

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LARISSA JONALY RODRIGUES

PANORAMA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DOS
TRATAMENTOS DE ESGOTO SANITÁRIO E DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS

SÃO CARLOS – SP
2022

Larissa Jonaly Rodrigues

Panorama de Aproveitamento Energético do Biogás dos Tratamentos de Esgoto Sanitário e de Resíduos Sólidos Urbanos

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof^ª. Dr^ª. Adriana Paula Ferreira Palhares

São Carlos – SP
2022

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Domingos Cesar Nunes Rodrigues e Rosemary Alice Rodrigues, por terem me dado suporte para estar em uma universidade de excelência, além de todo o amor, carinho e apoio ao longo dos anos. Agradeço também a minha irmã, Talini Rodrigues, por ter me incentivado e me apoiado nessa jornada.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial aos meus amigos de infância Glória Maria Neiva Leon, Náthaly Tamires Pedraça Ferreira Braga, Murilo de Barros Baruki, Lays Fernanda Preza Regenold, Isabella Santos Provenzano, Isabela Helena de Carvalho Vargas e Sofia Toledo Philbois, por se fazerem presentes mesmo distante. Agradeço aos colegas e amigos encontrados durante essa caminhada da graduação, em especial a Edson Dornas Vicente, Gabriel Salomon Almeida, Isabela Parolo de Mattos Nogueira, Gustavo Nogueira Lopes da Silva, Mariana de Brito Ferraz, Marcela Parolo de Mattos Nogueira, Fernanda Amaral Faria, Izabela de Oliveira Fontana, Marina Pelegrini Maurício da Rocha, Raissa Guidolin Marcato, Pedro Henrique Cavalcante Pinto, João Pedro Gaudêncio Ribeiro dos Santos, Murilo Tadeu Rusconi Furlani, Victor Vasconcellos Fiore, Eder Daniel Odega Mesa, Leonardo Arruda Lima, Paulo Henrique Silva Rocha, Júlio Henrique Zanata e Rogério Felito da Silva, por todos os momentos de felicidade, tristeza, superação, conquistas e apoio ao longo dos últimos anos.

Agradeço a todas as pessoas com quem convivi no PET-EQ UFSCar e na EPEQ UFSCar, entidades nas quais tive prazer de desenvolver atividades e que tenho grande paixão, por todos os momentos de aprendizado, companheirismo, união e amor.

Agradeço a todos os professores, em especial a Fernanda Perpétua Casciotori e Fernanda Romanholi Pinhati pela oportunidade de criar uma relação de parceria, carinho, admiração e muita aprendizagem. Agradeço aos meus professores orientadores Adriana Paula Ferreira Palhares e Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho, além de todo apoio e compreensão durante o percurso.

Por fim, agradeço a todos os funcionários da universidade que de alguma forma apoiaram meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

RESUMO

O biogás é um produto sustentável que se apresenta como uma alternativa promissora para o cenário energético nacional. Essa matéria-prima pode ser utilizada para a geração de energia elétrica, térmica, mecânica e convertida em biometano. Além da contribuição ambiental, o aproveitamento energético do biogás garante a recuperação de recursos antes descartados. O setor de saneamento é responsável pelo maior volume de biogás produzido, assim, o presente trabalho tem como objetivo geral traçar um panorama do aproveitamento do biogás proveniente do saneamento. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura mais recente, a partir de documentos científicos publicados na última década. Através dessa análise, foi observado que a aplicação e produção do biogás no Brasil ainda é incompatível com o seu potencial. Acredita-se que partindo das municipalidades, o potencial que hoje o biogás tem no Brasil pode de fato sair de meras expectativas e tornar-se realidade. É preciso então que o poder público crie maiores incentivos para que a produção e implementação do biogás alcance o máximo desse potencial, principalmente através dos resíduos sólidos urbanos e do esgoto sanitário, contribuindo assim para a modernização e maior sustentabilidade da matriz energética brasileira, impulsionando também a geração de emprego e renda, bem como maior potencial econômico às empresas que implementarem o uso desse produto em seus processos.

Palavras-chave: Biogás. Esgoto Sanitário. Resíduos Sólidos. Sustentabilidade. Matriz Energética Brasileira.

ABSTRACT

Biogas is a sustainable alternative with great potential to be applied in the national energy scenario. This energy can be used as electrical, thermal, mechanical energy and converted into biomethane. In addition to the environmental contribution, the energy use of biogas guarantees the reuse of previously discarded resources. The sanitation sector is responsible for the largest volume of biogas produced, thus, this present research has the general objective of drawing an overview of the use of biogas from sanitation. For this, a review of the most recent literature was carried out, based on scientific documents published in the last decade. Through this analysis, it was observed that the application and production of biogas in Brazil is still compatible with its potential. It is believed that starting from the municipalities, the potential that biogas has today in Brazil can in fact go beyond mere expectations and become reality. It is therefore necessary that the public authorities create greater incentives for the production and implementation of biogas to reach the maximum of this potential, mainly through urban solid waste and sanitary sewage, thus contributing to the modernization and greater sustainability of the Brazilian energy matrix, also boosting the generation of employment and income, as well as greater economic potential for companies that implement the use of this product in their processes.

Keyword: Biogas. Sanitary Sewage. Solid Waste. Sustainability. Brazilian Energy Matrix.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	CENÁRIO NACIONAL DO BIOGÁS	14
3.2	O BIOGÁS	18
3.3	A BIOMASSA	22
3.4	O BIODIGESTOR	23
4	METODOLOGIA.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	RESÍDUOS DE SANEAMENTO BÁSICO E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	28
5.2	FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO	30
5.3	FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	33
5.4	TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	35
5.5	PROCESSOS ATUAIS QUE UTILIZAM DO BIOGÁS PROVENIENTE DO SANEAMENTO	38
5.6	PROCESSOS DE PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	41
5.7	PANORAMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS	43
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento do setor de biogás entre 2017 e 2021 – plantas em operação.	14
Figura 2 - Plantas cadastradas em 2021.	14
Figura 3 - Distribuição de plantas de biogás pelo Brasil – crescimento entre 2020 e 2021.	15
Figura 4 – Número (Nº) de plantas em relação ao volume produzido.	16
Figura 5 - Proporção entre número de plantas de biogás e o volume, por porte.	16
Figura 6 - Volume de biogás produzido por estado.	17
Figura 7 - Esquema do sistema de biodigestão.	24
Figura 8 – Fluxograma com as etapas da pesquisa.	25
Figura 9 - Bibliografia encontrada para cada palavra-chave.	26
Figura 10 - Gravimetria dos RSU no Brasil.	29
Figura 11 - Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil.	30
Figura 12 - Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás de aterro.	36
Figura 13 - Alternativas para uso de energia térmica do biogás.	37
Figura 14 - Utilização do biogás.	41
Figura 15 - As tecnologias para ajuste de poder calorífico de biogás.	42
Figura 16 - Panorama de aproveitamento energético do biogás de tratamento de esgoto sanitário e tratamento de resíduos sólidos urbanos.	44
Figura 17 - Estimativa de emissões de GEEs de sistemas de tratamento de esgoto do Brasil para 2019, 2023 e 2033.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e composição típicas do biogás.....	20
Tabela 2 - Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia.....	21
Tabela 3 - Bibliografia encontrada para cada palavra-chave.....	26
Tabela 4 - Portifólio de estudo.....	27
Tabela 5 - Composição do biogás proveniente do tratamento do esgoto sanitário.....	32
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens da produção do tratamento de esgoto sanitário.....	33
Tabela 7 - Composição do biogás proveniente do tratamento dos resíduos sólidos urbanos...	34
Tabela 8 - Exemplos de usinas de aproveitamento de biogás no Brasil (continua).....	40
Tabela 9 - Tecnologias de purificação do biogás.....	42

LISTA DE SIGLAS

ABiogás - Associação Brasileira do Biogás

CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

EJ - Exajoules

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSB - Resíduos dos Serviços de Saneamento Básico

SINIR - Sistema Nacional de Informação sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

RSB - Resíduos de Saneamento Básico

RSI - Resíduos Sólidos Industriais

Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário

Nm³ - Normal Metro Cúbico

1 INTRODUÇÃO

Levando em consideração a problemática ambiental, surge um debate mundial sobre o consumo consciente, recursos naturais, mudanças climáticas, e principalmente sobre a segurança energética dos países. A demanda por energia é suprida pelo conjunto de fontes de energia disponíveis, ou seja, pela matriz energética, a qual se compõe de fontes renováveis e não renováveis. No Brasil, diferente da realidade mundial, observa-se que a matriz energética é diversificada, tendo quase metade proporcionada por fontes renováveis, com destaque para a fonte hidroelétrica (EPE, 2022).

No entanto, essa base em fonte hídrica vem sendo prejudicada no país, mediante aos constantes eventos de falta d'água observados nas últimas duas décadas, quando foram debatidos pela primeira vez, o desabastecimento de água e o racionamento de energia elétrica. Somado a isso, estão os impactos ambientais gerados pela produção de energia através de fonte hídrica e seu alto custo repassado ao consumidor. Desse modo, surge a demanda pelo desenvolvimento de novas fontes de energia renováveis.

Neste contexto, o biogás surge como uma alternativa sustentável que pode ser agregada para otimizar o cenário energético do Brasil. O biogás pode ser utilizado como fonte de energia elétrica, térmica, mecânica e convertida em biometano. Além de contribuir para o meio ambiente o aproveitamento energético do biogás também promove a recuperação de recursos antes descartados.

Conforme Prati (2010), o biogás se compõe pela mistura de gases, cujo tipo e percentual variam em conformidade com as peculiaridades dos resíduos e as condições de funcionamento do processo de digestão. Os constituintes principais do biogás são o metano com aproximadamente 65% e o dióxido de carbono com aproximadamente 35%. Outros gases, como sulfeto de hidrogênio, o nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono também compõe o biogás em menores concentrações em porcentagens de aproximadamente 5%.

O Brasil é considerado o país com maior potencial de produção de biogás em nível mundial, possuindo matéria prima para atender a 70% do consumo interno de diesel e 40% do consumo de eletricidade, uma vez que o país possui altas quantidades de resíduo sólido urbano, de saneamento e agroindustriais; além disso, o biogás tem recebido atenção política e regulamentadora. No entanto, o Brasil explora apenas 2% do seu potencial, uma vez que ainda apresenta custos de produção elevado, prejudicando assim sua expansão e aplicação em grandes centros urbanos (ABIOGÁS, 2021).

Conforme a ABiogás (2022), o potencial nacional para produção do biogás não é comparável a nenhuma outra nação e pode ocorrer, exclusivamente, a partir de resíduos sólidos urbanos, de saneamento e agroindustriais. Assim, o biogás pode ser produzido, ampliando o potencial energético, sem demanda por plantações ou inutilização de áreas de cultivo, aproveitando os resíduos que hoje são desperdiçados.

No ano de 2021, o Brasil produziu 2,35 bilhões de Nm³ de biogás com 55 plantas em operação, gerando um aumento de 10% da produção em relação ao ano de 2020 (2,14 bi Nm³/ano), ou seja: aumento da descarbonização do ecossistema sustentável brasileiro a partir da gestão de resíduos. Para 2022, a estimativa de crescimento na produção é de mais de 22%, com o início da operação de plantas que se encontravam em implantação e reforma no ano de 2021 (56 plantas), podendo ultrapassar os 2,8 bilhões de Nm³/ano de biogás (CIBIOGÁS, 2022).

O setor agropecuário possui maior representatividade quanto ao número de plantas industriais que realizam esta prática sustentável, sendo responsável por 80% das plantas de biogás, enquanto o setor industrial e o setor de saneamento contribuíram em 11% e 9%, respectivamente, no número de plantas em operação no ano de 2021. Porém, quanto ao volume de biogás, o setor de saneamento foi responsável por 74% do volume total produzido, seguido pelos setores industrial (16%) e agropecuário (10%) (CIBIOGÁS, 2022).

Destaca-se que quase toda a produção de biogás no país é direcionada à geração de energia elétrica. No ano de 2021, 87% das plantas em operação destinaram 71% do volume de biogás brasileiro para geração de energia elétrica.

Conforme dados publicados pela FGV (2019), o uso de resíduos de esgotamento sanitário e resíduos sólidos urbanos como biomassa para produção de biogás vem crescendo no mercado internacional, com destaque ao cenário europeu, e no Brasil tem grande potencial para geração de oportunidades e novos negócios. Ademais, essa nova lógica de aplicação desses resíduos contribui para a minimização dos impactos sob o ecossistema e para um aproveitamento social e econômico mais inteligente.

O Marco Legal do Saneamento Básico, aprovado em 2020, visa a democratização ao acesso aos serviços de saneamento no país. Com isso, espera-se aumentar o potencial do biogás em 3 milhões de m³/dia, oriundo do biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Isso significa um aumento de mais de 85% no potencial de geração dessa origem. O volume representa cerca de 10% da meta da Abiogás, que prevê o potencial de entrega de 30 milhões de m³/dia a partir do biocombustível em 2030 (CHIAPPINI, 2020; CIBIOGÁS, 2020).

Nesse contexto, esse estudo visa analisar o aproveitamento do biogás proveniente do saneamento, a partir da avaliação de diferentes aspectos relacionados à produção e à aplicação desse produto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho foi traçar um panorama do aproveitamento do biogás proveniente do setor de saneamento, especialmente proveniente do tratamento de esgoto sanitário e do tratamento de resíduos sólidos urbanos de aterro sanitário, dado o destaque deste setor no cenário nacional e com maior aplicação na geração de energia elétrica e biocombustíveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

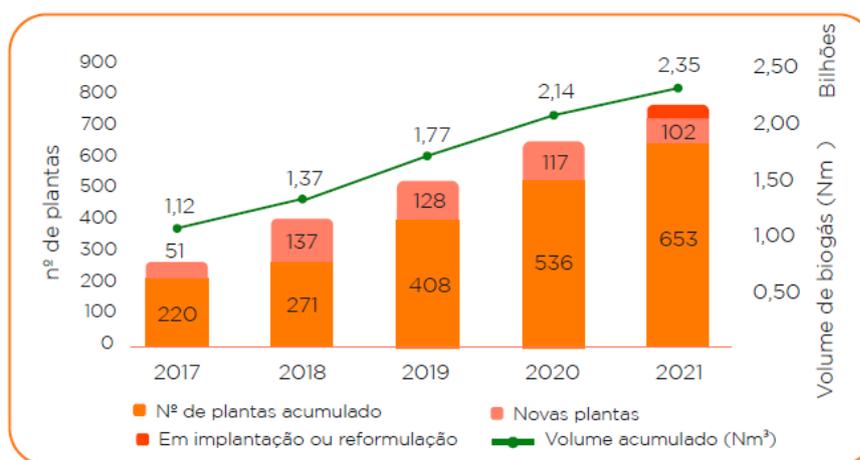
- Fazer um levantamento das composições publicadas do biogás de origem de saneamento, caracterizando as diferentes composições do biogás proveniente do tratamento de esgoto sanitário e do tratamento de resíduos sólidos urbanos de aterros sanitários;
- Revisar as tecnologias em uso para aproveitamento energético desse material, apresentando exemplos de usinas em atividade no país;
- Compilar as informações na forma de um panorama do aproveitamento do biogás proveniente do saneamento, considerando seus aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CENÁRIO NACIONAL DO BIOGÁS

Conforme dados do CIBiogás (2022), no ano de 2021 houve um aumento de 16% no número de plantas em operação e 10% no volume de biogás produzido em relação ao ano de 2020, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Crescimento do setor de biogás entre 2017 e 2021 – plantas em operação.



