

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

CLÁUDIO DE SOUZA ALMEIDA

ESTUDO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PARA AS CIDADES DE
BARRA MANSA, RESENDE E VOLTA REDONDA PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA
USINA DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO.

VOLTA REDONDA

2022

CLÁUDIO DE SOUZA ALMEIDA

ESTUDO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PARA AS CIDADES DE BARRA MANSA, RESENDE E VOLTA REDONDA PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre

Orientador(a): Prof. Dr Everaldo Zonta
Co-Orientador: Prof. Dr Felipe da Costa Brasil

Volta Redonda, RJ

2022

Ficha Catalográfica a ser elaborada pela Biblioteca da EEIMVR/UFF

A447e Almeida, Cláudio de Souza
Estudo da capacidade de geração de biogás para as cidades de Barra Mansa, Resende e Volta Redonda, para a implantação de uma usina de biodigestor anaeróbico / Cláudio de Souza Almeida. - 2022.
62 f.: il.

Orientador: Dr. Everaldo Zonta.
Coorientador: Dr. Felipe da Costa Brasil.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda, Volta Redonda, 2022.

1. Digestor de biogás. 2. Biogás. 3. Reaproveitamento de resíduo sólido. 4. Produção intelectual. I. Zonta, Dr. Everaldo, orientador. II. Brasil, Dr. Felipe da Costa, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD - XXX

CLÁUDIO DE SOUZA ALMEIDA

ESTUDO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PARA AS CIDADES DE BARRA MANSA, RESENDE E VOLTA REDONDA PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental

Aprovada em 21 de dezembro de 2022 .

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



EVERALDO ZONTA

Data: 10/02/2023 15:49:50-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Everaldo Zonta – UFF

Documento assinado digitalmente



GILMAR CLEMENTE SILVA

Data: 09/02/2023 09:47:20-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Gilmar Clemente Silva – UFF

Documento assinado digitalmente



MARIA IVONE MARTINS JACINTHO BARBOS.

Data: 17/03/2023 15:28:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a). Dr.(a) Maria Ivone Martins Jacintho Barbosa– UFRRJ

Documento assinado digitalmente



FELIPE DA COSTA BRASIL

Data: 09/02/2023 10:40:53-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Felipe da Costa Brasil – UFRRJ

Volta Redonda

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que eu conheci, foram vocês que contribuíram para a formação da minha personalidade e todo o conhecimento adquirido.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todo aprendizado de vida, alegrias, decepções, dúvidas, medos, felicidades, realizações, começo, recomeço.

A minha mãe Angélica e ao meu padrasto Ademar que sempre estiveram por perto para me apoiar e a dar aquele empurrão pra continuar na caminhada da vida.

Aos meus filhos Sara e César por terem me dado a felicidade de ser pai e por ter os melhores filhos que um pai pode ter.

A minha ex-esposa Michele, pelos bons tempos que vivemos juntos e pelos filhos que tivemos.

Aos meus amigos sr. Edivaldo e o sr. Orlando que mesmo sem me conhecer estenderam suas mãos para me ajudar sem receber nada em troca.

Ao meu Orientador Everaldo Zonta pela paciência, sabedoria e clareza em transmitir o seus ensinamentos para a conclusão desta dissertação.

A todos os professores do curso de Mestrado PGTA/UFF, que também colaboraram para a conclusão desta dissertação.

EPÍGRAFE

Porque o Senhor me fez grandes coisas; e Santo é seu nome.

Lucas 1:49

RESUMO

A industrialização durante as últimas três décadas na região sul fluminense em particular as três maiores cidades, Barra Mansa, Resende e Volta Redonda, têm enfrentado um problema comum, o crescimento de lixo urbano devido ao crescimento populacional. As prefeituras terão que encontrar meios para o descarte ambientalmente adequado dos resíduos urbanos, pois, as capacidades dos aterros sanitários da região estão no limite. O tratamento anaeróbico desse material através de biodigestores para aproveitamento de biogás poderá ser uma alternativa viável, pois contribui para minimizar os impactos ambientais causados pela destinação inadequada. Na introdução desta dissertação, apresentei uma visão geral do volume de resíduos sólidos urbanos e sólidos orgânicos no Brasil, qual o destino final de todo o resíduo urbano e seus principais impactos ambientais, além da falta de fiscalização e tomada de decisão pelo poder público e que hoje em dia é o principal responsável pelo seu tratamento adequado. Foi feita uma breve explicação do que é biodigestor anaeróbico e as principais vantagens do uso desta tecnologia. Na revisão bibliográfica, apresentei um pouco do histórico das formas de aproveitamento do biogás no mundo, as principais legislações brasileiras que tratam do tema, como ocorre o processo de formação do biogás, e quais são as expectativas de crescimento e de geração de biogás no Brasil. Outros dois tópicos importantes e que foram explicitados, são a cadeia de produção de biogás de uma usina biodigestor e o que é digestato e suas vantagens do uso para agricultura em substituição aos fertilizantes minerais. No tópico de materiais e métodos são apresentados todo o memorial de cálculo que serviram de base para os resultados e discussões. Neste tópico, foram apresentados a quantidade de RSU descartados pelas três cidades, a quantidade estimada de biogás, a quantidade estimada de geração de energia elétrica, o tempo de retorno do investimento e a discussão dos resultados apresentados. Todas as informações serviram de base para concluir que é vantajoso e benéfico do ponto de vista ambiental, social e econômico a implantação de uma usina biodigestora na região.

Palavras-chave: Resíduos urbanos, tratamento anaeróbico, biodigestores, cadeia de produção, impacto ambiental.

ABSTRACT

The industrialization over the last three decades, in southern region of the state of Rio de Janeiro, particularly the three largest cities, Barra Mansa, Resende and Volta Redonda, has faced a common problem, the growth of urban waste due to population growth. The municipalities will have to find means for the environmentally adequate disposal of urban waste since the capacity of the landfills in the region is at its limit. The anaerobic treatment of this material through biodigesters for the production of biogas may be a viable alternative because it contributes to minimizing the environmental impacts caused by inadequate disposal. In the introduction of this dissertation I presented an overview of the volume of urban solid waste and organic solid waste in Brazil, what is the final destination of all urban waste, and its main environmental impacts, besides the lack of inspection and decision-making by the public power and that nowadays is the main responsible for its adequate treatment. A brief explanation was given of what an anaerobic biodigester is and the main advantages of using this technology. In the literature review, I presented a little of the history of the ways of using biogas in the world, the main Brazilian legislation that deals with the subject, how the process of biogas formation occurs, and what are the expectations for growth and biogas generation in Brazil. Two other important topics that were explained are the biogas production chain of a biodigester plant and what is digestate and the advantages of its use for agriculture as a substitute for mineral fertilizers. In the topic of materials and methods are presented all the calculations served as a basis for the results and discussions. In this topic, the quantity of SUW discarded by the three cities, the estimated quantity of biogas, the estimated quantity of electric energy generation, the payback, and the discussion of the results presented. All the information served as a basis to conclude that it is advantageous and beneficial from an environmental, social and economic point of view, the implementation of a biodigester plant in the region.

Keywords: Urban waste, anaerobic treatment, biodigesters, supply chain, environmental impact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de biodigestão anaeróbia, p. 30

Figura 2 - Fluxos de processos e principais subprodutos de uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico para RSU, p. 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição média do biogás gerado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, p. 32

Tabela 2: Tipos de resíduos orgânicos, p. 33

Tabela 3: Tabela comparativa da quantidade de RSU entre órgãos públicos, p. 49

Tabela 4: Tabela comparativa dos cálculos entre órgãos públicos, p. 56

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abiogás	Associação Brasileira do Biogás
ABREN	Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas Públicas e Resíduos Especiais
A.C.	Antes de Cristo
AGV's	Ácidos Graxos Voláteis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
A _{qEPE}	Quantidade máxima anual de RSU
A _{qSNIS}	Quantidade mínima anual de RSU
Bio-CNG	Gás 'Natural' Comprimido
Bio-GNL	Gás 'Natural' Liquefeito
BM	Barra Mansa
C	Carbono
°C	Grau Celsius
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
COP 21	21ª Conferência das Partes
CHP	Combined Heat and Power
DAS	Digestão Anaeróbica Seca
DAU	Digestão Anaeróbica Úmida
D.C	Depois de Cristo
D _{qEPE}	Quantidade máxima diária de RSO
D _{qSNIS}	Quantidade mínima diária de RSO
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EE _{disp}	Energia elétrica disponível para venda
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FORSU	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos
GEE	Gases do Efeito Estufa
GW	Gigawatt
I	Valor do Investimento em R\$

