especial na base medline. *Revista brasileira de biblioteconomia e documentação*, v. 4, n. 1, p. 68–85, 2008.
- 55 ALENCAR, M.-S.-d.-M.; PORTER, A. L.; ANTUNES, A.-M.-d.-S. Nanopatenting patterns in relation to product life cycle. *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, v. 74, n. 9, p. 1661–1680, 2007.
- 56 CARAHER, V. The evolution of the patent information world over the next 10 years: A thomson scientific perspective. *World Patent Information*, Elsevier, v. 30, n. 2, p. 150–152, 2008.
- 57 ENERGIA, M. de Minas e. Resenha energética brasileira. In: MME BRASÍLIA. [S.l.], 2021.
- 58 ENERGIA, P. D. d. E. de et al. Ministério de minas e energia. *Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE*, 2024.
- 59 MILANEZ, A. Y. et al. O acordo de paris e a transição para o setor de transportes de baixo carbono: o papel da plataforma para o biofuturo. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017.
- 60 GENIN, C.; FRASSON, C. M. R. O saldo da cop26: o que a conferência do clima significou para o brasil e o mundo. *World Resources Institute (WRI), WRI Brasil*, v. 22, 2021.
- 61 CIBIOGÁS, C. D. E.-B. Panorama e potencial de crescimento da produção de biogás e biometano no sul do brasil. *CIBiogás. Disponível em: j <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2022/09/REVIS2022>*.
- 62 CIBIOGÁS, C. D. E.-B. Potencial de produção de biogás:mapeamento de substratos e sua conversão energética no sul do brasil. *CIBiogás. Disponível em: j <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2022/09/REVIS2022>*.
- 63 HOLT, C. C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International journal of forecasting*, Elsevier, v. 20, n. 1, p. 5–10, 2004.

- 64 WINTERS, P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management science*, INFORMS, v. 6, n. 3, p. 324–342, 1960.
- 65 CIBIOGÁS, C. D. E.-B. Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano. *CIBiogás*. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2022/09/REVIS2022>.
- 66 LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator uasb da ete-ufes.
- 67 NANTASAKSIRI, K.; CHAROEN-AMORNKITT, P.; MACHIMURA, T. Integration of multicriteria decision analysis and geographic information system for site suitability assessment of napier grass-based biogas power plant in southern thailand. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, Elsevier, v. 1, p. 100011, 2021.
- 68 GETIS, A.; ORD, J. K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical analysis*, Wiley Online Library, v. 24, n. 3, p. 189–206, 1992.
- 69 WATCH, C. Washington, dc: World resources institute. *Global Historical Greenhouse Gas Emissions data (1990-2019)*, 2018.