Fonte: CIBiogás, 2022.

O total de plantas de biogás cadastradas no Brasil no ano de 2021 foi de 811, onde 755 já estavam em operação. Outras 102 foram cadastradas ao longo de 2021 resultando em 2,3bi Nm³/ano de biogás em operação mais 209 mil Nm³/ano em 2021. Conforme apresentado no fluxograma ilustrado na Figura 2, houve então um aumento de 10% de volume de biogás entre 2020 e 2021 (CIBIOGÁS, 2022).

Figura 2 - Plantas cadastradas em 2021.

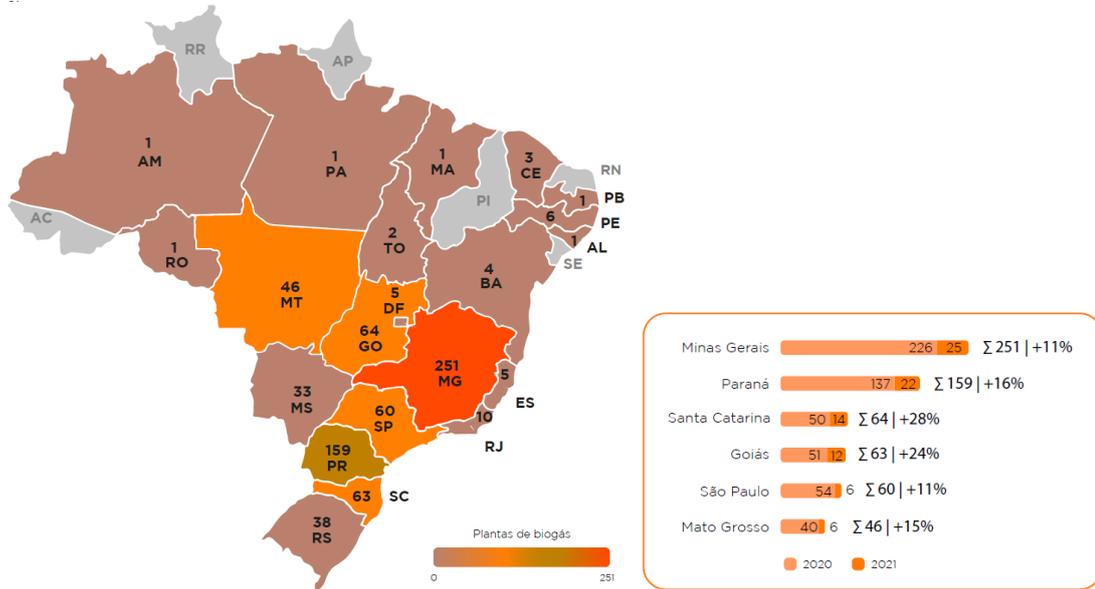


Fonte: CIBiogás, 2022

Considerando as 811 plantas de biogás cadastradas, 755 estavam em operação em 2021 com aproveitamento energético (93%), 44 encontravam-se em fase de implantação (5%) e 12 estavam passando por reformulação ou reforma (2%) e devem voltar a operar no decorrer do

ano de 2022 (CIBIOGÁS, 2022). O mapa ilustrado na Figura 3 mostra a distribuição de plantas de biogás pelo país.

Figura 3 - Distribuição de plantas de biogás pelo Brasil – crescimento entre 2020 e 2021.



Fonte: CIBiogás, 2022.

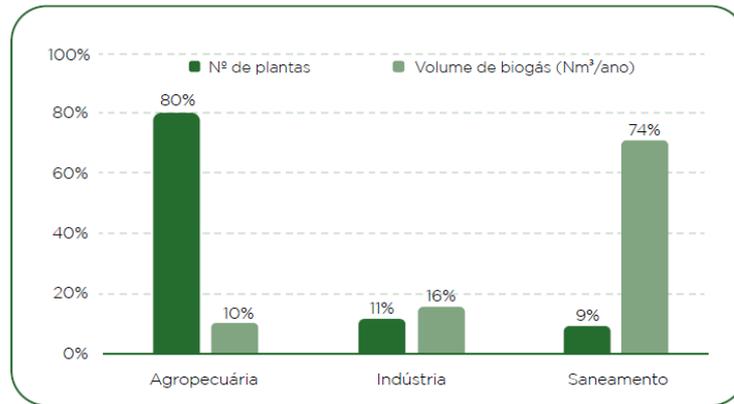
Conforme a Figura 3, o estado de Minas Gerais se destaca com 251 plantas registradas, seguido do estado do Paraná, com 159 plantas, e Santa Catarina com 64 plantas. Destaca-se o estado de Minas Gerais devido a diversidade nas atividades de agronegócio e indústria, assim como, devido à modernização na política de saneamento. Vale comentar que combinado com esses benefícios, o estado possui uma meta de zerar as emissões de carbono até 2050 devido a campanha mundial “Race to Zero”. No entanto, entre os anos de 2020 e 2021, aumentou-se de forma significativa as plantas cadastradas nos estados de Santa Catarina e Goiás, um crescimento de 28% e 24%, respectivamente (CIBIOGÁS, 2022).

Em 2021, as plantas em operação produziram 2,3 bilhões de Nm³ de biogás. Para 2022, é esperado um crescimento de mais de 22%, com o início da operação de 56 plantas que estão em fase de implantação ou em reforma. Com isso, espera-se alcançar uma produção anual de pelo menos 2,8 bilhões de Nm³ de biogás (CIBIOGÁS, 2022).

Em relação às fontes de substrato, em 2021, o setor agropecuário foi responsável por 80% das plantas de biogás em operação no país. É válido comentar que essa baixa representatividade do setor agropecuário acontece, pois, a maioria das plantas de biogás deste segmento no país são usinas de pequeno porte que geram energia para consumo próprio raramente gerando alguma produção excedente. Enquanto o setor industrial e o setor de saneamento contribuíram em 11% e 9%, respectivamente, no número de plantas. Quanto ao volume de

biogás, o setor de saneamento foi responsável por 74% do volume total produzido, seguido pelos setores industrial (16%) e agropecuário (10%), conforme demonstrado na Figura 4. É importante destacar que a natureza/composição do resíduo de cada setor deve ser responsável por esses números (CIBIOGÁS, 2022).

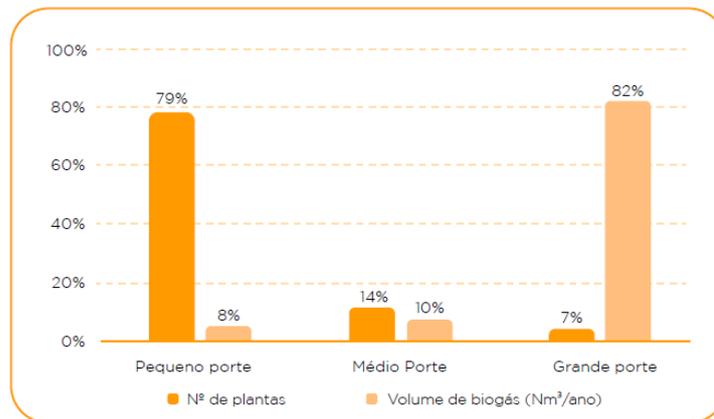
Figura 4 – Número (Nº) de plantas em relação ao volume produzido.



Fonte: CIBiogás, 2022.

As plantas nacionais de biogás são classificadas em três categorias: pequena, média e grande. O gráfico da Figura 5 apresenta a proporção entre número de plantas de biogás e o volume, por porte (CIBIOGÁS, 2022).

Figura 5 - Proporção entre número de plantas de biogás e o volume, por porte.



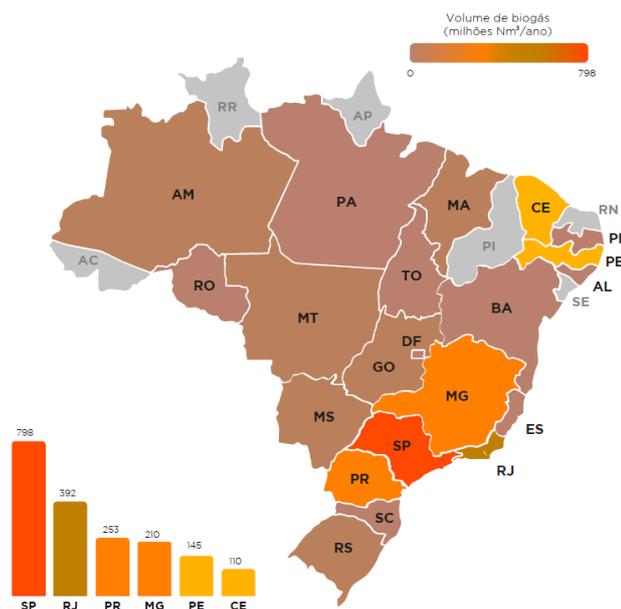
Fonte: CIBiogás, 2022.

Conforme a Figura 5, observa-se que 79% das plantas em operação são classificadas como de pequeno porte e responsáveis pela produção de 8% do volume total de biogás. No entanto, 82% do biogás produzido nacionalmente resulta das plantas de grande porte, que correspondem a apenas 7% das unidades em operação. Já as plantas de médio porte, que correspondem a 14% das unidades em operação, produzem 10% do volume total do biogás.

nacional (CIBIOGÁS, 2022).

De acordo com o último levantamento nacional de plantas de biogás e biometano, realizado pelo CIBiogás, o número de unidades em operação passou de 653, em 2020, para 755 em 2021. Isso representa um crescimento de 16% a nível nacional. No entanto, quando avaliamos cenários regionalizados, é notável que alguns estados se mantiveram estagnados e outros que ainda não possuem nenhuma planta cadastrada. Em 2021, foram registradas no BiogasMap as primeiras unidades geradoras de biogás com aproveitamento energético dos estados de Alagoas e Rondônia. Já os estados do Acre, Amapá, Piauí, Rio Grande do Norte, Roraima e de Sergipe permaneceram sem registrar a ocorrência de plantas de biogás que realizem algum tipo de aproveitamento energético. Tratando-se do volume de biogás e sua equivalência energética, os cinco estados que mais produzem são: São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Minas Gerais, Pernambuco e Ceará, conforme ilustrado no mapa apresentado na Figura 6 (CIBIOGÁS, 2022).

Figura 6 - Volume de biogás produzido por estado.



Fonte: CIBiogás, 2022.

Apesar de São Paulo possuir apenas 60 plantas cadastradas (8%) o estado se mantém a frente dos demais, com uma produção de 798 milhões de metros cúbicos por ano. Essa quantidade representa 34% da produção nacional, devido ao maior número de unidades de grande porte, que aproveitam, principalmente, resíduos da indústria e do setor de saneamento. O Rio de Janeiro, com apenas 10 plantas cadastradas, é o segundo estado que mais produz biogás no país, seguido do Paraná, Minas Gerais, Pernambuco e Ceará (CIBIOGÁS, 2022).

A principal aplicação energética do biogás produzido pelas plantas nacionais é para geração de energia elétrica. Em 2021, 87% das unidades em operação utilizaram esta fonte energética para tal finalidade, resultando no uso de 71% do volume de biogás produzido para geração de energia elétrica. Essa produção equivale a um potencial energético de mais de 1 milhão de residências (CIBIOGÁS, 2022).

Quanto ao aproveitamento térmico do biogás, esse é feito em 11% das plantas em operação para diversas finalidades, como secagem de grãos, queima em caldeiras para produzir vapor, aquecimento e secagem de lodos de esgotos. Considerando o volume, 7% do biogás produzido em 2021 destinou-se à geração de energia térmica. Unidades que utilizam o biogás para produzir energia mecânica para movimentar turbinas, por exemplo, somam 6 plantas, ou seja, 1% do total nacional. Em termos de volume tais plantas correspondem a 0,3% do biogás produzido em 2021 (CIBIOGÁS, 2022).

Quanto ao sistema de purificação de biogás com geração de biometano para autoconsumo ou comercialização, o país soma 10 plantas, equivalente a 1% do total nacional. Porém, quanto ao volume, essas plantas equivalem a 23% do volume total de biogás produzido em 2021. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), em 2021 havia 4 usinas autorizadas a produzir e comercializar biometano no país e 2 usinas em processo de autorização. Essa produção tem equivalente energético para atender a 378 litros de diesel por dia (CIBIOGÁS, 2022).

Estatisticamente, o setor de biogás segue em crescimento no Brasil, apesar do cenário desfavorável, destacando a volatilidade no preço do barril do petróleo e a alta do dólar que impulsionou aumento nos preços dos combustíveis e do GLP. Em paralelo à crise hídrica que provocou a implementação da bandeira de escassez hídrica no setor elétrico, além da pandemia da COVID-19 que afetou diversos setores da economia (CIBIOGÁS, 2022).

No cenário pós pandemia, o setor de biogás nacional segue em crescimento. Segundo a ABiogás, é crescente o desenvolvimento da indústria nacional de fornecedores de bens e serviços para o setor de biogás e isso tem ajudado a diminuir os custos de instalação de plantas de biogás e biometano no país (CIBIOGÁS, 2022).