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDC	Intended Nationally Determined Contribution
Kg	Quilograma
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt-hora
LCA's	Limites Críticos Ambientais
M	Quantidade de RSU
M _{EPE}	Quantidade máxima de RSU
M _{SNIS}	Quantidade mínima de RSU
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
m ³	Metros cúbicos
m ³ /h	Metros Cúbicos por hora
NBR	Norma Brasileira
Nm ³ /t	Normal Metros Cúbicos por Tonelada
Payback	Tempo de Retorno de Investimento
Pb	Payback
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPP's	Parcerias Públicas Privadas
Q _{EPE}	Quantidade máxima de biogás gerado por dia
Q _{SNIS}	Quantidade mínima de biogás gerado por dia
Q _{EPECH4}	Quantidade máxima de biogás CH ₄ gerado por hora
Q _{SNISCH4}	Quantidade mínima de biogás CH ₄ gerado por hora
R	Rendimento
R _{EPE}	Rendimento EPE
R _{SNIS}	Rendimento SNIS
Rb	Receita bruta anual
Ride	Região Integrada de Desenvolvimento

RM	Região Metropolitana
RS	Resende
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente
SINISA	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico
SINIR	Sistema Nacional Sobre Informações a Gestão de Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
ST	Sólido Total
TIR	Tempo de Retorno de Investimento
TMB	Tratamento Mecânico Biológico
ton	Tonelada
VR	Volta Redonda

SUMÁRIO

<u>1 INTRODUÇÃO</u>	16
<u>2 OBJETIVO</u>	19
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
<u>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	20
3.1 HISTÓRICO DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS	20
3.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....	22
3.3 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DO BIO GÁS	29
<u>3.3.1 Parâmetros de Controle da Biodigestão Anaeróbica</u>	33
3.4 EXPECTATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RSU NO BRASIL.....	37
<u>3.4.1 Resíduos Sólidos Urbanos</u>	39
<u>4 CADEIA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS</u>	41
<u>5 O DIGESTATO</u>	43
<u>6 MATERIAIS E MÉTODOS</u>	46
<u>7 RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	49
7.1 QUANTIDADE DE RSU DESCARTADOS PELAS CIDADES BM, RES, VR.....	49
7.2 QUANTIDADE ESTIMADA DE BIOGÁS.....	51
7.3 QUANTIDADE ESTIMADA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	52
7.4 TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO	55
7.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	57
<u>8 CONCLUSÃO</u>	60
<u>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	61
<u>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2021, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Abrelpe, 39,8% de todo o resíduo sólido urbano gerado foram destinados à lixões a céu aberto ou aterros controlados, causando sérios impactos ambientais.

Calcula-se que o desperdício no mundo em relação aos alimentos para o consumo humano, considerando toda a cadeia de suprimentos alimentar desde a coleta na lavoura até a mesa do consumidor, seja superior a 50%. Diversos autores concordam que o desperdício de alimentos é um grande problema para a sociedade moderna, e que acarreta custos econômicos, sociais e ambientais consideráveis, e que deve ser reduzido.

A geração de resíduos é uma consequência natural da vida humana, e está aumentando junto com o crescimento da população, urbanização e industrialização. A quantidade de geração de lixo está principalmente associada à situação econômica da sociedade, e a gestão adequada desses resíduos consiste com uma melhor qualidade de vida. O contínuo despejo a céu aberto e aterro simples de resíduos sólidos nas principais cidades do mundo em desenvolvimento podem resultar em consequências significativas para a saúde e o meio ambiente porque a decomposição descontrolada de resíduos pode levar a doenças epidêmicas, proliferação de odores desagradáveis e mudanças climáticas (JHA, et al, 2011, apud, Ghosh et al., 1997). Uma solução para este problema é a digestão anaeróbica.

Um dos maiores problemas ambientais em centros urbanos, são os resíduos sólidos urbanos. O poder público é o responsável por tratar e destinar de forma correta sem trazer consequências ambientais, porém, a falta de fiscalização, falta de rigor no cumprimento da lei e a falta de conscientização da população fazem com que este problema seja ignorado ou não é dada a devida atenção. Biodigestores especializados poderão ser instalados em centros urbanos e tratar de forma correta estes resíduos, gerando benefícios para a sociedade, através da não contaminação de áreas, destinação final ambientalmente correta, coleta seletiva eficaz, geração de biogás, geração de energia elétrica e geração de biofertilizantes.

Atualmente têm-se discutido bastante a questão energética. Sabe-se que os combustíveis fósseis, além de altamente poluentes, também são considerados recursos não-renováveis, e as reservas naturais não devem durar muito tempo. Assim soluções energéticas limpas e renováveis têm sido alvo de muita pesquisa em vários países, e várias destas soluções estão gradualmente sendo implementadas.

Muitos trabalhos de pesquisa foram publicados sobre o desempenho de diferentes sistemas tecnológicos de digestão anaeróbicos de resíduos sólidos orgânicos. A maioria deles se concentra sobre o conceito de digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU). Tratamento anaeróbico de FORSU tem sido uma matéria-prima atraente para a produção de biogás (NASIR et al, 2012) e de biofertilizantes.

O biodigestor apresenta vantagens interessantes para a questão ambiental. No Brasil os biodigestores estão presentes, em sua maioria, no meio rural, onde apresentam como vantagens a degradação da matéria orgânica dos currais, redução dos odores, diminuição de moscas no local, redução de coliformes superior a 99%, bem como a possibilidade de aproveitamento do biogás produzido como combustível e uso do digestato como fertilizante.

O biogás é uma fonte renovável de energia que possui diferentes aplicações. Pode ser queimado para gerar calor ou eletricidade, ou liquefeito para produzir metanol. Também pode ser usado como matéria-prima para a reforma catalítica do metano a vapor. O biogás refinado pode ser alimentado com gás de redes de distribuição, ou usados para alimentar células de combustível. Este pode ser comprimido para ser usado como fonte de combustível para automóveis semelhante ao gás natural comprimido (AL et al, 2015).

O gás metano é proveniente da fermentação anaeróbica de materiais orgânicos, ele é considerado um biogás. É utilizado como fonte de energia alternativa (renovável e limpa) podendo ser usado para gerar energia elétrica, calor e de combustível para veículos leves e pesados. Além disso o gás metano, é 21 vezes mais danoso que o dióxido de carbono em termos de efeito estufa, se por um lado ele é uma excelente fonte de energia por outro lado é muito prejudicial ao meio ambiente, assim, sua simples queima representa um benefício ambiental perante sua emissão.

Dessa forma, deve-se estimular a redução da geração, como por exemplo com campanhas para combater o desperdício de alimentos, e optar por rotas tecnológicas para tratamento de resíduos com menor emissão de GEE como alternativa à disposição final, uma vez que os resíduos orgânicos podem ser reciclados e valorizados, sendo as principais alternativas de aproveitamento a compostagem e a digestão anaeróbia para geração de biometano (BRASIL, 2022 p 36).

De acordo com os principais sítios de informação do poder público foram levantados nos últimos 3 anos de cada sítio a quantidade total descartada de cada cidade. Este levantamento foi feito para realizar uma média simples anual dos três sítios que servirão de base para os cálculos.

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, cobrindo energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e biocombustíveis. É uma empresa pública federal, dependente do Orçamento Geral da União. A empresa foi criada por meio de medida provisória convertida em lei pelo Congresso Nacional - Lei 10.847, de 15 de Março de 2004. E a efetivação se deu em um decreto de agosto de 2004.

O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) é um dos Instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº. 7.404, de 23 de dezembro de 2010. A coordenação e articulação do SINIR estão sob a responsabilidade do Governo Federal, por meio do Ministério do Meio Ambiente (MMA), e sua organização e manutenção são de responsabilidade compartilhada entre os governos municipais, estaduais e Distrito Federal.

Criado em 1996, o SNIS é uma unidade vinculada à Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Com abrangência nacional, reúne informações de caráter institucional, administrativo, operacional, gerencial, econômico-financeiro, contábil e de qualidade da prestação de serviços de saneamento básico em áreas urbanas dos quatro componentes do saneamento básico.