3.2 O BIOGÁS

No final do século XVI, ao identificar a presença de substância gasosa inflamável na superfície de regiões pantanosas, o homem constatou a possibilidade de gerar gases combustíveis. Após diversos estudos, notou-se que tais gases de composição até então desconhecida e com odor forte relacionavam-se à decomposição da matéria orgânica

proveniente dessas regiões pantanosas. No entanto, foi somente em 1776 que o físico italiano Alessandro Volta identificou a composição de tal gás e reconheceu a presença de gás metano (CH_4) no gás pantanoso (SOARES e SILVA, 2010).

Mais tarde, no século XIX, Ulysse Gayon, discente de Louis Pasteur, misturou estrume e água a 35°C , submeteu essa mistura a uma fermentação anaeróbica, e identificou a possibilidade de produzir 100 litros de gás por metro cúbico de matéria. Em 1884, o próprio Louis Pasteur demonstrou que esse gás poderia ser usado como combustível para alimentar sistemas de iluminação urbana e aquecimento. A primeira aplicação de gás metano produzido por digestão anaeróbica em escala, ocorreu em 1859, em um hospital na Índia. Trinta anos mais tarde o biogás foi empregado para iluminação publicada em vias públicas da cidade de Exeter, na Inglaterra (VILLELA e SILVEIRA, 2005).

De acordo com Aquino *et al.* (2014), somente em 1911, na Grã-Bretanha, que o primeiro biodigestor que obteve biogás por meio de resíduos orgânicos foi desenvolvido. Impulsionado pelos problemas de abastecimento decorrente da Segunda Guerra Mundial, houve a demanda por novas fontes de energia para atender as necessidades de aquecimento de casas e cozinhas ou até mesmo para uso em motores a combustão. Assim, diversas instalações de biodigestores foram criadas.

No entanto, Villela e Silveira (2005) destacam que a abundância relativa das fontes tradicionais de energia, em conjunto com seu baixo custo de produção e eficiência, desestimulou o interesse pelo biogás na maioria dos países desenvolvidos. Somente países com poucas fontes de energia e capital, como Índia e China, continuaram mantendo o biogás como importante recurso, especialmente em áreas rurais.

Assim, com o tempo o biogás acabou sendo deixado de lado, sendo aplicado apenas como um complemento às fontes tradicionais de carvão e petróleo (SOARES e SILVA, 2010). Na década de 1970 a crise do petróleo resultou em uma elevação considerável no preço internacional desse recurso, levando muitas nações a adotarem um sistema de racionamento e a desenvolverem fontes alternativas de energia (CETESB, 2006).

Conforme Batista (2016), por muito tempo o biogás foi considerado apenas um subproduto obtido por meio da decomposição anaeróbica de resíduos sólidos, esgotos domésticos e resíduos de animais. Porém, a alta do preço dos combustíveis e o acelerado desenvolvimento econômico, resultaram em um ambiente favorável para geração de energia a partir de fontes renováveis. Assim, o biogás se tornou um combustível ambientalmente e economicamente atrativo.

O biogás consiste em uma mistura gasosa de dióxido de carbono e metano, que se assemelha ao gás natural, porém com menor poder calorífero. A produção pode ser tanto natural quanto artificial. A produção natural ocorre em meio anaeróbico por meio da ação de bactérias em matéria orgânica, que fermentam em determinadas condições de temperatura, pH e teor de umidade. Já a produção artificial, ocorre por meio de um equipamento denominado biodigestor anaeróbico com uso de dejetos e rejeitos como matéria-prima (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

Zanette (2009) complementa que além do metano e do dióxido de carbono, associam-se ainda pequenas quantidades de amônia e ácido sulfúrico. Além de traços de nitrogênio, hidrogênio, carboidratos saturados ou halogenados, monóxido de carbono e oxigênio, que podem ocasionalmente compor o biogás. Em geral, a mistura gasosa é saturada com vapor d'água e ainda conter material particulado e compostos orgânicos contendo silício.

A Tabela 1 apresenta os elementos que podem compor o biogás e suas respectivas quantidades.

Tabela 1 - Características e composição típicas do biogás.

Parâmetro	Gás de aterros ¹	Biogás – digestão anaeróbica ²
Poder calorífico inferior (MJ/Nm ³)	16	23
Metano (% vol)	35-65	53-70
Dióxido de carbono (% vol)	15-50	30-47
Nitrogênio (% vol)	5-40%	-
Ácido sulfídrico (ppm)	<100	<1000
Amônia (ppm)	5	<100

¹ produzido a partir da matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

² produzido a partir da matéria orgânica de resíduos agropecuários em reatores anaeróbicos.

Fonte: Persson, Jönsson e Wellinger, 2006.

É importante destacar que a composição e conteúdo energético do biogás depende do material orgânico e do processo de produção empregados. Ainda, conforme o tipo de material orgânico usado como fonte de origem do biogás, este pode ser chamado de gás de aterro, gás de esgoto, gás de lixo, gás de dejetos, gás de lodo, entre outros. Nota-se que não é encontrado, nitrogênio no biogás da digestão, enquanto tal volume no gás de aterros poder ser de até 40%. A quantidade de ácido sulfídrico é bem menor no biogás de aterros, assim como a quantidade de amônia. Quanto à porcentagem em volume de dióxido de carbono, o biogás de aterros possui uma maior faixa de possibilidades chegando até a 50%, mas ambos setores possuem uma faixa próxima de valores. Por fim, destaca-se o maior poder calorífico inferior do biogás oriundo da

digestão anaeróbica.

Conforme Piñas *et al.* (2016), o biogás é considerado um material renovável que pode produzir diversos tipos de energia e com capacidade e potencial para substituir os combustíveis fósseis, pois sua queima gera gases poluentes em uma quantidade bem menor comparado aqueles. Seu potencial calorífico varia de 5000 a 7000 kcal/m³. Pode-se comparar a relação de 1 m³ de biogás com outras fontes de energia (OLIVER *et al.*, 2008) (Tabela 2).

Tabela 2 - Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia.

0,61 litros de gasolina	0,45 litros de gás de cozinha
0,58 litros de querosene	1,50 quilos de lenha
0,55 litros de óleo diesel	0,79 litros de álcool hidratado

Fonte: Oliver *et al.*, 2008.

Kapdi *et al.* (2005), destacam que o biogás apresenta efeito corrosivo, frente aos compostos químicos em proporções menores, assim é preciso o emprego de materiais especiais nos equipamentos. Essa característica decorre da presença de sulfetos de hidrogênio (H₂S) em pequenas quantidades, devido à presença de enxofre na composição, considerado poluente do ar.

Uma vez que o teor de monóxido de carbono presente no biogás é inferior a 0,1%, considerado baixo, o biogás não apresenta efeitos tóxicos, porém os sulfetos de hidrogênio o tornam corrosivos. Assim, a presença de H₂S pode desencadear problemas sérios a saúde, caso ocorra a inalação desses gases após a combustão, uma vez que durante a queima os compostos se oxidam e é liberado dióxido de enxofre (SO₂), elemento prejudicial aos pulmões (CASSINI, 2003).

Com base na composição do biogás, resumem-se abaixo os principais parâmetros da digestão anaeróbia relacionada à geração de biogás:

- Impermeabilidade ao ar: As bactérias metanogênicas são essencialmente anaeróbias. A decomposição de matéria orgânica na presença de ar (oxigênio) irá produzir apenas dióxido de carbono (CO₂) (JUNIOR, 2000);
- Natureza do substrato: Os substratos nutritivos devem prover as fontes de alimento aos microrganismos, elementos químicos constituindo o material celular e os necessários às atividades enzimáticas, particularmente os oligo-elementos, como o cálcio, magnésio, potássio, sódio, zinco, ferro, cobalto, cobre, molibdênio e manganês. Em fortes concentrações, esses elementos têm um efeito inibidor sobre o processo de fermentação. Por

outro lado, os elementos majoritários como o carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre, têm uma importância fundamental no rendimento dos gases de fermentação (PECORA, 2006);

- Composição dos resíduos: Quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano e vazão de biogás. Os principais nutrientes dos microrganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos;

- Uma relação específica de carbono para nitrogênio deve ser mantida entre 20:1 e 30:1. A principal fonte de nitrogênio está nas dejeções humanas e de animais, enquanto os resíduos presentes nos restos de culturas representam o principal fornecedor de carbono. A produção de biogás não é bem-sucedida, se apenas uma fonte de material for utilizada (JUNIOR, 2000);

- Teor de água: O teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60 a 90% do peso do conteúdo total (JUNIOR, 2000);

- Temperatura: A atividade enzimática das bactérias depende estritamente da temperatura, visto que é conhecido que alterações bruscas de temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10 °C essa atividade é muito reduzida e acima de 65 °C as enzimas são desnaturadas pelo calor. Portanto, a faixa ideal para a produção de biogás é de 32 °C a 37 °C (bactérias mesofílicas) e de 50 °C a 60 °C (bactérias termofílicas) (JUNIOR, 2000);

- pH: A concentração em íons OH^- no meio exterior tem uma grande influência sobre o crescimento dos microrganismos. Na digestão anaeróbia, observam-se duas fases sucessivas: a primeira se caracteriza por uma diminuição do pH em patamares próximos de 5,0 e a segunda por um aumento do pH e sua estabilização em valores próximos da neutralidade. A redução do pH é devida à ação das bactérias acidogênicas, as quais liberam rapidamente ácidos graxos voláteis. As bactérias metanogênicas, que têm taxas de crescimento mais baixas que as primeiras, se instalam progressivamente e induzem a elevação do pH através da reação do ácido acético. No caso de tratamento anaeróbio em biodigestores de processos contínuos, o pH permanece neutro, aproximadamente 7 (JUNIOR, 2000).

3.3 A BIOMASSA

Como biomassa designa-se, em geral, a massa total de matéria orgânica que se acumula num espaço vital. Desta maneira, pertencem à biomassa todas as plantas e todos os animais incluindo os seus resíduos, bem como, num sentido mais amplo, as matérias orgânicas convertidas em resíduos de indústria transformadora da madeira e indústria alimentar. Estes

elementos primários de biomassa podem ser modificados pelas diferentes tecnologias de conversão em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos e, finalmente, em energia térmica, mecânica e elétrica (STAISS e PEREIRA, 2001).

A biomassa foi a principal fonte energética até o início do século 20, quando teve início a chamada “era do petróleo” e os derivados energéticos ficaram em segundo plano (ROSILLO-CALLE, 2000). Desta forma, o aproveitamento eficiente da energia térmica com base no petróleo e carvão mineral foi intensamente estudado, enquanto o uso industrial da biomassa foi abandonado neste período (ELETROBRÁS, 1994).

O potencial de biomassa em 1990 era de 225 Exajoules (EJ), no entanto, o seu uso real foi de 46 EJ. Estima-se que o potencial de biomassa irá crescer para 370 a 450 EJ até o ano de 2050 (8,8 e 10,8 Giga toneladas equivalentes de petróleo) (FISCHER e SCHRATTENHOLZER, 2001).

Num sentido energético, é importante a distinção entre a biomassa que é cultivada com a finalidade de produção de energia (plantas energéticas) e a biomassa que abrange todos os resíduos orgânicos provenientes de outras atividades. As propriedades físico-químicas mais importantes da biomassa sólida são a percentagem de umidade e a densidade energética. A baixa densidade energética de biomassa sólida, em comparação com o petróleo e o carvão mineral, origina custos elevados de transporte e armazenamento. O desenvolvimento contínuo de técnicas para aumentar a concentração de energia (por exemplo, a briquetagem) ampliará o espectro de utilização da biomassa na transformação energética. O grau de percentagem da umidade influencia significativamente a qualidade de combustão e o poder calorífico da biomassa (STAISS e PEREIRA, 2001).

Os resíduos animais constituem uma alta proporção de biomassa e seu uso coerente é importante para os aspectos econômicos e ambientais. A digestão anaeróbia tem sido uma das formas de tratamento desses resíduos mais utilizadas mundialmente e representa uma fonte alternativa de energia via produção de biogás (MASRI, 2001).

3.4 O BIODIGESTOR

Segundo Prado *et al.* (2012), o biodigestor, também conhecido como digestor, se trata de uma câmara de fermentação construída abaixo do nível do solo para que não haja variações bruscas de temperatura que interfiram na geração de biogás.

Biodigestores são estruturas projetadas e construídas de modo a produzir a degradação da biomassa residual sem que haja qualquer tipo de contato com o ar. Isso proporciona

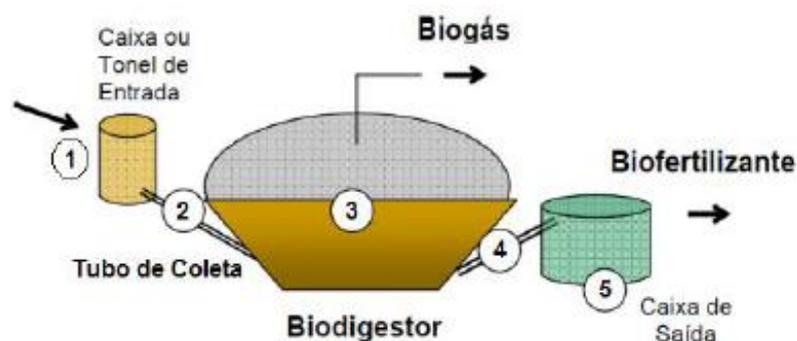
condições para que alguns tipos de bactérias passem a predominar no meio e, com isso, provoquem uma degradação mais acelerada da matéria. Os biodigestores recebem alguns efluentes líquidos, criando um ambiente sem oxigênio e propiciando a liberação de gases. Devido à ação de microrganismos, a decomposição da matéria orgânica gera um gás chamado Biogás, que fica armazenado na área livre da cúpula do biodigestor; nesse caso, transformado em gasômetro ou com função de acumulação do gás no gasômetro. Após essa transformação, o biogás é canalizado e pode ser utilizado em processos de aquecimento ou resfriamento e na geração de energia elétrica que utilizem esse combustível (SANTOS, 2013).

Os modelos mais utilizados mundialmente foram desenvolvidos e aperfeiçoados na China e Índia. Oliveira (2009) destaca que na China comunista, com mais de um bilhão de habitantes, existe o desafio permanente de produzir alimentos em larga escala para suprir a demanda alimentícia, e na Índia, um país onde existe muita pobreza e fome, a carência não é só por alimentos, mas também por energia.

Prado *et al.* (2012) ressaltam a importância de o biodigestor ser completamente vedado, com exceção dos tubos de entrada e saída, criando um ambiente sem a presença de oxigênio (anaeróbico) onde os microrganismos degradam o material orgânico, transformando-o em biogás e biofertilizante.

No tanque de entrada, ou lagoa de sedimentação, o material orgânico é exposto a uma pré-fermentação aeróbica, ou seja, a digestão do resíduo ainda na presença do ar, no qual se proliferam somente as bactérias facultativas, conforme mostrado previamente. Pelo tubo de coleta, o resíduo é introduzido no digestor em que será submetido a uma digestão anaeróbica para a produção de biogás (PRATI, 2010). A Figura 7 apresenta um esquema do processo de biodigestão.

Figura 7 - Esquema do sistema de biodigestão.



Fonte: Prado *et al.*, 2012.

4 METODOLOGIA

Essa pesquisa se caracteriza como bibliográfica exploratória, por meio da análise de documentos científicos publicados na literatura na última década, por meio das plataformas Google Acadêmico e Scielo. A Figura 8 apresenta um fluxograma com as etapas realizadas da pesquisa bibliográfica.

Inicialmente foi realizado um levantamento de informações sobre o panorama nacional do biogás; e a partir de tais dados, foi possível escolher o setor de melhor interesse para aprofundar os estudos. Os dados obtidos mostraram que o biogás de saneamento corresponde ao maior volume de produção, por isso, a escolha deste setor para análise. Em seguida detalhou-se as principais composições do biogás, suas aplicações e implicações neste setor, assim como os processos em que este é aplicado. Por fim, foi montado um panorama do Brasil.

Figura 8 – Fluxograma com as etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

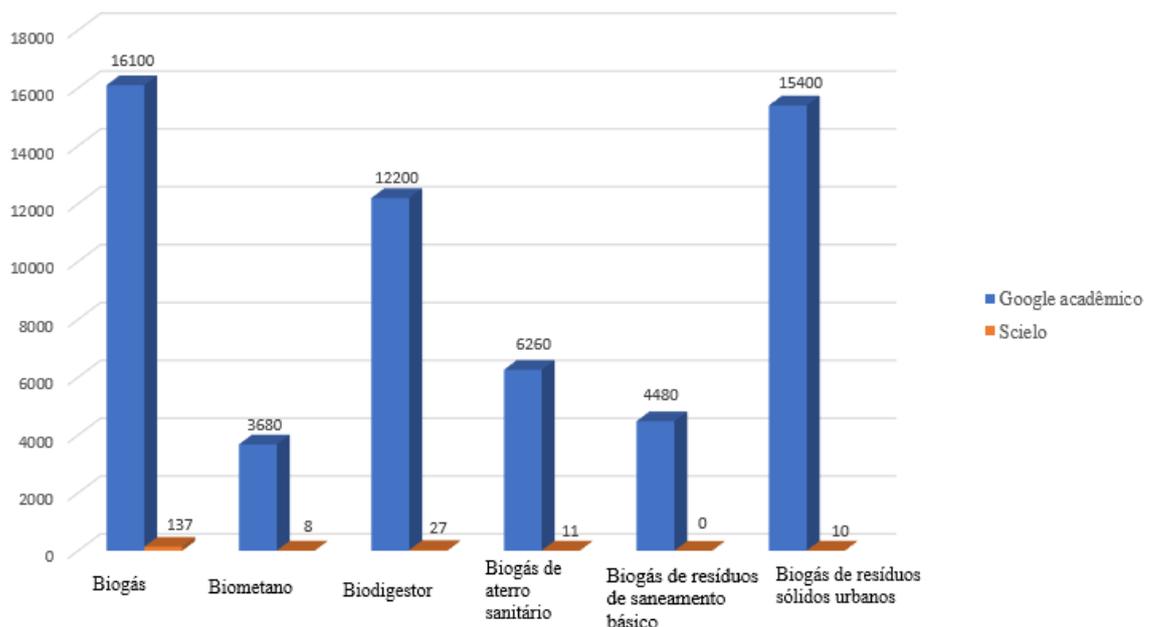
Foram selecionadas as seguintes palavras-chave para nortear as buscas: biogás, biometano e biodigestor; combinadas com as seguintes palavras: resíduos sólidos urbanos, resíduos de saneamento básico, aterro sanitário. A Tabela 3 e a Figura 9 apresentam a quantidade de itens identificados em cada plataforma por meio das palavras-chave definidas.

Tabela 3 - Bibliografia encontrada para cada palavra-chave.

Palavras-chave	Plataforma de busca	
	Google Acadêmico	SciELO
Biogás	16.100	137
Biometano	3.680	8
Biodigestor	12.200	27
Biogás de aterro sanitário	6.260	11
Biogás de resíduos de saneamento básico	4.480	0
Biogás de resíduos sólidos urbanos	15.400	10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 9 - Bibliografia encontrada para cada palavra-chave.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se que nos últimos nove anos foram publicados mais de 58 mil trabalhos que contemplam as palavras-chave definidas. Desse total foram analisados 60 estudos e, por fim, 16 estudos foram selecionados para esta pesquisa, conforme apresentado na Tabela 4. Os estudos foram selecionados levando em consideração os objetivos e a metodologia proposta, que então se assemelhassem aos definidos nessa pesquisa, ou seja, estudos que analisavam a produção de biogás por meio de resíduos de saneamento básico (RSB) e resíduos sólidos urbanos (RSU), a partir do ano de 2013.

Selecionaram-se publicações mais recentes de periódicos relevantes no assunto para fundamentar o estudo, focando na geração do biogás do saneamento que, basicamente, utilizam o biogás proveniente do esgoto e RSU.

Tabela 4 - Portifólio de estudo.

Jornal	Autor	Título
Semana Acadêmica – Revista Científica	Montagna (2013)	Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia – uma revisão bibliográfica
Global Methane	Ruiz (2013)	Novo Gramacho Landfill Gas Biomethane Purification Project in Brazil
Acervo Digital da UFPR	Cancelli (2013)	Geração de energia a partir do biogás de estações de tratamento de esgoto doméstico
Acervo Digital Univate	Heberle (2013)	Biogás gerado a partir de lodo de estação de tratamento de efluente suplementado com óleo vegetal residual
Silo Tips	Lemos (2013)	Uso eficiente de biogás de esgoto em motores geradores
Repositório Unesc	Brida (2014)	Identificação do potencial de geração de biogás e pontencial energético para o aterro sanitário do Cirsure – Estudo de Caso
Periódicos UFCA	Cardoso <i>et al.</i> (2016)	Produção de metano a partir do tratamento de esgoto sanitário visando energia alternativa
Repositório IFES	Batista (2016)	Aproveitamento energético do biogás gerado a partir de resíduos de saneamento
Repositório UFSC	Cabral (2016)	Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário
Teses USP	Silva (2015)	Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos
Scielo	Piñas <i>et al</i> (2016)	Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)
Repositório UFPEL	Martins (2018)	Potencial energético e produção de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos e resíduos vitivinícola na cidade de Bento Gonçalves e região
Repositório IFG	Borba (2019)	Viabilidade do aproveitamento energético do biogás em estação de tratamento de esgoto
Revistas Braz Cubas	Soares e Lopes (2019)	Biometano, oriundo de RSU: análise do processo Produtivo
Scielo	Nascimento <i>et al</i> (2019)	Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil
Repositório Digital da Biblioteca da Unisinos	Flores (2019)	Produção de biogás de resíduo de lodo ativado proveniente do tratamento de esgoto sanitário

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir da leitura e análise dos trabalhos selecionados, foram obtidos os resultados apresentados a seguir, na seção 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESÍDUOS DE SANEAMENTO BÁSICO E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Conforme apresentado na Figura 4, em 2021, o setor de saneamento foi responsável pelo maior volume de biogás produzido, sendo por este motivo, escolhido para análise do panorama. Saneamento consiste no controle de todos os aspectos do meio físico do homem, que podem exercer efeitos nocivos sobre o estado físico, social e/ou mental do ser humano. São ações socioeconômicas que objetivam garantir a salubridade ambiental (RIBEIRO e ROOKE, 2010). Conforme a Lei 11.445 (BRASIL, 2007), o saneamento se constitui pelos serviços de abastecimento de água, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, esgotamento sanitário, drenagem e manejo de águas pluviais.

Os resíduos gerados das ofertas dos serviços de saneamento se classificam, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, em: resíduos domiciliares; resíduos de limpeza urbana; resíduos sólidos urbanos; resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; resíduos dos serviços públicos de saneamento básico; resíduos sólidos industriais (RSI); resíduos de serviços de saúde; resíduos da construção civil; resíduos agrossilvopastoris; resíduos de serviços de transportes; resíduos de mineração (BRASIL, 2010). Esse estudo visa destacar os Resíduos dos Serviços de Saneamento Básico (RSB), com foco nos esgotos e Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) com foco nos resíduos destinados em aterros.

De acordo com o Sistema Nacional de Informação sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR (2022a), os Resíduos dos Serviços de Saneamento Básico (RSB) são originários dos serviços de abastecimento de água potável, da drenagem e manejo das águas pluviais e do esgotamento sanitário, sendo esse último chamado de águas residuárias ou simplesmente esgotos. Esses resíduos apresentam um grande potencial poluidor e contaminador aos recursos naturais quando não são gerenciados de modo adequado. O Brasil produz aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSB.

Em média, 80% da água captada nos mananciais, tratada e disponibilizada à população pelas redes públicas para consumo, se transformam em esgoto posterior ao uso doméstico. Os chamados efluentes domésticos são formados por 99,9% de água e 0,1% de sólidos (SINIR, 2021). De acordo com Sadeck (2022) 100 milhões de brasileiros não têm acesso à coleta de esgoto. Ademais, apenas 50% do volume de esgoto do país recebe tratamento, o que equivale a mais de 5,3 mil piscinas olímpicas de esgoto *in natura* sendo despejadas diariamente na natureza. Conforme o SINIR (2021) as redes de esgotos abrangem 55% da população total

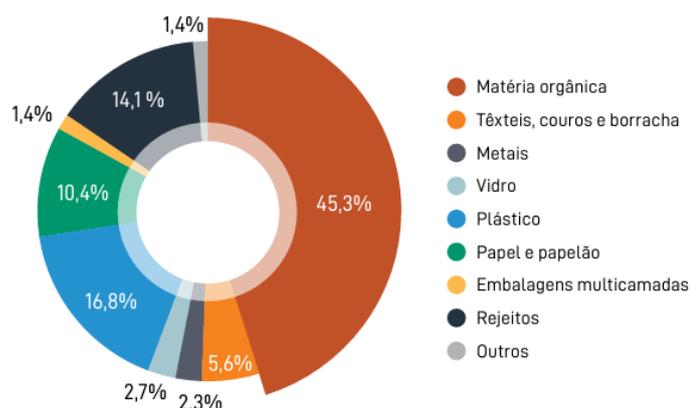
(114,6 milhões de habitantes) e 63,2% da população urbana (112,4 milhões habitantes). Ainda, dos 6 bilhões de m³/ano de esgoto coletado, apenas 4,8 bilhões de m³/ano foram tratados.

Esses rejeitos sólidos são, em sua maioria, constituídos por matéria orgânica em decomposição, originada de fezes e de atividades humanas em pias, tanques, máquinas de lavar, chuveiros entre outros. Quando despejado nos rios sem tratamento, ele altera a composição natural daquele ecossistema, trazendo danos para a fauna e a flora aquática e os seres humanos que vivem no entorno (BRK, 2020).

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), por sua vez, consistem naqueles resultados de atividades domésticas e limpeza urbana de vias e espaços públicos, além dos demais serviços de limpeza urbana (SINIR, 2022b). Segundo a NBR 10.004 (2004), a composição dos RSU é variável e depende das características da população que o produziu, a variar conforme os hábitos, condições de vida e situação socioeconômica. Basicamente, são formados por matéria orgânica, plásticos, papéis, vidros, metais, óleos, tecidos, dentre outros.

Conforme o SINIR (2022a), considerando os aspectos econômicos, técnicos, sociais, ambientais e políticos, inexistente uma solução universal para o tratamento e disposição final desses resíduos, assim as opções devem ser estudadas e analisadas de modo individual. Conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Abrelpe (2021), no ano de 2020 foram produzidas 82.477.30 toneladas de RSU no Brasil, uma média de 390 kg/hab/ano. A Abrelpe (2021) apresenta na Figura 10 o percentual de composição dos RSU no Brasil.

Figura 10 - Gravimetria dos RSU no Brasil.



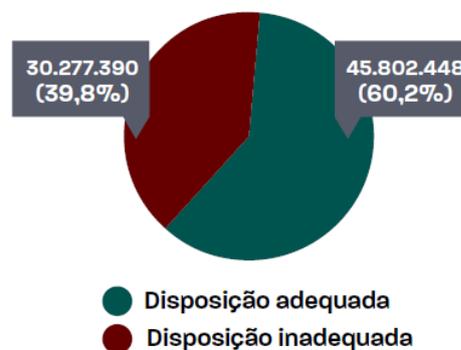
Fonte: Abrelpe, 2020.

Conforme a Figura 10, o principal componente dos RSU é a matéria orgânica, formada por alimentos, resíduos verdes e madeiras, com 45,3%. Os resíduos recicláveis secos parcelam 33,6%, formados por plásticos, papéis e papelões, metais, vidros e embalagens multicamadas.

Demais resíduos parcelam 21,1%, onde resíduos têxteis, couros e borrachas representam 5,6%; e rejeitos, especialmente sanitários consistem em 15,5% (ABRELPE, 2021).

De acordo com a Abrelpe (2021), no Brasil, a maior parte dos RSU coletados seguiu para disposição em aterros sanitários, com 46 milhões de toneladas enviadas para esses locais em 2020. Os dados indicam que mais de 60% dos resíduos coletados no país tiveram destinação adequada. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda estão em operação e receberam quase 40% do total de resíduos coletados (Figura 11).

Figura 11 - Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil.



Fonte: Abrelpe, 2021.

A disposição final é uma das alternativas ambientalmente adequadas previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos. De acordo com a PNRS, a destinação de resíduos consiste na reutilização, compostagem, reciclagem, recuperação, aproveitamento energético e outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, desde que respeitadas normas operacionais específicas que evitem danos ou riscos à saúde e à segurança pública, minimizando os impactos ambientais adversos (ABRELPE, 2021).