2 OBJETIVO

Avaliar a capacidade de geração de biogás para as cidades de Barra Mansa, Resende e Volta Redonda para fins de implantação de uma usina de biodigestor anaeróbico.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A quantidade (ton) de resíduos sólidos urbanos descartados anualmente para as três cidades;
- Mensurar a capacidade de geração de biogás (m^3/h) através dos RSU coletados das cidades;
- Mensurar a capacidade estimada de geração de energia elétrica (MWh) da usina biodigestora;
- Estimar em Reais (R\$) o custo da implantação da unidade de produção de biogás e estimar o tempo de retorno de investimento (payback) em anos.
- Identificar as possíveis dificuldades (legislativo, mercado, operacional, sociedade) para o projeto;
- Avaliar quanto a viabilidade do projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, apresentei um pouco do histórico das formas de aproveitamento do biogás no mundo, as principais legislações brasileiras que tratam do tema, como ocorre o processo de formação do biogás, e quais são as expectativas de crescimento e de geração de biogás no Brasil.

3.1 HISTÓRICO DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

O interesse pelo biogás é antigo. Evidências arqueológicas indicam que ele era usado para aquecer banhos públicos nos impérios assírio no século 10 A.C. e persa no século 17 D.C (CARVALHO et al, 2019 p 17).

A história do biogás começou com estudos realizados em meados de 1600, quando foi documentada a existência de alguma substância inflamável de composição química desconhecida em regiões pantanosas. Com a evolução dos estudos descobriu-se que o odor estava relacionado à decomposição de matéria orgânica.

Em sua tese LIMA JR. (2015, p. 31), a produção de gás a partir de resíduos orgânicos animais e vegetais foi verificada pela primeira vez por Robert Boyle em 1682, sendo sua identificação como combustível verificada por Alessandro Volta na Itália em 1776 (John, 2004).

A participação de microrganismos no processo foi descoberta somente no final do século XIX e a primeira descrição de formação do CH₄ foi verificada por Bechamp em 1867, tendo etanol como substrato. Mais tarde Hope-Seyler produziu CH₄ diretamente do acetato, e em 1906 este gás foi formado a partir de CO₂ e H₂ (Stafford et al., 1980, apud John, 2004).

A digestão anaeróbia ganhou força após a Segunda Guerra Mundial, popularizou-se com a crise energética na década de 70 e desde então vem sendo usada para tratamento de resíduos líquidos ou pastosos, como dejetos animais, esgotos domésticos, industriais e lodos provenientes de diferentes processos (Mata-alvarez, 2003).

Seu uso moderno apareceu somente no fim do século 19 quando pesquisadores na Índia criaram o primeiro biodigestor moderno. A planta aproveitava dejetos humanos do asilo de leprosos de Matunga (Bombaim) para a geração de biogás e seu uso subsequente para iluminação. A partir daí, o interesse pela tecnologia não parou de crescer, embora seu desenvolvimento tenha sido desigual pelo mundo, com Europa e Ásia tomando a dianteira (CARVALHO et al, 2019 p 17).

A história do biogás retorna num segundo ciclo, o qual teve início em meados de 1940, durante a II Guerra Mundial, quando a escassez e dificuldade de acesso a fontes fósseis de combustível reacenderam o interesse pela utilização do biogás, tanto para o cozimento e aquecimento de casas, como para a alimentação de motores de combustão interna. No entanto, após o término do conflito, o uso deste combustível ficou geograficamente remanescente na China e Índia, onde permanece sendo utilizado por pequenos produtores rurais até os dias de hoje. Atualmente, estima-se que há cerca de 8 milhões de biodigestores em operação na China e aproximadamente 300 mil unidades na Índia. Seu uso se dá principalmente para iluminação, cozimento e aquecimento domiciliares.

Em seu Livro (COELHO; et al, 2018, p 3), o uso de bioenergia no mundo tem aumentado em ritmo acelerado nas últimas décadas. Nesta direção, a produção e uso do biogás também tem aumentado significativamente. A União Europeia apresenta a maior taxa de crescimento de produção e uso de biogás e biometano. Segundo a European Biogas Association – EBA (2018) o número de plantas de biogás nos últimos seis anos praticamente triplicou, atingido o valor de 17.662 plantas em 2016. A Alemanha e a Itália são os países que abrigam o maior número de plantas: no ano de 2015 estes países tinham, respectivamente, 10.846 e 1.555 plantas de biogás (STAMBASKY, 2017). Quanto às plantas de produção de biometano, a taxa de crescimento anual é significativa, atingindo valores de aproximadamente 25% ao ano, nos últimos quatro anos. Em 2018, na União Europeia havia 497 de produção de biometano que, juntas, totalizam 281.606 m³ /h de capacidade instalada ou 17,264 GWh.

A utilização de biodigestores é capaz de reduzir em cerca de 40% a emissão de gases de efeito estufa (GEEs) (GARCIA JUNIOR et al, 2016).

No Brasil, o uso de biogás como fonte de combustível tampouco é novo. As primeiras experiências comerciais datam da década de 1970 como resposta às necessidades de diversificação da matriz energética nacional após os choques de petróleo de 1973 e 1979. Embora promissoras em teoria, as iniciativas, no entanto, foram abandonadas em razão das dificuldades de controle dos processos biológicos dos biodigestores instalados e à corrosão do equipamento por parte do gás sulfídrico (CARVALHO et al, 2019, p 17).

Grande quantidade de desperdício alimentar são gerados todos os anos a uma taxa cada vez maior e descarte não científico do mesmo é passível de causar poluição ambiental além de desperdiçar os recursos, caso contrário, poderia ser utilizado propositalmente para recuperação de bioenergia (ARELLI et al, 2018, apud, Zhang et al., 2017). O descarte de alimentos contém alto conteúdo orgânico (na matéria seca: 35,5-69% de açúcar e 4 - 22% de proteína) e úmida

(75-85%) (ARELLI et al, 2018, apud, Wang et al., 2014; Nguyen et al., 2017), que é adequado para biodegradação por meio de digestão anaeróbia para a geração de energia renovável na forma de biogás (Cho et al., 2013) e, acima de tudo, sua disponibilidade poderia ser garantida ao longo do ano (ARELLI et al, 2018).

3.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

No tocante aos resíduos sólidos urbanos, a Lei nº 11.445/2007 considera saneamento básico os serviços, as infraestruturas e instalações operacionais de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, além dos relativos ao abastecimento de água potável, esgotamento sanitário e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, o que aponta para a necessidade de tratamento da problemática do saneamento básico no conjunto das dimensões que o compõem (BRASIL, 2019 p 14). Estabelece ainda que a prestação dos serviços terá a sustentabilidade econômico-financeira assegurada e, sob os aspectos técnicos, atenderá a requisitos que garantam a qualidade adequada. Por sua vez, a lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei 12.305/2010 – estabelece a obrigatoriedade da coleta seletiva e determina que apenas os rejeitos devam ser encaminhados a aterros sanitários (regra que ficou conhecida no país como o “fim dos lixões”). Tais elementos reforçam o grande desafio, enfrentado pelo Brasil, de ampliar os níveis de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos (CARVALHO et al; 2019, p 45).

A gestão dos resíduos sólidos no Brasil tem sido historicamente tratada como questão sanitária e de saúde pública. Apenas mais recentemente sua gestão tem sido entendida enquanto tema transversal, devido à sua relação potencial com projetos de biogás visando a redução de emissão de gases efeito estufa e geração de energia (PROBIOGAS, 2015a, p 71).

As Políticas Nacionais de Resíduos Sólidos e de Saneamento Básico determinam que o tratamento do resíduo deve ser adequado e, havendo viabilidade técnica, econômica e ambiental em seu aproveitamento, isto deve ser realizado. Como o principal componente dos resíduos é a fração orgânica, este aproveitamento caracteriza-se como bioenergia (EPE, 2018 p 71)

Primeiramente, esta percepção foi decorrente da existência de projetos voltados para a captação de biogás de aterros sanitários visando à geração de eletricidade. Apenas nos últimos anos, através da promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o tema biogás de RSU passou a ser atrelado também a sistemas de tratamento anaeróbio, que através de plantas de tratamento mecânico biológico (TMB) tornaram possível a segregação e aproveitamento das

frações inorgânicas e orgânicas, com geração de rejeitos passíveis de disposição final (PROBIOGAS, 2015a, p 71).