Conforme Alves, Colares e Utrubey (2008), a geração crescente de RSU e RSI tem contribuído para que os lixos e esgotos se tornem um problema mundial. As problemáticas decorrentes dos resíduos, conforme Figueiredo (1995), provêm não somente de sua geração, mas de sua evolução qualitativa, ou seja, as características dos resíduos produzidos.

5.2 FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO

No contexto de uma estação de tratamento de esgoto sanitário (ETE), o uso energético do biogás está em consonância com os conceitos de produção mais limpa, com eficiência ambiental e energética, assim como está alinhado com as iniciativas necessárias para a promoção de uma economia de baixo carbono. Por isso, a recuperação de energia a partir do

biogás é bastante comum em países como Alemanha, Itália e Estados Unidos. Nesses países, com condições climáticas menos favoráveis, o biogás de ETE é proveniente, principalmente, dos digestores de lodo e, portanto, a maioria das referências existentes aborda essa tecnologia (PROBIOGÁS, 2017a).

Os processos de tratamento de esgotos são divididos em dois grandes grupos, os biológicos e os físico-químicos (GUIMARÃES e NOUR, 2001). No entanto, a geração de gases capaz de produzir energia ocorre por meio dos tratamentos biológicos de esgoto, ou seja, aqueles que utilizam microrganismos ou algas para degradação da matéria orgânica.

Alguns métodos de tratamento de esgoto, mesmo os biológicos, demandam energia, como é o caso de lodos ativados. Isso porque no tratamento aeróbio é necessário introduzir oxigênio ao esgoto para a manutenção da atividade bacteriana (INCT, 2020).

Conforme Cassini (2003), a digestão anaeróbica é o processo mais usado para estabilizar a matéria orgânica proveniente de tratamentos de esgotos, resultando assim no biogás, que contém em sua composição metano, e permitindo a geração de energia. Além disso, há a produção de um subproduto, o biofertilizante que pode ser aplicado em solos agrícolas, a fim de repor nutrientes.

Por outro lado, a digestão anaeróbia é o processo de degradação biológica da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio que, dentre outros subprodutos, gera o biogás. A digestão anaeróbia ocorre em etapas sequenciais, sendo cada uma delas caracterizadas pela atividade de grupos específicos de microrganismos. Somente na última etapa, chamada metanogênese, é formado o biogás. Em uma ETE, os substratos para a produção do biogás são o esgoto e o lodo (PROBIOGÁS, 2017a).

O Brasil, como país tropical, pode se aproveitar do clima para que as tecnologias anaeróbias (ausência de oxigênio) sejam menos onerosas, já que em climas quentes não é necessário gasto energético para manter uma faixa de temperatura adequada à manutenção das bactérias anaeróbias. Essa tecnologia, por sua vez, é capaz de gerar energia através do biogás (INCT, 2020).

Por ser um processo de produção biológico, metabolizado via bactérias, além de reações complexas em cadeia, as peculiaridades que influenciam a produção do biogás são muitas. Porém, algumas características precisam ser analisadas a fim de minimizar os impactos sobre as colônias de bactérias anaeróbias (GERARDI, 2003).

Vale ressaltar, que embora haja possibilidade de aproveitamento energético para tecnologias anaeróbias deve ser feito uma avaliação criteriosa para mensurar se o volume de gás produzido é suficiente para compensar a realização desse processo (INCT, 2020). Para

isso, foi realizado o levantamento das composições de biogás obtidas nos trabalhos disponíveis na literatura conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Composição do biogás proveniente do tratamento do esgoto sanitário.

Componentes	biogás tratamento de esgoto sanitário
CH ₄	60 - 85 %
CO ₂	5 - 24,1 %
N ₂	6,7 - 25 %
H ₂	0 - 3 %
H ₂ S	1000 a 2000 ppmv
CO	0 - 0,3 %
O ₂	0,4 - 1,6 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Assim, pode-se destacar que a composição do biogás proveniente de resíduos do tratamento de esgoto sanitário possui uma composição mais diversificada do que o biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos. Vale mencionar que a presença de H₂S faz com que esse biogás tenha característica corrosiva, por isso, sua produção é direcionada, principalmente, para a produção de energia elétrica.

Além disso, Chernicharo e Stuetz (2008) destacam que em algumas situações o biogás pode conter siloxanos em sua composição, resultantes da degradação anaeróbia de produtos como desodorantes, cosméticos, sabões e aditivos de alimentos. Durante o processo de combustão de biogás compostos por siloxanos, decorre a formação de depósitos de SiO₂ ou silicatos (Si)_x e, ainda, cálcio, enxofre, zinco e fósforo. Esses elementos podem depositar-se na forma de micros cristais sobre as peças de câmara de combustão em motores a combustão e até em turbinas a gás. Assim, os siloxanos são responsáveis por incrustações, abrasão, corrosão e diversos outros prejuízos que afetam a vida útil de equipamentos o que potencializa seu aproveitamento para o setor de energia elétrica.

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2011), por meio da ETE localizada no município de Barueri trata o esgoto por meio do processo de lodos ativado convencional. No processo ocorre a liberação de gás com predominância de metano.

Flores (2019) analisou o potencial do biogás proveniente do tratamento de esgoto de uma instituição universitária e identificou que o biogás produzido apresentou teor de metano superior a 70%.

Conforme Cardoso *et al.* (2016) analisaram, o tratamento de esgotos propiciou a geração de 19,30 m³/dia de metano em uma unidade reatora e 115,11 m³/dia em outra unidade reatora. Observando assim um potencial significativo para aplicação desse resíduo.

Batista (2016), por sua vez, identificou que uma unidade de tratamento de esgotos possui capacidade de vazão de 40,1 m³ de biogás por dia, onde 75% da composição deste gás, era formado por metano. Além de um potencial energético de 89,79 kWh/dia, no entanto esse valor é insuficiente para atender a demanda energética da própria estação.

Heberle (2013) relata as vantagens e desvantagens em relação a produção e digestão anaeróbica do lodo para a produção de biogás conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens da produção do tratamento de esgoto sanitário.

Vantagens	Desvantagens
Produção nas proximidades do local de consumo, assim não demandam gastos com transportes ou linhas de transmissão;	Demanda por purificação para geração de energia elétrica;
Minimização dos patógenos destinados inadequadamente no solo; produção natural de fertilizante rico em minerais;	O custo de implementação elevado
Menor consumo de combustíveis fósseis, evitando lançamento de gases estufa;	Forte odor devido ao sulfeto de hidrogênio.
Minimização significativa da emissão de metano na atmosfera;	
Fonte de energia com insumos renováveis	

Fonte: Adaptado de Heberle (2013).

5.3 FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Quando os RSU são depositados, seu potencial de contaminação se torna evidente, pois após sua disposição no aterro, tem início o processo de biodegradação, que consiste em reações químicas, físicas e biológicas, resultando na produção de chorume e biogás. O chorume líquido de coloração escura e desagradável odor, apresenta altas cargas orgânicas e inorgânicas e várias espécies de microrganismos.

A concepção de aterros sanitários que visam, além do armazenamento correto do lixo, o aproveitamento do biogás gerado ao longo do tempo, possibilita maior eficiência na produção e captação do metano gerado na degradação da matéria orgânica presente nos resíduos (PECORA *et al*, 2008).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2018) um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume. A decomposição da matéria orgânica ocorre por dois processos, o primeiro processo é de decomposição aeróbia e ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Após este período, a redução da quantidade do O₂ presente nos resíduos dá origem ao processo de decomposição anaeróbia.

O gás de aterro é composto por vários gases, alguns presentes em grandes quantidades

como o metano e o dióxido de carbono e outros em pequenas quantidades. Os fatores que podem influenciar na produção de biogás são: composição dos resíduos dispostos, umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, tempo de deposição dos resíduos, projeto do aterro e sua operação. O objetivo do projeto de aproveitamento energético do biogás produzido pela degradação dos resíduos é convertê-lo em uma forma de energia útil tal como: eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade (ALMEIDA, 2016). O biogás captado do aterro pode ser queimado em flare, onde ocorre a transformação do metano em dióxido de carbono, ou então ser convertido em energia elétrica e/ou térmica (PECORA *et al.*, 2008).

Independente do uso final do biogás produzido no aterro, deve-se projetar um sistema padrão de coleta tratamento e queima do biogás: poços de coleta, sistema de condução, tratamento (inclusive para desumidificar o gás), compressor e flare com queima controlada para a garantia de maior eficiência de queima do metano (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018).

Ensinas, Bizzo e Sanchez (2004) explicam que cada instalação para aproveitamento do biogás em aterros sanitários possui suas peculiaridades, a depender da localização, da disponibilidade financeira, das demandas energéticas locais, além da legislação vigente, levando em consideração o estudo prévio das alternativas de aproveitamento ainda na fase inicial de definição do projeto. Conforme os autores, existem dois sistemas distintos de coleta: o sistema passivo e o sistema ativo. O sistema passivo visa drenar os gases para a atmosfera prevenindo que sejam emitidos inadequadamente na superfície e impedindo que os gases migrem para as áreas vizinhas. O sistema ativo, por sua vez, é composto por exaustores e compressores, e é empregado em projetos de aproveitamento energético do biogás.

Por fim, foi realizado o levantamento das composições de biogás obtidas nos trabalhos disponíveis na literatura conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Composição do biogás proveniente do tratamento dos resíduos sólidos urbanos.

Componentes	biogás tratamento de esgoto sanitário
CH ₄	30 – 92,5 %
CO ₂	0,3 - 45 %
N ₂	5 – 6,7 %
H ₂	pequenas quantidades
H ₂ S	pequenas quantidades

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Assim, pode-se destacar que a composição do biogás proveniente de resíduos do sólidos urbanos não possui CO e O₂ diferentemente do biogás proveniente do tratamento de esgoto sanitário. Além disso, este possui baixas concentrações de H₂ e H₂S. Vale mencionar que a

variação na percentagem de metano é muito mais alta para o biogás de aterro. Por possuir pequenas quantidades de H₂S, este biogás é bastante utilizado para geração de energia térmica e elétrica em equipamentos. Vale ressaltar que as composições do biogás de aterro irão ser diversidades. Ruiz (2013) identificou que o biogás de aterro de RSU possuía 52% CH₄, 42% CO₂ e 5% N₂ em uma primeira análise; e 92,5% CH₄, 6,7% N₂ e 0,3 % CO₂, em uma segunda análise. Segundo o autor, as diferenças nas composições de cada análise são devido ao material ser oriundo de lugares diferentes.

5.4 TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

O biogás resultante do processo de tratamento de esgoto pode ser utilizado para cozinhar alimentos, iluminação, refrigeração de alimentos e aquecimento de água; para geração de calor em caldeiras, fornos e estufas; para geração de eletricidade para uso na própria ETE ou nas áreas vizinhas; na cogeração de eletricidade e calor; e como combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível de carros (INCT, 2020).

Há inclusive alguns debates com relação a utilização do biogás nos transportes públicos o que seria uma maneira ecologicamente viável de reaproveitar esse subproduto do tratamento de esgoto. Para cada uso, no entanto, é necessário um nível diferente de tratamento do biogás, tais como a remoção do gás sulfídrico ou a remoção do gás carbônico para atingir um maior grau de pureza de metano (INCT, 2020).

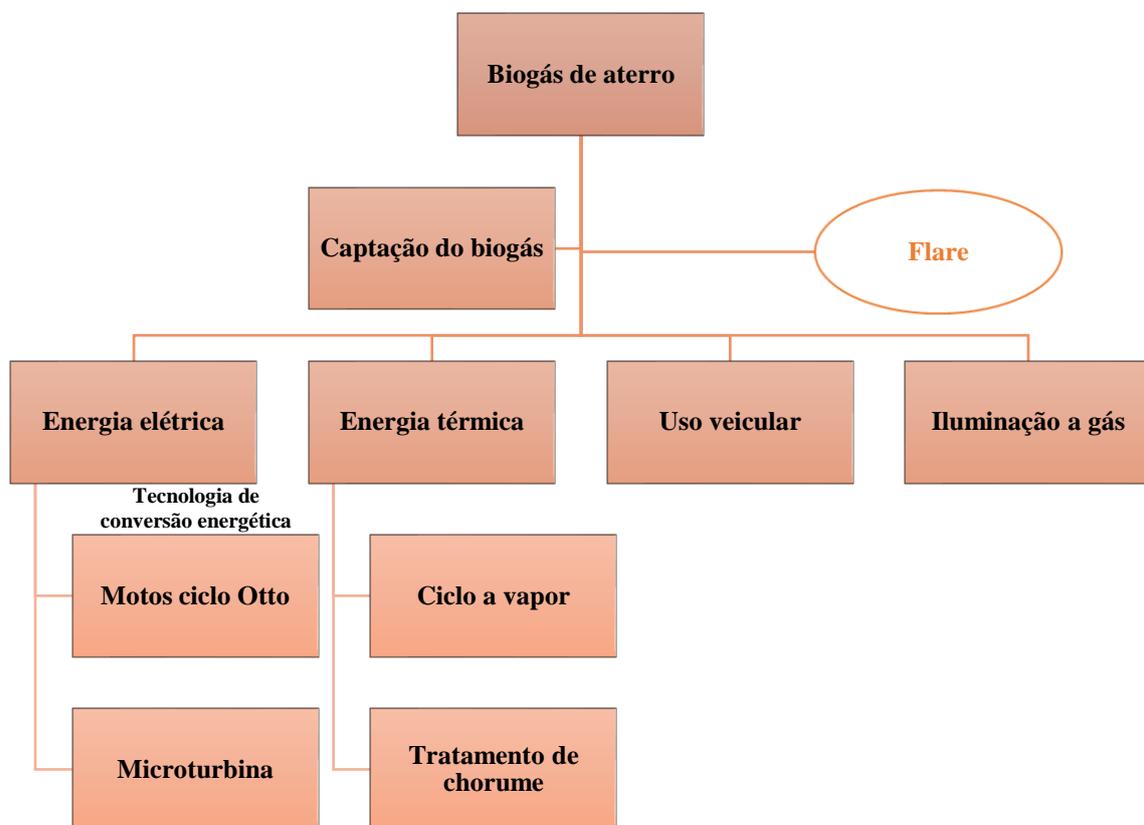
Na ETE localizada no município de Barueri, a Sabesp implementou duas Pequenas Centrais Termoelétricas, a fim de serem supridas por meio do biogás produzido. Em média, 30% da energia é transformada em energia elétrica e 60% são aplicadas em sistemas de reaproveitamento, como os aquecedores dos digestores. Os 30% direcionam-se à eficiência das tecnologias de conversão de energia do biogás em energia elétrica, por meio de turbinas e motores (SABESP, 2011).