Apesar da falta de políticas específicas para fomentar a disseminação de projetos de biogás no país, o setor de RSU tende a se beneficiar dos recentes marcos legais relacionados à sua gestão. Em 2010 foi publicada a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos - PNRS (Lei nº 12.305/2010 e Decreto nº 7.404/2010) que se constitui no principal marco regulatório relacionado ao manejo dos resíduos sólidos urbanos (PROBIOGAS, 2015a, p 71).

A lei constitui-se na base central para a gestão de todo tipo de resíduo sólido urbano, seja este doméstico, industrial, da construção civil, agrosilvopastoril, da área de saúde e perigosos, com exceção de rejeitos radioativos (PROBIOGAS, 2015a, p 71).

Apesar da abrangência da PNRS, ela introduziu uma distinção primordial entre o que se constitui como resíduo, sendo este todo material passível de recuperação ou reaproveitamento; e rejeito, material que já teve esgotadas as possibilidades técnicas e econômicas de reutilização, reciclagem ou tratamento, e deve ser descartado e disposto de maneira ambientalmente adequada (PROBIOGAS, 2015a, p 71 apud Ministério do Meio Ambiente, 2012).

No fim de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) em Paris, mais de 190 países se reuniram para formalizar um acordo sobre o clima com vistas à redução das emissões de gases efeito estufa (GEE). Cada nação, de acordo com suas possibilidades, apresentou seus compromissos com as metas de redução de emissões, conhecidas como Intended Nationally Determined Contribution (INDC) (MILANEZ; et al, 2018, p 234).

Naquela ocasião, o Brasil, tomando como base o volume de emissões de gases de 2005, comprometeu-se a reduzi-las em 37% até 2025, elevando seus esforços até atingir a meta de uma redução de 43% em 2030 (MILANEZ; et al, 2018, p 234).

A partir de uma projeção de crescimento da atividade econômica até 2030, o Brasil apresentou os seguintes compromissos para viabilizar o atingimento das metas globais de reduções nas datas referidas (MILANEZ; et al, 2018, p 234 apud EPE, 2016):

- Elevar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética em cerca de 18% até 2030, por meio da expansão de biocombustíveis.
- Aumentar a participação de energias renováveis na matriz para 45%.
- Obter ao menos 66% de participação da fonte hídrica na geração de eletricidade.

- Aumentar o uso de fontes renováveis, distintas da hídrica, na matriz total de energia de forma a atingir uma participação de 28% a 33% do total.
- Expandir o uso de energias renováveis, diferentes da hídrica, em especial a solar, a eólica e a biomassa, para uma participação de aproximadamente 23% no fornecimento de energia elétrica.
- Elevar a eficiência no setor elétrico em 10%.

O biogás tem um papel importante a desempenhar nessa nova matriz energética sustentável, reaproveitamento (ciclagem) de nutrientes na agricultura e redução da emissão de GEE.

Com a utilização de efluentes em biodigestores, há uma drástica redução do carbono presente na biomassa, pois no processo de digestão da matéria orgânica perde exclusivamente carbono na forma de metano e gás carbônico. Como já reconhecido, apesar de, atualmente, representar uma parcela muito pequena da produção de energia, o biogás tem um enorme potencial no Brasil. Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (Abiogás), o potencial teórico total de geração brasileiro é de cerca 80 milhões de m³/dia, equivalente a 24% da demanda de energia elétrica ou 44% da demanda de óleo diesel. O maior potencial de geração está no setor sucroenergético, responsável por cerca de 70% desse total (MILANEZ, et al, 2018, p 238 apud Abiogás, 2017).

Segundo a ABREN (Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos), um dos sérios problemas causados pelos resíduos sólidos urbanos no Brasil foi a aceitação de aterros como “tratamento”, por parte dos poderes públicos o que é uma equivocada interpretação sobre a definição da PNRS de tratamento de resíduos e destinação de rejeitos. Por lei somente rejeitos poderiam ser destinados aos aterros, historicamente não respeitado nem fiscalizado. Os principais fatores que contribuíram foram:

- Aceitação de aterro como tratamento pelos poderes públicos, o que é uma equivocada interpretação sobre a definição da PNRS de tratamento de resíduos e destinação de rejeitos.
- Falta de rigor em se fazer cumprir a lei, sem consequências jurídicas para os gestores públicos que a desrespeitaram.
- Falta de instrumentos econômicos para efetivar a aplicação da PNRS.

- Incapacidade de investimento do poder público e dificuldades para que os investimentos privados sejam devidamente remunerados para a prestação um serviço de qualidade à população.
- Falta de capacitação de funcionários públicos em gestão de RSU.
- Limitação do custo de tratamento de soluções ambientalmente sustentáveis ao baixo valor cobrado atualmente por aterros, por tonelada de RSU destinado.

A demanda atual por melhores condições de tratamento surge diante das condições criadas pelo novo marco legal do saneamento (Lei nº 14.026/2020), que obriga todas as prefeituras a estruturarem Parcerias Públicas Privadas (PPPs) de 30 anos no caso de delegação do serviço público de coleta, transporte e destinação ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos.

Esta lei, também chamada de novo marco regulatório do saneamento básico, estimula a concorrência, a desestatização do setor e a privatização de empresas públicas estatais de saneamento, entre outras inovações importantes para fazer face aos graves problemas ambientais e de saúde pública causada pela insuficiência de saneamento no Brasil.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituiu o fim dos lixões até 2014, prazo que não foi cumprido e pelo novo marco regulatório do saneamento básico, consolidou a ampliação do prazo de ajustamento da disposição final adequada dos rejeitos para 31 de dezembro de 2020 e até 2024 para os municípios que até a data da promulgação da lei tenham elaborado o plano de gestão de resíduos sólidos e que disponham de mecanismos de cobrança que garantam sua sustentabilidade econômico-financeira.

Em 2012, 42% dos resíduos coletados (23.767.224 toneladas) foram inadequadamente destinados, sendo encaminhados para lixões ou aterros controlados, os quais não possuem sistemas de controle ambiental para mitigar os riscos ao meio ambiente e à saúde pública (ABRELPE, 2013). Em termos municipais, este montante se distribui entre cerca de 60% dos municípios brasileiros que destinam os resíduos sólidos urbanos a locais considerados inadequados (PROBIOGAS, 2015a, p 80).

É importante salientar que o saneamento básico é considerado como um conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

O novo marco legal condiciona o adiamento do fim dos lixões, a elaboração do plano de gestão de resíduos sólidos e a disponibilização de mecanismos de cobrança pelos serviços

de coleta, transporte e disposição final de resíduos sólidos urbanos. Atendendo a estes requisitos, os seguintes prazos foram estipulados:

1. até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais;
2. até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes;
3. até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; e
4. até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010.

A gestão dos resíduos no país precisa observar a seguinte ordem de prioridade: Não geração (evitar a criação de RSU), redução (menor uso de recursos nos processos produtivos e de consumo e aumento da vida útil dos bens), reutilização (reparo, limpeza ou restauro de bens existentes), reciclagem (reaproveitamento do material para uso em outros processos produtivos), tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (CARVALHO et al, 2019 p 44).

Essa hierarquia é considerada a base de qualquer plano de gestão de RSU. Ela também constitui um dos principais elementos estruturadores para iniciativas de “lixo zero”, implementadas em algumas regiões do mundo, sobretudo entre os países desenvolvidos (CARVALHO et al, 2019 p 45).

Em 2012, por meio da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de energia elétrica. A resolução introduz o conceito de sistema de compensação de energia elétrica, no qual a energia gerada por essas pequenas centrais geradoras (até 100 kW) é cedida gratuitamente à distribuidora local, passando o cliente a ter um crédito perante a distribuidora no montante da energia injetada no sistema elétrico. Além disso, a resolução estabelece que podem usufruir desse mecanismo sistemas de geração distribuídos com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada (CARVALHO et al, 2019 p 173 apud ANEEL, 2012).

Para aprimorar o esquema e após consultas públicas, a Aneel aprovou a Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, que altera a Resolução Normativa nº 482. As

novas regras, válidas a partir de março de 2016, alteram os limites máximos de participação no esquema para 75 KW na microgeração distribuída e 5 MW (3 MW no caso de fontes hídricas) na minigeração distribuída. Além disso, a resolução permite a instalação de geração distribuída em condomínios, com os ganhos sendo divididos entre os condôminos de acordo com regras estabelecidas entre eles. Finalmente, além de facilitar os trâmites burocráticos, a nova resolução reduz o tempo máximo de conexão à rede e admite que consumidores usem os créditos obtidos para abater no consumo de eletricidade em suas outras unidades, contanto que estejam na mesma área de atuação da distribuidora (CARVALHO et al, 2019 p 173 apud ANEEL, 2015).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamentou o uso de biometano no país por meio da Resolução nº 8, de 30 de janeiro 2015. Segundo a resolução, o biometano é tratado de maneira análoga ao gás natural quando for produzido a partir de resíduos agrícolas e agroindustriais. Entretanto, ela mantém que o biometano oriundo de resíduos urbanos e de esgotamento sanitário seja tratado como combustível experimental, sendo vedada sua injeção na rede de gasoduto (CARVALHO et al, 2019 p 195).

Por meio do Decreto 58.659, de 4 de dezembro 2012, o estado de São Paulo exige a injeção de um percentual mínimo (ainda não definido) de biogás dentro da rede de gás natural do estado, atendendo as exigências de qualidade da ANP. O Plano Paulista de Energia 2020 identifica um potencial de 2.600 MW para o biogás de fontes urbanas, florestais e agrícolas (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013) (CARVALHO et al, 2019 p 195).

O estado do Rio de Janeiro foi ainda mais longe exigindo, por meio de sua Lei 6.361, de 18 de dezembro de 2012, regulamentado pelo Decreto 44.855, de 26 de junho 2014, a aquisição por parte das concessionárias de gás canalizado de todo o biogás (de todas as fontes) do estado até um limite máximo de 10% (CARVALHO et al, 2019 p 195).

Conforme relatou a ABREN, o estado do Rio de Janeiro poderia abrigar até 20 usinas com até 20MW de potência instalada, ao usar os resíduos urbanos para geração de energia traria um impacto muito significativo para o meio ambiente, a mitigação de gases do efeito estufa seria de 330 milhões de toneladas de CO₂ equivalente durante a operação das usinas, o que seria o equivalente a retirar das ruas 1,7 milhão de veículos.

Dentre os principais pontos que favorecem a expansão do biogás destacam-se a geração distribuída de energia, expansão do mercado livre de energia elétrica e o novo Marco Regulatório do Gás Natural (Decreto nº 10.712, 02/06/2021), que regulamenta a Lei nº 14.134, conhecida como a Nova Lei do Gás.

O novo Marco Legal de Resíduos Sólidos, criado por meio do Decreto 10.936 de janeiro de 2022, regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que, por sua vez, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Esse novo Marco confere maior clareza e segurança jurídica, determina responsabilidades, simplifica e desburocratiza a criação de planos e acordos setoriais, incentiva o desenvolvimento técnico-científico, a inovação e o empreendedorismo do setor para atrair novos investimento privados. Nesse contexto, novos projetos serão implementados de maneira mais rápida, e a redução de emissões de metano resultantes se transformará em benefício econômico para quem empreende, com impacto ambiental positivo não somente para toda a sociedade brasileira, mas também para a proteção do sistema climático global. No Brasil uma das principais fontes de emissão de metano são resíduos orgânicos urbanos e agrícolas. O novo marco de resíduos sólidos vem se agregar a arcabouço institucional relevante que envolve, entre outros instrumentos, a própria Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Marco do Saneamento (Lei n. 14.026/2020).

A Portaria MMA Nº 71, de 21 de março de 2022 Institui o Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano - Metano Zero, representa enorme oportunidade econômica e estratégica, reduzindo emissões de gases de efeito estufa, custos de combustível e energia e transformando os produtores rurais e gestores de aterros sanitários em fornecedores de combustível e energias limpas e renováveis, além do importante subproduto, os biofertilizantes com alto valor para a agricultura.

O foco de atuação está voltado para o aproveitamento energético e como combustível de resíduos ou produtos orgânicos como fontes de biogás e biometano. Destaque é dado aos resíduos sólidos urbanos e agrícolas, provenientes, por exemplo de: aterros sanitários, produção de cana-de-açúcar, suinocultura, criação de aves, indústria de laticínios, entre outros. Serão admitidas outras fontes e aplicações de biometano, as quais deverão atender aos critérios e procedimentos estabelecidos pelos órgãos competentes. O Programa Metano Zero é uma iniciativa do Governo Federal, implementado com o envolvimento da sociedade brasileira (setor privado, sociedade civil e setor científico e de pesquisas). Promove a redução da emissão de metano em consonância com o desenvolvimento sustentável, com base na cooperação para o financiamento, incentivos, desoneração, capacitação, desenvolvimento, transferência e a difusão de tecnologias e de processos.

Art. 2º O Programa Metano Zero visa contribuir com os compromissos assumidos pelo país no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, no Pacto de Glasgow e no Acordo Global de Metano.

Art. 3º São objetivos estratégicos do Programa Metano Zero:

I - a redução das emissões de metano;

II - o uso sustentável de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível; e

III - fomentar acordos setoriais visando ao uso sustentável de biogás e biometano e à redução das emissões de metano.

Art. 4º São diretrizes do Programa Metano Zero:

I - incentivar o mercado de carbono, em especial o crédito de metano;

II - fomentar planos e acordos setoriais;

III - promover a implantação de biodigestores e sistemas de purificação de biogás e de produção e compressão de biometano;

IV - incentivar a criação de pontos e corredores verdes para abastecimento de veículos leves e pesados, tais como ônibus, caminhões e tratores agrícolas, e embarcações movidos a biometano ou híbridos com biometano;

V - estimular a implantação de tecnologias que permitam a utilização de biogás e biometano como fontes de energia e combustível renovável;

VI - promover e desenvolver pesquisas científico-tecnológicas e de inovações, e a difusão de tecnologias, processos e práticas orientados a mitigar as emissões por fontes de metano;

VII - fomentar medidas e mecanismos para estimular a redução das emissões de metano;
e

VIII - promover a cooperação nacional e internacional para o financiamento, a capacitação, o desenvolvimento, a transferência e a difusão de tecnologias e de processos para a implementação de ações de redução das emissões de metano.

3.3 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DO BIOGÁS

Como já indica o nome, o "bio" gás tem origem em um processo biológico. A matéria orgânica, quando decomposta em meio anaeróbio (ausência de oxigênio), origina uma mistura gasosa chamada de biogás. Esse processo é muito comum na natureza e ocorre, por exemplo, em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais ruminantes. Por meio de diversos microrganismos, a matéria orgânica é convertida em biogás quase por completo. Além disso, são produzidas certas quantidades de energia (calor) e nova biomassa (PROBIOGAS, 2010 p 20).

De maneira geral, o processo pode ser resumido em duas etapas principais: na primeira, os compostos orgânicos complexos são convertidos em materiais mais simples como ácidos voláteis, hidrogênio e outros; na segunda, ocorre a conversão desses compostos nos produtos finais gasosos do processo de digestão anaeróbia, em especial os gases metano e carbônico, principais componentes do biogás (PROBIOGAS, 2015a p 14).

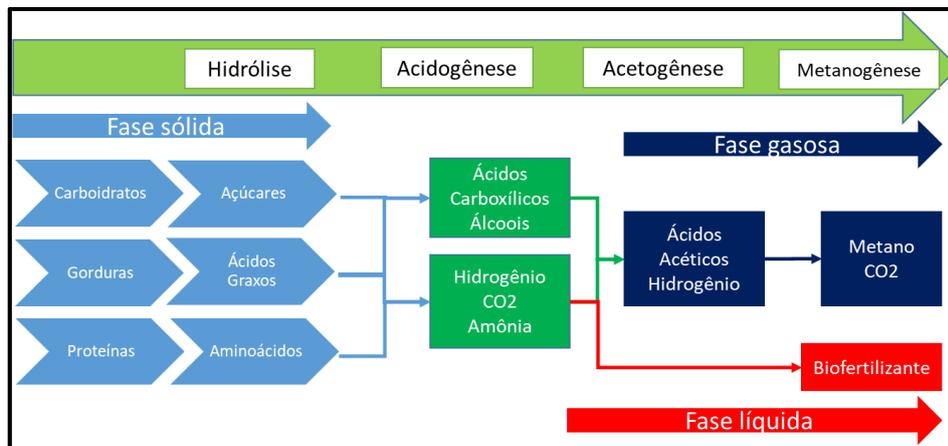
Nos sistemas anaeróbios, a maior parte da demanda química de oxigênio (DQO) é convertida em metano (cerca de 50 a 70%), sendo removida do material em digestão e extraída do reator na forma gasosa. Entre 5 a 15% do material orgânico é convertido em lodo ou biomassa microbiana e cerca de 10 a 30% não é convertida em biogás ou biomassa, permanecendo como material não degradado (PROBIOGAS, 2015a p 14 apud CHERNICHARO, 1997).