Batista (2016) analisou o potencial energético do biogás produzido em uma ETE em um condomínio residencial. O autor constatou que o biogás produzido não possuía potencial para atender a demanda energética da própria estação, frente à baixa vazão de biogás produzido. No entanto, prevendo cenários para aplicação, com o volume produzido, era possível atender a demanda de banhos quentes diários do condomínio, com capacidade de aquecimento da água a temperaturas de até 46,5°C e proporcionar uma economia média de R\$4.645,20 em um período de dois meses, visto o não uso de chuveiros elétricos.

Borba (2019) constatou que o biogás resultado do tratamento de esgoto de uma ETE apresenta potencial para fonte de energia renovável dentro da própria ETE, sendo essa capaz de suprir metade da demanda de energia da estação, tornando-se eficiente no quesito financeiro e ambiental.

A fim de viabilizar o emprego do biogás de aterros sanitários, Montagna (2013) apresenta algumas alternativas, conforme ilustrado na Figura 12. Assim, o biogás proveniente de aterro pode ser empregado para geração de energia elétrica; geração de energia térmica; uso como combustível veicular; ou em iluminação a gás.

Figura 12 - Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás de aterro.



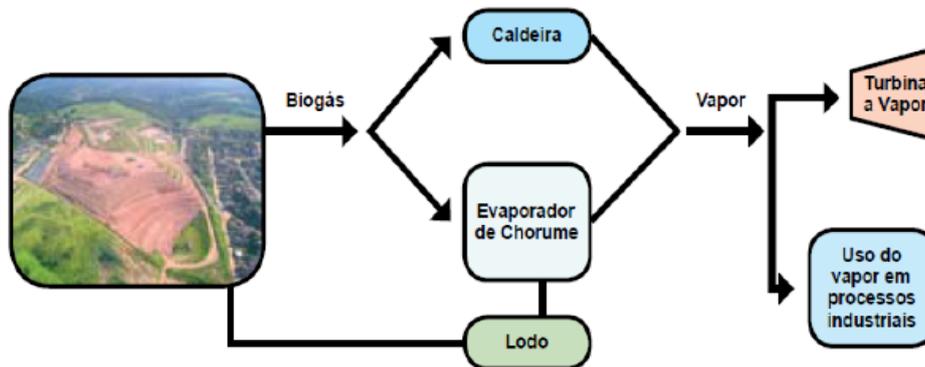
Fonte: Adaptado de Montagna (2013).

Na geração de energia elétrica, Montagna (2013) explica que pode ser aplicado em motores ciclo Otto, sendo esse o equipamento mais empregado para a queima de biogás, uma vez que possui um rendimento elétrico maior e um custo menor quando comparado a outras tecnologias. Porém, há necessidade por modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão para que ocorra a queima nos motores desse tipo. A geração pode ainda ocorrer por meio de turbina a gás, processo no qual as turbinas se movem a partir da energia gerada pelo gás. Nas microturbinas o ar é aspirado e forçado para seu interior com alta velocidade e pressão, misturando-se ao combustível para então sofrer queima na câmara de

combustão. Os gases em altas temperaturas, provenientes da combustão, expandem-se na turbina onde o calor dos gases da exaustão é usado para o aquecimento do ar de combustão.

Quanto à geração térmica, o Manual de Aproveitamento do Biogás (ICLEI, 2009), ilustra as tecnologias existentes na Figura 13.

Figura 13 - Alternativas para uso de energia térmica do biogás.



Fonte: ICLEI, 2009.

De acordo com Montagna (2013) o ciclo a vapor Rankine é o processo pelo qual o biogás é queimado como meio de combustível em caldeiras para geração de vapor, por meio da movimentação de turbinas, sendo assim capaz de gerar energia. A fim de produzir vapor, emprega-se o calor de combustão do biogás, podendo ser utilizado em processos industriais, geração de energia elétrica por meio de turbina a vapor acoplada a um gerador ou ainda para aquecimento direto.

Em caldeiras a gás a conversão de energia do biogás em calor é realizada por meio da produção de fluido quente ou vapor. Nas caldeiras, são geralmente utilizados queimadores de combustível duplos. A eficiência da caldeira de gás é superior a 90% (PROBIOGÁS, 2017b).

O chorume decorrente da decomposição de RSU, consiste em um produto poluidor de alto nível. Desse modo, demanda-se a utilização de um evaporador, a fim de promover o tratamento dessa substância e garantir uma minimização de 70% do volume lixiviado. Assim, o chorume é submetido a altas temperaturas de aquecimento sendo o biogás empregado como combustível. Ocorre a evaporação do meio líquido e o vapor quente enquanto passa pela etapa de purificação podendo ser aplicado na geração de energia térmica (MONTAGNA, 2013).

Montagna (2013) propõe ainda o uso do biogás como combustível veicular, porém explica que para esse fim é preciso que o biogás seja submetido a um procedimento de remoção de alguns componentes como H_2S , H_2O , CO_2 e partículas. É essencial que o CO_2 seja removido para que o teor de metano fique próximo ao gás natural.

Quanto ao uso como iluminação a gás, o processo ocorre por meio da queima direta do biogás. Destaca-se que nesses casos os postes de iluminação não podem ser instalados próximos a dutos de biogás em aterros sanitários, já que o biogás é altamente explosivo (MONTAGNA, 2013).

Martins (2018) analisou o potencial de geração de biogás oriundo de RSU no município de Bento Gonçalves – RS, identificou um potencial de $2,8 \text{ GgCH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$. Com esse potencial de metano seria possível abastecer 16 ônibus da frota urbana diariamente. Em um segundo cenário, o autor analisou o potencial de geração de biogás oriundo de RSU dos municípios de Bento Gonçalves, Carlos Barbosa, Garibaldi e Farroupilha, e constatou um potencial de geração de biogás, para o ano, seria de $5,9 \text{ GgCH}_4$. Com essa produção seria possível abastecer 35 ônibus da frota intermunicipal diariamente.

Brida (2014) analisou o potencial energético de biogás de um aterro de RSU e constatou uma capacidade para produção de $1,86 \times 10^7 \text{ kWh/mês}$ de energia térmica, assim seria possível atender a demanda de energia de até 345 residências.

5.5 PROCESSOS ATUAIS QUE UTILIZAM DO BIOGÁS PROVENIENTE DO SANEAMENTO

Aproveitar o potencial energético do biogás decorrente de tratamento de esgotos e de RSU é uma realidade no Brasil, com interesse contínuo e crescente e com o surgimento de novos projetos a cada ano. (PROBIOGÁS, 2017a).

Reis (2021) destaca que o biogás favorece diversos setores industriais, como agroindústrias, transportes, tabaco, cervejarias, montadoras, dentre outras. A transformação de resíduos em fonte energética aumenta o faturamento das empresas e reduz seus custos, além de contribuir de maneira positiva com a problemática ambiental. O autor complementa que, com o biogás, a indústria pode produzir seu próprio combustível com resíduos orgânicos decorrentes de sua atividade, transformando um passivo ambiental num ativo energético.

O biogás quando empregado a partir de um investimento estratégico, contribui para a reversão desses cenários para processos otimistas e positivos como: aumento na competitividade, possibilitando a ampliação das fontes; atualização da matriz energética nacional; atrai investidores para evolução do setor. Além da ampliação dos horizontes sobre a minimização dos prejuízos no contexto da gestão de resíduos, demasiada poluição do ar por meio dos combustíveis fósseis, alta demanda por energia e uso da madeira e carvão para gerar valor (REIS, 2021).

No contexto regional, o biogás torna-se protagonista em uma economia circular, uma vez que resíduos antes desperdiçados, retornam como fonte de renda, incentivando a sustentabilidade ambiental, econômica e social de uma localidade. Em maiores escalas, como em indústrias e fábricas, torna-se uma estratégia de desenvolvimento sustentável, inovação e infraestrutura. Como resultado disso, ultrapassam as vantagens de concretização dos propósitos oriundos da implementação do biogás e do biometano em grande escala. Em indústrias o biogás proporcionará uma revolução nas concepções sobre tudo o que era consumido anteriormente, como os combustíveis fósseis (REIS, 2021).

A estação GNR Dois Arcos visa aplicar o biogás proveniente do aterro de Dois Arcos e transforma-o em biogás purificado, ou seja, em combustível renovável similar ao gás natural. Estima-se uma produção de 5 milhões de m³ de biogás purificado por ano (PROBIOGÁS, 2017a).

A usina Cs Bioenergia trata 170 toneladas de resíduos orgânicos diariamente, misturado com 900 m³ de lodo gerado na ETE Belém da Sanepar. Assim produz 23.000 m³ de biogás por dia, depois de tratado o biogás é capaz de gerar 2,8 MW de potência elétrica em dois motores. A energia térmica necessária também é recuperada dos motores. O líquido pós-digerido não transformado em biogás é desaguado e seco, resultando em um biofertilizante orgânico de qualidade que podem ser usados pela agroindústria (PROBIOGÁS, 2017a).

A tecnologia TMethar oferece soluções inovadoras e pioneiras no tratamento de RSU para produção de biogás usado para produção de energia elétrica, térmica e biometano, além de composto para uso pela prefeitura (PROBIOGÁS, 2017a).

A ETE Ouro Verde atende uma média de 35.000 habitantes e trata até 70 L/s de esgoto doméstico, resultando em uma produção de aproximadamente 50 m³/dia de biogás usado para geração e distribuição de energia elétrica (PROBIOGÁS, 2017a).

A Usina da Empresa Laticínios Bela Vista foi pioneira no setor de laticínios no país a implementar um sistema de tratamentos de efluentes com aproveitamento de biogás. São utilizados efluentes e resíduos para geração de biogás, que é aplicado como fonte de calor nos processos da indústria, que apresenta elevada demanda térmica (PROBIOGÁS, 2017a).

A Probiogás (2017a) apresenta por meio do documento Exemplos de Usinas de Aproveitamento de Biogás no Brasil algumas usinas de produção de biogás de saneamento e suas características (Tabela 8).

Tabela 8 - Exemplos de usinas de aproveitamento de biogás no Brasil.

Usina	Cidade	Área de atuação	Aproveitamento de biogás	Capacidade de processamento	Potência instalada
Planta de Tratamento de Biogás do Aterro Sanitário Dois Arcos	Rio de Janeiro	RSU	Comercialização do biometano para o Supermercado Guanabara, que o usa para gerar eletricidade.	Até 1.200 m ³ /h de biogás	15 mil m ³ por dia de biometano, cerca de 5,5 milhões de m ³ por ano
CS Bioenergia S.A.	São José dos Pinhais	Tratamento de resíduo orgânico e lodo sanitário	Geração de Energia Elétrica	170 toneladas de orgânico e 900 m ³ de lodo de ETE	2,80 MW
Estação de Transferência do Caju/ TMethar - Túneis de Metanização	Rio de Janeiro	RSU	Produção de energia elétrica, térmica e biometano, além de composto para uso pela prefeitura	50 toneladas/dia	250kW (potência inicial)
Ete Ouro Verde/ Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar	Foz do Iguaçu	Saneamento Ambiental	Geração distribuída de energia elétrica	50 Nm ³ /dia de biogás	25 kVA
Piracanjuba – Laticínios Bela Vista Empresa responsável pela Implementação do projeto: ADI Sistemas Ambientais	Bela Vista de Goiás	Produção de laticínios	Uso de calor nos processos para fabricação de laticínios	38.000 Nm ³ /dia de biogás– atualmente em 10.000 Nm ³ /dia	8,7 MI kcal/h em geração de vapor (atualmente 2,3 MI kcal/h). Potência teórica aprox. em função do PCI do biogás de 81.00kWh.

Fonte: Probiogás, 2017a.

Pereira, Zavarise e Pinotti (2021) estudaram o aproveitamento energético de resíduos, tanto industriais quanto sanitários, de uma fábrica de chocolates. Assim, constataram que a geração de vapor em caldeiras se mostrou superior frente ao baixo custo relativo de manutenção, além da fácil adaptação dos sistemas de gás natural para biogás e pelas contribuições ambientais oferecidas.

Uma montadora de veículos anunciou que vai substituir parte do gás natural usado em suas fábricas por biometano. Em média, 65% do volume das fábricas será substituído entre os anos de 2023 e 2024. Assim, as unidades industriais deixarão de emitir cerca de 19 mil toneladas de CO₂ de origem fóssil por ano (BIANCHIN, 2022).

como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão presentes em diferentes concentrações. Estas impurezas são responsáveis pela corrosão e pelo desgaste mecânico de diversos equipamentos. A Tabela 9 apresenta os principais processos utilizados para purificação do biogás de acordo com as impurezas que devem ser eliminadas (BORSCHIVER e DA SILVA, 2014).

Tabela 9 - Tecnologias de purificação do biogás.

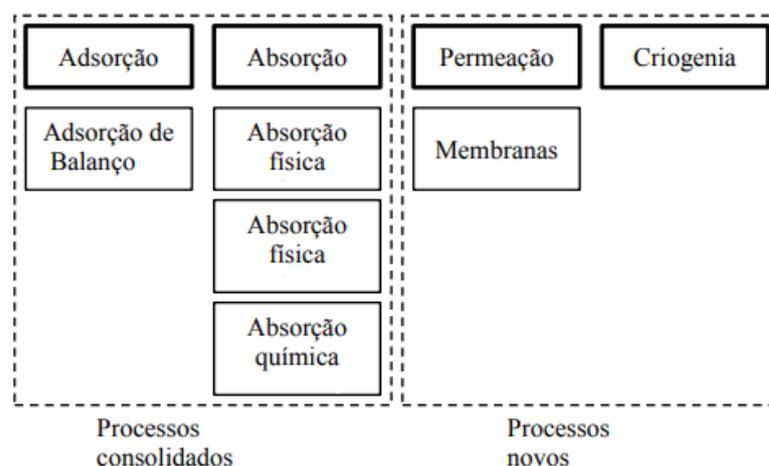
Impurezas	Tecnologia de Purificação
Sulfeto de Hidrogênio	Precipitação/ Absorção Química/ Adsorção em carvão ativado/ Tratamento biológico
Siloxanos	Resfriamento/ Absorção em mistura líquida de hidrocarbonetos/ Adsorção em carvão ativado, alumínio e sílica em gel/ Co-separação com sulfeto de hidrogênio
Água	Resfriamento/ Compressão/ Absorção/ Adsorção
Oxigênio e Nitrogênio	Adsorção em carvão/ Peneira molecular ou membranas
Particulados	Filtro mecânico

Fonte: Adaptado de Borschiver e da Silva, 2014.