Para TOLMASQUIM (2016, p. 188) em seu livro, “a biodigestão pode ser dividida em quatro fases: hidrólise, que é a primeira fase do processo, onde a matéria orgânica complexa (polímeros) é quebrada em partes menores e mais simples; acidogênese, onde os produtos da hidrólise são convertidos em substratos para metanogênese; a acetogênese, que também converte os produtos da acidogênese que não sofrem metanogênese diretamente; e por último, a metanogênese que é a produção de metano dos substratos por bactérias anaeróbias.”

A metanogênese é a fase mais crítica e mais lenta da biodigestão, é extremamente influenciada pelas condições de operação, como temperatura, composição do substrato, taxa de alimentação, tempo de retenção, pH, concentração de amônia entre outros (TOLMASQUIM (2016, apud Al Seadi et al 2008). O produto final do biogás é composto basicamente de CH₄, CO₂ e H₂S (Avaci et al., 2013).” Outro composto importante do processo da biodigestão, é o chamado “biofertilizante”, é um efluente orgânico muito rico em nutrientes, no qual, o estabelecimento poderá destinar para o seu fornecedor de alimentos afim ser utilizado em substituição aos fertilizantes sintéticos na agricultura (TOLMASQUIM, 2016).

O fluxograma do processo é apresentado na figura 1 abaixo:

Figura 1: Fluxograma do processo de biodigestão anaeróbia



Fonte: O autor

KOTHARI et al, 2014, explica de forma mais detalhada cada etapa do processo da digestão anaeróbia que ocorrem nas quatro etapas:

Hidrólise: Os carboidratos, proteínas e gorduras são hidrolisados em açúcares monoméricos, aminoácidos e ácido graxo, respectivamente (KOTHARI et al, 2014, apud Madigan et al, 2009).

Acidogênese: A matéria orgânica é encontrada em qualquer resíduo na forma de polímeros tais como carboidratos (celulose, hemiceluloses, amido, etc.), óleos, gorduras e proteínas. Em geral, microorganismos não são capazes de utilizar esses polímeros por causa do grande tamanho da molécula, que não pode penetrar na parede celular dos microorganismos. Portanto, bactérias acidogênicas produzem enzimas extracelulares, como celulose, xilanase, amilase, lipase, enzimas proteolíticas, etc., para hidrolisar esses polímeros. (KOTHARI et al, 2014, apud Madigan et al, 2009).

Os compostos orgânicos hidrolisados (açúcares monoméricos, amino ácidos e ácidos graxos) são utilizados pelas bactérias acidogênicas ou formadora de ácido para seu crescimento pois acumulam ácidos graxos voláteis, como ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico e um longo ácido valerídica com dióxido de carbono, água e hidrogênio, chamada acidogênese (KOTHARI et al, 2014, apud Madigan et al, 2009).

Acetogênese: Os ácidos graxos voláteis, exceto os ácidos acéticos, como o ácido propiônico, ácido butírico e ácido valérico são novamente utilizados por bactérias acetogênicas para seu crescimento e formar ácido acético e hidrogênio, chamado acetogênese. Essas bactérias crescem lentamente com duplicação hora de 1,5 a 4 dias (KOTHARI et al, 2014, apud Madigan et al, 2009).

Metanogenese: Finalmente, os metanógenos utilizam ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono e forma gás metano, chamado metanogênese. O metano é produzido por um grande número de substâncias simples: ácido acético, etanol, metanol ou dióxido de carbono e hidrogênio. Metanogênios, que utilizam ácido acético conhecido como metanogênese acetoclástica onde hidrogênio e dióxido de carbono utilizando os metanógenos são conhecidos como metanogênese hidrogenotrófica. O metanogênico também cresce lentamente, com tempo de duplicação de 2 a 4 dias (KOTHARI et al, 2014, apud Madigan et al, 2009).

A bactéria responsável pela conversão é estritamente anaeróbica, chamada metanogênica, e são identificados na literatura como "metanógenos" ou "formadores de metano". Muitos organismos metanogênicos identificados em aterros sanitários e os digestores anaeróbicos são semelhantes aos encontrados nos estômagos de animais ruminantes e sedimentos inorgânicos de lagos e rios (KOTHARI et al, 2014, apud Drake HL, Daniel SL, 2004).

As bactérias mais importantes do grupo metanogênico aqueles que utilizam hidrogênio e ácido acético. Elas têm lentas taxas de crescimento; como resultado, seu metabolismo é geralmente considerado limitante no tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos (KOTHARI et al, 2014, apud Drake HL, Daniel SL, 2004).

Com relação ao biogás gerado no processo, a sua composição média é abordada na Tabela 1. Todavia, vale ressaltar que a composição depende diretamente das características da matéria orgânica degradada (PROBIOGAS, 2015a p 15).

Tabela 1: Composição média do biogás gerado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos

COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO
CH ₄	40 – 75%
CO ₂	25 – 40%
N ₂	0,5 – 2,5%
H ₂ S	0,1 – 0,5%
O ₂	0,1 – 1%
NH ₃	0,1 – 0,5%
H ₂	1 – 3%

Fonte: Probiogas, 2015a apud (Adaptada de Salomon e Lora (2009))

3.3.1 Parâmetros de Controle da Biodigestão Anaeróbica

Para que o processo de digestão anaeróbica possa acontecer, é necessário levar em consideração alguns parâmetros de controle que são essenciais para a formação do biogás. Estes parâmetros influenciam na maior ou menor produção de biogás.

Para JHA et al, 2011 considera os parâmetros abaixo:

Temperatura: A digestão anaeróbica pode ocorrer em psicofilia temperaturas abaixo de 20°C, mas a maioria dos reatores opera em temperaturas mesofílicas ou termofílicas com ótima a 35°C e 55°C, respectivamente (Bhattacharya e Mishra, 2003; Chynoweth et al., 2000; Liu et al., 2006) porque as atividades de biomassa e tratamento anaeróbio as capacidades foram significativamente reduzidas em menores temperatura. Comparado com a digestão mesofílica, digestão termofílica é um processo mais viável para alcançar um melhor desempenho, especialmente durante o período de inicialização de um sistema de digestão anaeróbica seco (Lu et al., 2007). Durante a digestão em lote de resíduos vegetais, e lascas de madeira, a degradação mais rápida de ácidos graxos foi encontrado a 55°C do que a 38°C (Hegde e Pullammanappallil, 2007). Além disso, a biodegradabilidade e o rendimento de metano foi maior a 55°C do que 35°C (Jha et al., 2010). Bactérias termofílicas são muito sensíveis a pequenas mudanças de temperatura e, portanto, a maioria dos digestores operam em temperaturas mesofílicas.

Tipo de resíduos: É difícil fazer uma comparação direta dos rendimentos potenciais de biogás de diferentes substratos, pois os dados de desempenho para tipos específicos são frequentemente produzidos sob uma ampla variedade de condições experimentais (por exemplo, regime de mistura, temperatura, sólidos totais, sólidos voláteis e tempo de retenção) (Ward et al., 2008). Quantidade de água nos substratos é essencial para as atividades dos anaeróbios porque a atividade metanogênica diminuiria com uma diminuição do teor de umidade (Lay et al., 1997). Para equilibrar a nutrição, a relação C / N deve variar até 20 a 30: 1 na matéria-prima onde o carbono constitui a fonte de energia para os microrganismos e nitrogênio serve como um nutriente crítico para o crescimento microbiano. Se a quantidade de nitrogênio é inadequada, populações microbianas permanecerão pequenas e demorará mais para decair o carbono disponível. Excesso de nitrogênio, além da necessidade microbiana, muitas vezes é perdida no processo como gás de amônia.

Uma planta de digestão seca no Japão manteve-se em operação estável com uma mistura de lixo e sobras de hotéis, resíduos de jardim e papel usado para controlar a relação C / N, gerando biogás a uma taxa de cerca de 820 m³ por tonelada de sólidos voláteis (Naomichi e Yutaka, 2007).

Na tabela 2 abaixo mostra os principais resíduos orgânicos de diferentes atividades que podem ser usados nos biodigestores para geração do biogás.

Tabela 2: Tipos de resíduos orgânicos

TIPO DE RESÍDUO	QTDE. DE CH ₄ POR TON (Nm ³ /ton MOS)
Esterco bovino	110 - 330
Esterco suíno	180-360
Esterco de aves	200-360
Silagem de milho	234-364
Grãos de cereais	380
Silagem de gramíneas	300-338
Beterraba	332-374
Bagaço de malte	295-443
Melaço	261-355
Glicerol bruto	170-200

Resíduo verdes (jardinagem)	369
Torta de cana de açúcar	90-120
Vinhaça	15-25
Lodo de ETE	22
RSU	100

Fonte: Probiogas, 2010 p 84; Milanez, 2018 p 257; Probiogás, 2016 p 33

Tempo de retenção: É o tempo em que o material orgânico permanece no interior do biodigestor. O tempo de retenção está relacionado a fatores como a granulometria, temperatura, entre outros. Em geral recomenda-se tempos de retenção de 4 a 60 dias.

Biodigestores mesofílicos operam entre 20°C e 40°C, com o ótimo situado entre 30°C e 35°C. Embora o controle sobre os processos biológicos seja mais fácil, esse nível de temperatura requer maior tempo de permanência dos resíduos nos digestores (15-30 dias), elevando custos e o espaço necessário na planta. Biodigestores termofílicos, por sua vez, operam entre 50°C e 60°C, gerando maior quantidade de biogás (até 41% superior) e possibilitando uma permanência menor dos resíduos nos digestores (12-14 dias). A tecnologia, porém, é mais complexa e custosa, além de requerer maiores esforços de manutenção (Carvalho, et al, 2019 p 96).

pH: O pH é o mais importante e o principal parâmetro operacional dos processos de digestão anaeróbia. Variação em pH afeta a digestão anaeróbia porque a concentração dos íons de hidrogênio tem influência direta no crescimento da microbiota. O pH ideal para metanógenos varia de 6,8 a 7,6, e sua taxa de crescimento será bastante reduzida abaixo pH 6,6 (Mosey e Fernandes, 1989). Um pH inferior a 6,1 ou mais de 8,3 causará mau desempenho, até mesmo falha de um digestor (Lay et al., 1997). O pH ideal para hidrólise e acidogênese está entre 5,5 e 6,5 (Arshad et al., 2011). Durante a digestão anaeróbica seca de resíduos sólidos orgânicos, Lu et al. (2007) descobriram que o pH diminuiu dos 6,7 originais para 4,2 sob condições mesofílicas e a 5,8 sob condições termofílicas nas primeiras duas semanas devido ao pH mais baixo de alcalinidade (3000 mg / l como CaCO₃) na mistura original. Posteriormente, o pH aumentou gradualmente para 7,6 após 4 semanas no digestor de 35°C e 8,0 após 3 semanas no digestor de 55°C.

Inibidores da metanogênese, como gordura excessiva, ácidos, sulfeto de hidrogênio e amônia são tóxicos apenas em suas formas não ionizadas (Lay et al., 1997). A relativa

proporção das formas ionizadas e não ionizadas e a toxicidade depende do pH. Por exemplo, a amônia é tóxica quando o pH está acima de 7, enquanto ácidos graxos voláteis e sulfeto de hidrogênio são mais tóxicos abaixo de pH 7 (Ward et al., 2008).

Ácidos graxos voláteis (AGV): A absorção de AGVs pode desempenhar um papel crucial em toda cinética de degradação da digestão de resíduos sólidos orgânicos, como o acúmulo dos produtos intermediários, AGVs, é a etapa de limitação de taxa (Guendouz et al., 2010). Altas concentrações de AGVs no digestor reduziriam o pH, inibe a atividade metanogênica e causa possível falha no processo de digestão anaeróbia. Viéitez et al. (2000) demonstrou que as reações fermentativas pararam numa concentração de AGVs de 13 g / l acompanhada por um pH abaixo de 5. A etapa limitante na digestão anaeróbia é a hidrólise, que geralmente é inibido por um alto teor de concentrações de propionato (Juanga, 2005). A presença de ácido acético em concentrações mais altas geralmente não são tratados como inibidores, enquanto o ácido propiônico é considerado o mais ácido graxo volátil tóxico que aparece na digestão anaeróbia, e sua oxidação em ácido acético é a mais lenta entre todas transformações de ácidos orgânicos voláteis (Amani et al., 2011; Hanaki et al., 1994).

3.4 EXPECTATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RSU NO BRASIL

Em 2020, o Brasil produziu 82,5 milhões toneladas de RSU, o equivalente a 1,07 kg por habitante por dia, com o resultado de uma cobertura de coleta que atinge em média 92,2% da população (ABRELPE, 2022).

Segundo a ABREN (Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos), tecnologia ainda pouco explorada no Brasil, a geração de energia elétrica a partir do lixo tem potencial para atrair pelo menos a construção de 114 usinas em 28 regiões metropolitanas com população acima de 1 milhão de habitantes, podendo atingir uma potência instalada de 2,3 GW e performance anual na ordem de 18.864.000 MWh, é o equivalente ao abastecimento de 3.772.800 de casas populares, mas, sendo encarada sobretudo como uma solução de saneamento para as cidades.

No Brasil, apesar de algumas experiências importantes, o aproveitamento energético de biogás ainda é incipiente, comparado com o potencial existente. A termoeletrica de Caieiras, no aterro da Essensis, em São Paulo, com mais de 29 MW instalados para geração com biogás, é a maior existente no país. A planta de biodigestão de vinhaça da GeoEnergética no Paraná, com 4 MW já instalados e potencial para expansão até 16 MW, é considerada uma experiência importante no setor sucro-alcooleiro, a ser seguida em breve com a unidade na Usina Bonfim, do Grupo Raizen, em São Paulo (COELHO; et al, 2018, p 79).

Em relação ao biogás de RSU, seu aproveitamento energético pode se dar por meio de duas tecnologias: aterros sanitários, ou biodigestores especializados. No primeiro caso, o material orgânico das cidades, quando depositado no aterro em “células” fechadas onde é criado um ambiente anaeróbico, se transforma em biogás. Ele é, então, capturado por meio de uma rede de tubos coletores espalhados pelo aterro, tratado e, eventualmente, usado para gerar eletricidade, geralmente em geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos motores de combustão interna. Os biodigestores especializados, uma tecnologia ainda em desenvolvimento no país, degradam material orgânico em um ambiente controlado, gerando biogás. Ao contrário dos aterros, os biodigestores requerem uma triagem prévia do resíduo para que somente a parte orgânica seja tratada nos biodigestores (CARVALHO et al, 2019, p 19-20).

A produção nacional de biogás atual é de 1,5 bilhão de metros cúbicos ao ano, o que representa menos de 4% da produção de origem fóssil. O volume também está longe do potencial de biogás no Brasil, de 40 bilhões de metros cúbicos anuais, segundo a Abiogás.

A inclusão do biogás no plano de expansão da energia elétrica sinaliza que essa energia deverá emergir, nos próximos anos, como uma das principais formas de produção de energia renovável (MILANEZ; et al, 2018, p 252).

Ainda que os números absolutos sejam pequenos, a capacidade instalada de biogás para geração elétrica tem crescido substancialmente. Esse aumento passou de 20 MW em 2007 para 119 MW em 2016, aproveitando principalmente RSU, o que representa um crescimento de 22% a.a. Como existem diversas opções de substratos para a produção de biogás, é de se esperar que, com o aprimoramento das tecnologias específicas, o crescimento seja ainda mais relevante (MILANEZ; et al, 2018, p 252).

O Brasil possui um grande potencial de produção de biogás a partir de diversas fontes. Conforme dados apresentados pela EPE (2018), a produção média de biogás no país é de 1.345.180 Nm³/dia a partir de 125 plantas instaladas. Porém, o potencial disponível no Brasil é superior. No estado de São Paulo, por exemplo, o potencial de produção de biogás é de 6.628.584 m³/dia em aterros sanitários, 1.180.800 m³/dia a partir do tratamento de esgoto, 7.268.352 m³/ dia a partir do tratamento de vinhaça e 363.720 m³/dia a partir do tratamento de dejetos animais e de abatedouros (JOPPERT et. al., 2018). Entretanto, as dificuldades ainda existentes impedem o crescimento desta fonte de energia e a sua consolidação no país (COELHO; et al, 2018, p 80).