Nota-se que para o tratamento do biogás com objetivo de eliminar os componentes traços, como o H_2S , NH_3 , N_2 , O_2 e H_2 são utilizadas técnicas tradicionais para limpeza de gases, como os processos de absorção e adsorção (BORSCHIVER e DA SILVA, 2014).

O ajuste do poder calorífico é baseado na remoção do dióxido de carbono para o aumento da concentração de metano e também da densidade energética. Essa purificação diferente da limpeza do gás ainda possui alguns processos em consolidação, por isso, são os grandes destaques nos estudos de purificação do biogás. A Figura 15 apresenta as tecnologias para ajuste de poder calorífico de biogás de acordo com o grau de difusão destes processos.

Figura 15 - As tecnologias para ajuste de poder calorífico de biogás.



Fonte: Borschiver e da Silva, 2014.

Segundo Borschiver e da Silva (2014), a principal técnica utilizada para ajuste de poder calorífico do biogás é a adsorção de balanço e os processos de absorção em água, solventes orgânicos e aminas. No entanto, segundo o autor, a melhor escolha deve se basear nos parâmetros específicos de cada planta.

Apesar da necessidade, o processo de purificação do biogás é uma grande barreira para o desenvolvimento deste setor no Brasil devido ao seu alto custo. Dorstewitz (2015) afirma que não é possível fornecer informações gerais sobre estes custos, pois as condições específicas de cada país, como salários e preço de energia, bem como, os custos de investimento, influenciam consideravelmente os custos de tratamento. Assim, os custos gerais de cada projeto são obtidos conforme as condições de cada caso.

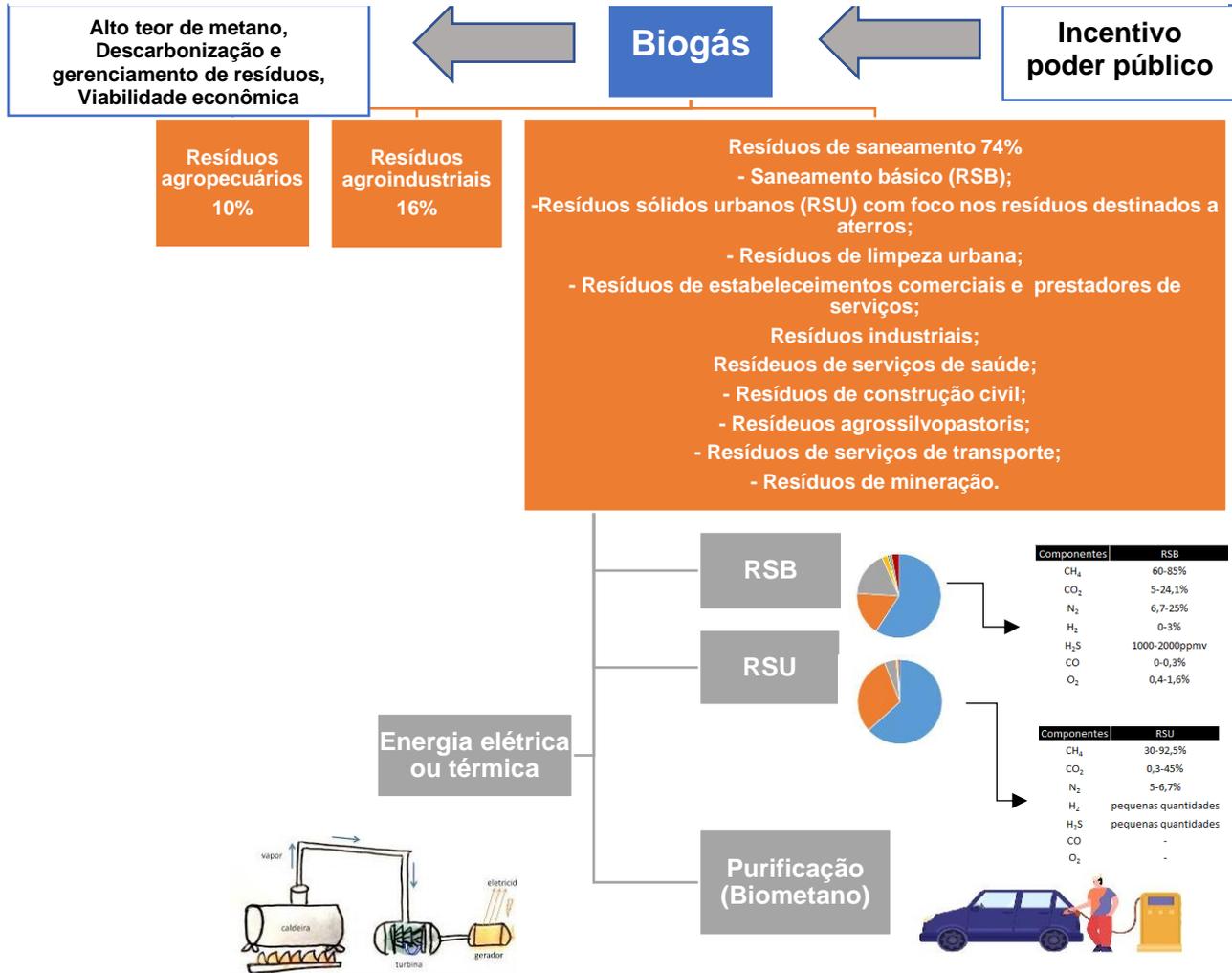
5.7 PANORAMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

Por fim, foi possível apurar o panorama de aproveitamento energético do biogás de tratamento de esgoto sanitário e tratamento de resíduos sólidos urbanos segundo a Figura 16. No Brasil, a maior produção em volume do biogás é proveniente dos resíduos de saneamento, por isso, o trabalho focou em dois elementos: resíduos sólidos urbanos e esgotos sanitários. Com base no conjunto de referências estudadas, foi constatado em média a composição do biogás dos resíduos sólidos urbanos e do esgoto sanitário. Vale ressaltar que ambos são constituídos em sua maior parte pelo metano e podem ser utilizados para diversas possibilidades que vão desde a produção de energia elétrica até a produção de combustível veicular. Sendo, porém, pouco utilizado nas indústrias.

Levando em consideração que a gestão dos resíduos de saneamento é de responsabilidade dos municípios; e pensando nos aspectos técnicos, ambientais e econômicos, os resíduos de saneamento básico, podem vir a contribuir de modo considerável nessas três esferas dentro das municipalidades.

Quanto aos aspectos técnicos, os resíduos de saneamento básico apresentam uma boa capacidade para produção de biogás com alto teor de metano, assim pode ser aplicado para diferentes fontes de produção de energia, conforme já citado no decorrer dessa discussão.

Figura 16 - Panorama de aproveitamento energético do biogás de tratamento de esgoto sanitário e tratamento de resíduos sólidos urbanos.

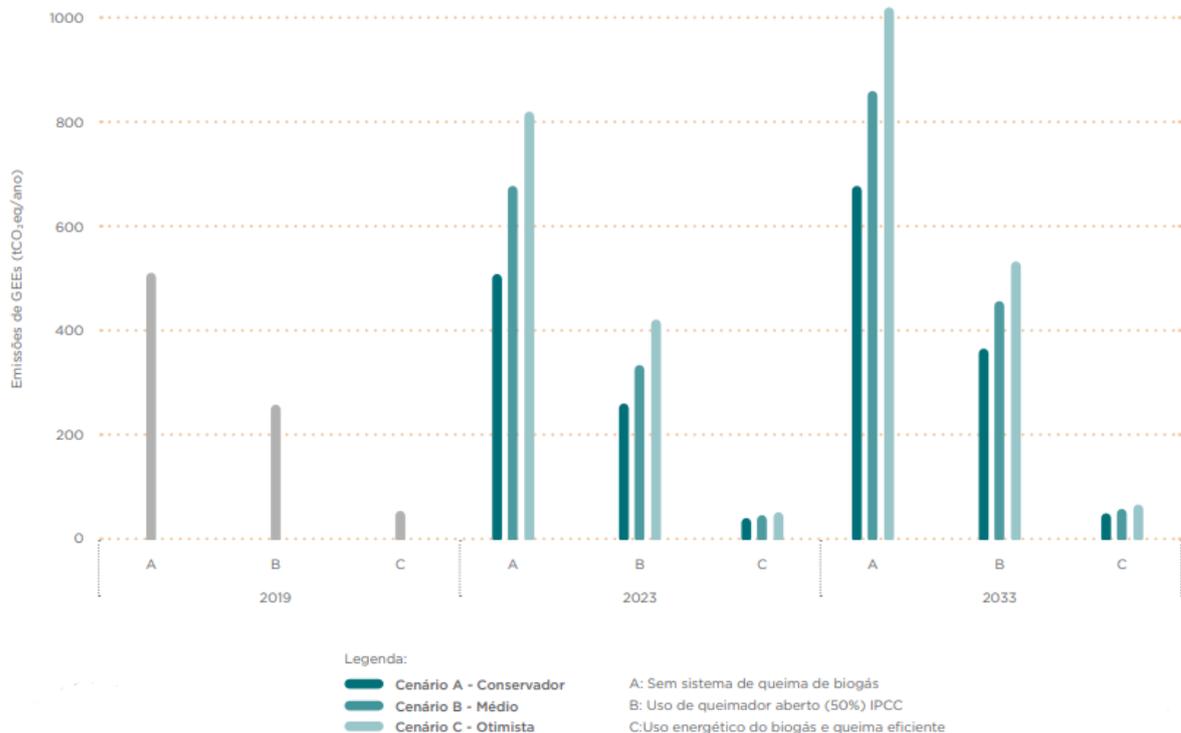


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Quanto aos aspectos ambientais, considerando que os resíduos de saneamento básico configuram um problema para os municípios, que têm dificuldades em gerenciá-los, a produção de biogás se mostra uma alternativa favorável para que as municipalidades gerenciem seus resíduos de modo inteligente, rápido e sustentável. Além disso, destaca-se o elevado potencial de atuação para a descarbonização, já que sistemas eficientes de uso do biogás, especialmente quando aplicado para geração de energia, emitem até 95% menos GEEs quando comparados aos sistemas de tratamento precários que não utilizam nenhum sistema de queima (ABIOGÁS, 2020).

Conforme Abiogás (2021), é possível obter uma estimativa de emissões de GEEs de sistemas de tratamento de esgoto do Brasil conforme a Figura 17. Nota-se que sistemas eficientes de uso do biogás, especialmente quando aplicado para geração de energia, emitem até 95% menos GEEs quando comparados aos sistemas de tratamento precários que não utilizam nenhum sistema de queima.

Figura 17 - Estimativa de emissões de GEEs de sistemas de tratamento de esgoto do Brasil para 2019, 2023 e 2033.



Fonte: Abiogás, 2021.

Considerando os aspectos econômicos, a produção de biogás proveniente de resíduos de saneamento básico, usa o que antes seria descartado, para gerar fonte de energia que pode ser aplicada no próprio município, como energia elétrica para determinada unidade pública como hospital, escola, sede da prefeitura; ou ainda pela produção de combustível para atender a frota municipal de carros ou ambulâncias. Ou ainda a municipalidade pode comercializar o biogás produzido. Segundo Mariani (2018), as barreiras financeiras e econômicas ao crescimento do setor de biogás brasileiro são relacionadas às dificuldades de encontrar um modelo de negócio viável para muitos casos. Isso é notório em projetos de pequena escala, nos quais as receitas com a venda ou substituição energética não cobrem o custo das instalações.

A Abiogás (2015) afirma que o biogás demanda uma política específica que considere sua complexidade em relação à localização do potencial, substratos, tecnologias e aplicação energética. A complexidade do biogás e as sinergias entre os vários benefícios como geração de energia e tratamento de resíduos e efluentes demandam uma política integrada horizontalmente (intersetorial) e verticalmente (federal, estadual, municipal)

Nesse sentido, as políticas para o biogás que vêm sendo desenvolvidas em alguns estados brasileiros, como São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, são boas iniciativas. No entanto, são ações isoladas que deveriam ser respaldadas ou atender a uma

política federal, num esforço maior para estimular a produção e uso do biogás como foi feito com outras fontes de energia renovável no Brasil.

A Comissão de Infraestrutura aprovou incentivos para a geração de energia em aterros sanitários por meio do projeto PLS 302/2018 que permite que estados e municípios criem incentivos fiscais, financiamentos e crédito para quem gera biogás e energia elétrica a partir de resíduos sólidos (FRAGOSO, 2022).

No âmbito estadual, em São Paulo, por exemplo, o Decreto 58.659/2012 instituiu o Programa Paulista de Biogás com a diretriz de incentivar a ampliação da participação de energias renováveis na matriz energética do estado de São Paulo, assim como estabelecer a adição de um percentual mínimo de biometano ao gás canalizado comercializado no estado.

No âmbito federal, destaca-se o Decreto 11.003/2022, que instituiu a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano com o objetivo de fomentar programas e ações para reduzir as emissões de metano, incentivar o uso de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível, e contribuir para o cumprimento de compromissos climáticos assumidos pelo país (BOECHEM, 2022).

Assim, nota-se que o biogás pode contribuir para sanar diversos problemas: sanar o gargalo da gestão dos resíduos sólidos, usar o que antes seria descartado para geração de fontes de energia, produção de energia limpa, economia de custos com energia elétrica ou combustível ao substituí-los pelo biogás gerado. No entanto, é preciso que cada caso seja analisado a fim de constatar a viabilidade mediante a realidade municipal, estadual e federal.

Acredita-se que partindo das municipalidades, o potencial que hoje o biogás tem no Brasil pode de fato sair de meras expectativas e torna-se realidade, demonstrando o real interesse público nesse insumo que tanto tem a contribuir com a matriz energética nacional. Assim, espera-se que o poder público amplie os incentivos para que a produção e implementação do biogás proveniente das formas estudadas alcancem um melhor aproveitamento já que a gestão de tais recursos está a cargo desse poder.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa teve como objetivo geral estabelecer um panorama do aproveitamento do biogás proveniente de saneamento na indústria, por meio de revisão de literatura.

Assim, foram traçados três objetivos específicos que foram alcançados. Quanto à caracterização do biogás de saneamento básico, constatou-se que a composição dos gases do biogás de saneamento varia de acordo com as peculiaridades dos resíduos e as condicionantes de funcionamento do processo de tratamento e digestão. Portanto, é essencial que cada situação seja analisada.

Quanto às tecnologias para aproveitamento energético desse material, observou-se que existem inúmeras aplicações para o biogás de saneamento: geração de energia elétrica e térmica; combustível veicular; iluminação a gás; porém a aplicação depende diretamente da caracterização do gás produzido e do cenário a ser empregado.

Quanto ao panorama do aproveitamento do biogás proveniente do saneamento, considerando seus aspectos técnicos, econômicos e ambientais, apurou-se, durante a análise da literatura, que este biogás geralmente possui alto teor de metano. Quanto aos aspectos ambientais, constitui-se como uma alternativa favorável para que as municipalidades gerenciem seus resíduos de modo inteligente, rápido e sustentável, assim como, destaca-se com um potencial de atuação para a descarbonização. Por fim, quanto aos aspectos econômicos, ainda precisa-se avaliar a viabilidade de produção por meio da análise da compensação entre a utilização de recursos descartados e dos altos custos de sua produção.

Ademais, apesar do potencial que o biogás apresenta no Brasil, sua aplicação e produção ainda é incompatível a esse potencial. Através de maiores incentivos poder público, é possível que o biogás alcance o máximo desse potencial, contribuindo assim para a modernização da matriz energética brasileira, com a sustentabilidade, além da geração de emprego e renda, bem como maior potencial econômico às empresas que implementarem o uso desse produto em seus processos.

Em futuros trabalhos recomenda-se investigar o potencial energético das plantas de biogás existentes no estado de São Paulo e investigar as indústrias que fazem uso do biogás no município de São Carlos e região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGÁS divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro durante fórum em São Paulo. **ABIOGÁS**, 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>>. Acesso em: 08 jun. de 2022.

_____. PNBB - Programa Nacional Do Biogás E Biometano. Associação Brasileira do Biogás. São Paulo. 2022.

_____. Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto. **ABIOGÁS**, 2021. Disponível em: < <https://i17.org/documents/BEP-Nota-Tecnica-Potencial-de-Producao-Biogas-Esgoto.pdf> >. Acesso em: 16 ago. de 2022.

ALMEIDA, L. I. J. de. **Potencial de produção de biogás e energia elétrica a partir da remoção da matéria orgânica oriundo de tratamento de esgotamento sanitário na ETE Norte – Palmas - TO**. 2016. 114f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

ALVES, L.; COLARES, R.; UTURBEY, W. As atratividades ambientais e econômicas do uso do biogás produzido pelo aterro sanitário de Belo Horizonte para geração de energia elétrica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2008, Belo Horizonte.

AQUINO, G. T. *et al.* O uso do biogás no âmbito rural como proposta de desenvolvimento sustentável. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 140-149, 2014.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. ABRELPE. 2021.

BATISTA, F. Z. **Aproveitamento energético do biogás gerado a partir de resíduos de saneamento**. 2016. 92f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.

BIANCHIN, V. Volkswagen trocará gás natural por biometano em fábricas. **Automotive Business**, 2022. Disponível em: <<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/setor-automotivo/volkswagen-trocara-gas-natural-por-biometano/>>. Acesso em: 22 ago. de 2022.

BOECHEM, F. Aprimoramentos na regulação devem impulsionar o uso do biogás e biometano. **EPBR**, São Paulo, 11 de Maio de 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/aprimoramentos-na-regulacao-devem-impulsionar-o-uso-do-biogas-e-biometano/>>. Acesso em: 16 de set. de 2022.

BORBA, L. O. **Viabilidade do aproveitamento energético do biogás em estação de tratamento de esgoto**. 2019. 16f. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Departamento de Áreas Acadêmicas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2019.

BORSCHIVER, S., DA SILVA., A.L.R., Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA-COBEQ**. 2014. p. 8757-8765.

BRASIL. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Biogás: projetos e pesquisas no Brasil**. Josilene Ticianelli Vannuzini (Org.). São Paulo, 2006. 186 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2006/12/Livro-BIOGAS-1.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

_____. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2007. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>, Acesso em: 27 de ago. de 2022.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 01 de jul. de 2022.

BRIDA, V. de. **Identificação do potencial de geração de biogás e potencial energético para o aterro sanitário do Cirsures – Estudo de caso**. 2014. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

BRK. Problemas causados pelo despejo de esgoto sem tratamento nos rios. **BRK Ambiental**, 2020. Disponível em: <<https://blog.brkambiental.com.br/problemas-causados-pelo-egoto/>>. Acesso em 27 jul. de 2022.

CANCELLI, T. **Geração de energia a partir do biogás de estações de tratamento de esgoto doméstico**. 2013. 22f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista) - Pós-Graduação em Mudanças Climáticas, Projetos Sustentáveis e Mercado de Carbono, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CARDOSO, P. H. G. *et al.* Produção de metano a partir do tratamento de esgoto sanitário visando energia alternativa. **Ciência e Sustentabilidade**, v. 2, n. 1, p. 23 - 40, 2016.

CASSINI, T. S. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M. **Energy Recovery from Biogás in Anaerobic Wastewater Treatment Plants**. 2008. In: CHERNICHARO, C. A. L. Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratamento Esgotos Domésticos. Relatório final de atividades (Pós-Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2009.

CHIAPPINI, G. ENTREVISTA Marco do saneamento eleva potencial do biogás em 3 milhões de m³/dia. **EPBR**. 2020. Disponível em: <<https://epbr.com.br/entrevista-marco-do-saneamento-eleva-potencial-do-biogas-em-3-milhoes-de-m%C2%B3-dia/>>. Acesso em: 06 ago. de 2022.

CIBIOGÁS. Biogás e a nova lei de saneamento, uma oportunidade para o Brasil? **CIBIOGÁS**. 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/biogas-e-a-nova-lei-de-saneamento-uma-oportunidade-para-o-brasil/#:~:text=Para%20o%20biog%C3%A1s%2C%20o%20Marco,o%20saneamento%20b%C3%A1sico%20no%20Brasil>>. Acesso em: 06 ago. de 2022.

_____. Panorama do biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2022. Disponível em: <<https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>>. Acesso em: 08 jun. de 2022.

DORSTEWITZ, Helge; HÜTTNER, Axel. Tecnologias de Purificação de Biogás. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (Coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/BE246I>>. Acesso em: 20 set. 2022.

ELETROBRÁS. **Plano Nacional de Energia Elétrica 1993-2015**. Estudos Básicos Volume III, Projeto 4. A oferta de Energia Elétrica. Biomassa Floresta, 1994.

ENSINAS, A. V.; BIZZO, W. A.; SANCHEZ, C. G. Estudo da geração de biogás no aterro delta da cidade de Campinas - SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Florianópolis, 2004.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz Energética e Elétrica. **EPE**, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 06 ago. de 2022.

FGV. **Biogás: inovação e sustentabilidade para o saneamento básico**. nº 33. 2019. Disponível em: <https://fgveurope.fgv.br/sites/fgveurope.fgv.br/files/downloads/FGV_ABR-2019_Biogas-%20MIOLO-FINAL-VDIGITAL.pdf>. Acesso em: 06 ago. de 2022.

FIGUEIREDO, P. J. M. **A sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental**. 2ª ed. Piracicaba: UNIMEP, 1995.

FISCHER, G.; SCHRATTENHOLZER, L. Global Bioenergy Potentials through 2050. **Biomass and Bionergy**, n. 20, p. 151-159, 2001.

FLORES, G. A. **Produção de biogás de resíduo de lodo ativado proveniente do tratamento de esgoto sanitário**. 2019. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio do Sinos, São Leopoldo, 2019.

FRAGOSO, R. CI Aprova incentivos para geração de energia em aterros sanitários. **Rádio Senado**, São Paulo, 15 de Maio de 2022. Disponível em:

<<https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2022/05/10/ci-aprova-incentivos-para-geracao-de-energia-em-aterros-sanitarios>>. Acesso em: 16 de set. de 2022.

GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. Nov Jersey: Wiley Interscience. 2003.

GUIMARÃES, J. R.; NOUR, E. A. A. Tratando nossos esgotos: processos que imitam a natureza. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**. Edição especial, maio de 2001.

HEBERLE, A. N. A. **Biogás a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes suplementado com óleo vegetal residual**. 2013. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário Univates, Lajeado, 2013.

ICLEI - Manual para aproveitamento de biogás. **Aterros sanitários**. São Paulo: ICLEI, Volume I, 2009.

INCT - INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ETES SUSTENTÁVEIS. Tratamento de esgoto para geração de energia. **INCT ETES Sustentáveis**, 2020. Disponível em: <<https://etes-sustentaveis.org/geracao-energia-tratamento-esgoto/>>. Acesso em: 27 jul. de 2022.

JUNIOR, A. B. C. **Simulação do comportamento de um resíduo modelo em aterro sanitário e estudo da evolução bio-físico-química**, 2000.

KAPDI, S. S.; *et al.* Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. **Renewable Energy**, n. 30, p. 1195-1202, 2005.

LEMONS, M. V. D. **Uso eficiente de biogás de esgoto em motores geradores**. 2013. 59f. Projeto de Graduação (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MARIANI, LEIDIANE. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. **Orientadora: Profª. Dra. Carla Kazue Nakao Cavaleiro**, v. 144, 2018.

MARTINS, R. D. **Potencial energético e produção de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos e resíduos vitivinícola na cidade de Bento Gonçalves e região**. 2018. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

MASRI, M. R. Changes in Biogás Production due to Different Ratios of Some Animal and Agricultural Wates. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 1, p. 97-100, 2001.

Ministério do Meio Ambiente. Setor de transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar. **MMA**, 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/6191-setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactos-na-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 27 jul. de 2022.

Ministério de Minas e Energia. Levantamento do potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento de dejetos animais no Brasil. Brasília: 2008.

MONTAGNA, T. B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia – uma**

revisão bibliográfica. 2013. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - União de Ensino do Sudoeste do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OLIVER, A. P. M. *et al.* **Manual de treinamento em biodigestão.** (2008). Disponível em: <<http://wp2.oktiva.com.br/ider/files/2010/01/16.Manual-de-Treinamento-em-Biodigestao.pdf>>. Acesso em: 14 jul. de 2022.

PAES, R. F. C. **Caracterização do chorume produzido no Aterro da Muribeca - PE.** 2003. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2003.

PECORA, V. *et al.* **Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás.** In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 08, 2008.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso,** 2006.

PEREIRA, F. R.; ZAVARISE, J. P.; PINOTTI, L. M. Determinação da produção de biogás em uma fábrica de chocolates para fins de aproveitamento energético. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 9, n. 3, p. 16-31, 2021.

PERSSON, M., JÖNSSON, O., WELLINGER, A., 2006. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection.** IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2007/12/upgrading_report_final.pdf>. Acesso em: 14 jul. de 2022.

PRADO, P. I. L. A. *et al.* **Viabilidade Econômica de um Biodigestor no IFMT Campus Cuiabá Bela Vista.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 03, 2012, Goiânia – GO. **Anais...** Goiânia – GO: IBEAS, 2012.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PROBIOGÁS. **Exemplos de usinas de aproveitamento de biogás no Brasil.** Ministério das Cidades. 2017a. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/FolhetoprojetosdereferenciaPROBIOGAS.pdf>>. Acesso em: 22 ago. de 2022.

_____. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2017b.

REIS, L. **Biogás nas indústrias brasileiras: como a fonte pode impulsionar o setor? CIBIOGÁS,** 2021. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/biogas-nas-industrias-brasileiras-como-a-fonte-pode-impulsionar-o-setor/>>. Acesso em: 08 jun. de 2022.

RIBEIRO, J. W.; ROOKE, J. M. S. **Saneamento básico e sua relação com o meio ambiente e a saúde pública**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Análise Ambiental) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

ROSILLO-CALLE, F. **The Role of Biomass Energy in Rural Development**, *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 03. **Anais...** – AGRENER, UNICAMP, Campinas, 2000.

RUIZ, E. **Novo Gramacho Landfill Gas Biomethane Purification Project in Brazil**. Trabalho apresentado em Methane Expo 2013, Vancouver, 12-15 mar. 2013.

SABESP. Companhia de Saneamento básico do Estado de São Paulo. **Estudo de caso ETE Barueri**. São Paulo, 2011.

SADECK, S. 100 milhões de pessoas não têm coleta de esgoto no Brasil. **Senado**, 2022. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/radio/1/conexao-senado/2022/03/22/100-milhoes-de-pessoas-nao-tem-coleta-de-esgoto-no-brasil>>. Acesso em 27 jul. de 2022.

SANTOS, E. L. B. dos.; JUNIOR, G. N. de. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal. **Revista Tekhne e Logos**, v. 4, n. 2, 2013.

SINIR. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. Visão Geral ano de referência 2020. Brasília, 2021.

_____. Resíduos dos Serviços de Saneamento Básico. **SINIR**, 2022a. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>>. Acesso em 27 jul. de 2022.

_____. **Resíduos Sólidos Urbanos**. **SINIR**, 2022b. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>>. Acesso em 27 jul. de 2022.

SOARES, R. C.; SILVA, S. R. C. M. da. Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível. *In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO*. 05, 2010, Cuiabá – MT. **Anais...** Cuiabá – MT: CONNEPI, 2010.

SOARES, R. V.; LOPES, J. M. Biometano, oriundo de rsu: análise do processo produtivo. **Revista Diálogos Interdisciplinares**, v. 8, n. 2, p. 12-29, 2019.

STAISS, C.; PEREIRA, H. Biomassa Energia Renovável na Agricultura e no Setor Florestal Instituto Superior de Agronomia, Portugal, **Revista Agros**, n. 1 p. 21-28, 2001.

VILLELA, I. A. C.; SILVEIRA, J. L. Aspectos Técnicos da Produção de Biogás em um Laticínio. **Revista Janus**, v. 2, n. 2, p. 99-107, 2005.

ZANETTE, L. A. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. 105f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.