Atualmente de acordo com o sítio energiaebiogas, o Brasil produz 307.735,61 kW de energia elétrica a partir de 369 usinas localizadas nas regiões sudeste, sul, nordeste e centro-oeste.

O aproveitamento energético do biogás apresenta uma sinergia importante com o saneamento básico, em virtude das vantagens ambientais e energéticas, uma vez que pode ser obtido a partir do tratamento de resíduos provenientes de áreas rurais, urbanas e de agro-indústrias, auxiliando no gerenciamento desses resíduos. Além disso, a produção controlada e uso do biogás contribuem para a redução do gás metano ser liberado para a atmosfera sem qualquer controle durante o tratamento desses resíduos (COELHO; et al, 2018, p 80).

Além de ser um combustível renovável, seu uso permite a redução do consumo de combustíveis fósseis, como o gás natural e o óleo diesel, podendo ainda ser usado para geração descentralizada, o que contribui para o gerenciamento do sistema energético (COELHO; et al, 2018, p 80).

O biogás tem um papel importante a desempenhar nessa nova matriz energética sustentável. Com a utilização de efluentes em biodigestores, há uma drástica redução do carbono

presente na biomassa, pois no processo de digestão a matéria orgânica perde exclusivamente carbono na forma de metano e gás carbônico. Como já reconhecido, apesar de, atualmente, representar uma parcela muito pequena da produção de energia, o biogás tem um enorme potencial no Brasil. Segundo a Associação Brasileira de Biogás e Biometano (Abiogás), o potencial teórico total de geração brasileiro é de cerca 80 milhões de m³/dia, equivalente a 24% da demanda de energia elétrica ou 44% da demanda de óleo diesel. O maior potencial de geração está no setor sucroenergético, responsável por cerca de 70% desse total (MILANEZ; et al, 2018, p 238 apud ABIOGÁS, 2017).

3.4.1 Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com a NBR 16849/2020 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos, são considerados os RSU: “resíduos originários de atividades domésticas em residências urbanas, como varrição, limpeza de logradouros e de vias públicas, e outros serviços de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais e de prestadores de serviços”.

Os resíduos orgânicos são constituídos basicamente por restos de alimentos e/ou vegetais descartados de atividades humanas. Podem ter diversas origens, por exemplo, domiciliar ou urbana (restos de alimentos, de jardinagem, podas etc.), agrícola ou industrial (resíduos de agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos etc.) e de saneamento básico (lodo de estações de tratamento de esgoto) (BRASIL, 2022 p 36).

Em ambientes naturais, esses materiais se degradam espontaneamente e reciclam os nutrientes presentes em processos como os ciclos da água, do carbono e do nitrogênio. Entretanto, quando derivados de atividades humanas, especialmente em ambientes urbanos, podem constituir um sério problema ambiental pela rapidez e volume em que são gerados e pelos locais inadequados em que são armazenados ou dispostos (BRASIL, 2019 p 30).

No Brasil, segundo dados do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018 (BRASIL, 2019), último dado oficial disponível, estima-se que foram coletadas 62,78 milhões de toneladas por ano, isto é, 172,0 mil toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros. Desse montante, 24,4% foram despejados em locais inadequados, lixões e aterros controlados, por 3.001 municípios. Isto é, 15,05 milhões de toneladas de RSU foram destinados para lixões ou aterros controlados, que não possuem um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações, e 75,6% para aterros sanitários (BESEN et al, 2021 p 142 apud BRASIL, 2019)

A disposição de resíduos orgânicos, seja em lixões, seja em aterros controlados ou sanitários, gera chorume (líquido de cor escura e elevada carga orgânica), que pode contaminar o solo e as águas subterrâneas, emite biogás com importante conteúdo de gás metano (importante contribuinte antrópico de emissões de gases do efeito estufa), ocasiona maus odores e favorece a proliferação de vetores de doenças (BRASIL, 2019 p 31).

Diante do exposto, faz-se necessária a adoção de métodos adequados de gestão e tratamento destes grandes volumes de resíduos, para que a matéria orgânica presente seja estabilizada e possa cumprir seu papel natural de ser reincorporada aos solos de forma segura, voltando ao ciclo natural da matéria (BRASIL, 2019 p 31).

Pode-se afirmar que a origem e as características dos RSU estão condicionadas a uma série de fatores, desde condições climáticas da região, que influenciam diretamente na qualidade e a quantidade de resíduos sólidos, até a densidade populacional e suas condições sociais e econômicas. O poder aquisitivo da população, por exemplo, pode ser um dos fatores que influencia a composição gravimétrica dos RSU, bem como sua produção per capita (PROSAB, 2003 p 6).

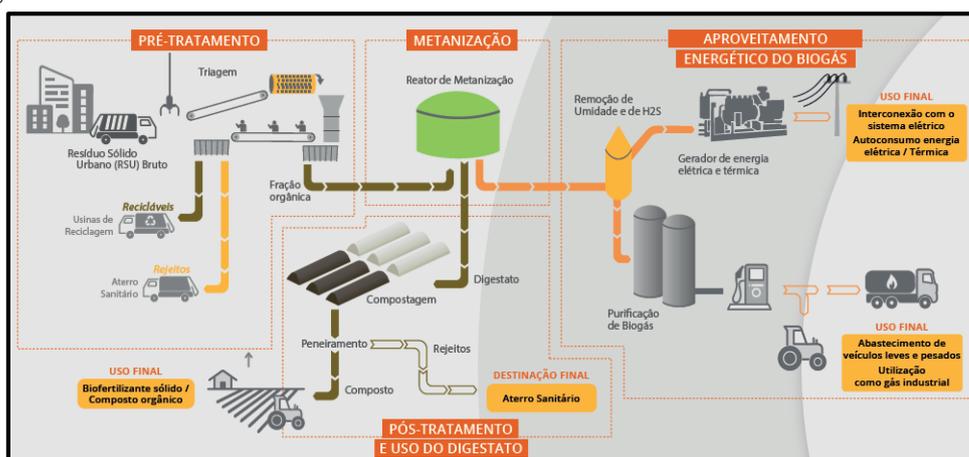
Devido ao elevado teor de umidade da fração orgânica dos RSU, em torno de 50% em peso, o aproveitamento energético deste resíduo por incineração é pouco eficiente, sendo sua biodigestão para produção de biogás mais indicada (TOLMASQUIM, 2016 p 176).

4 CADEIA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

O processo de produção e aproveitamento energético de biogás envolve, basicamente, as seguintes etapas: pré-tratamento do substrato; digestão anaeróbia no biodigestor; armazenagem, tratamento e valorização do digestato; tratamento e armazenamento do biogás; aplicação do biogás na geração de energia elétrica e/ou calor; e, produção, armazenagem e transporte de biometano. Todos esses processos podem ser observados na figura 2.

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica.

FIGURA 2: Fluxos de processos e principais subprodutos de uma Usina de Tratamento Mecânico Biológico para RSU



FONTE: https://www.gefbioogas.org.br/residuos_urbanos.html

Em uma instalação TMB, os processos de natureza manual e mecânica dizem respeito a mecanismos de separação/triagem e redução de dimensão que, dispostos de maneira sequencial, possibilitam a separação das frações orgânica e inorgânica (recicláveis, CDR e rejeitos) (PROBIOGAS, 2016 p 18).

Já os processos biológicos são aqueles destinados a tratar a fração orgânica dos resíduos, que representam, em média, aproximadamente metade de todo o RSU produzido no país. O principal componente tecnológico biológico de uma Usina TMB é, geralmente, o reator de metanização, ou reator anaeróbio, local onde ocorre a degradação da matéria orgânica em ambiente fechado, com captação do biogás gerado no processo. Outra possibilidade menos

recorrente em instalações TMB é o emprego da compostagem como principal processo biológico de tratamento da fração orgânica (PROBIOGAS, 2016 p 18).

No caso do tratamento biológico ser anaeróbio, o biogás produzido pode ser destinado à produção de energia elétrica e térmica por meio de sistemas de cogeração (conjunto motorizador), sendo parte consumida pela própria instalação (aproximadamente 50% para abastecer toda a usina (TMB) e parte destinada à comercialização (PROBIOGAS, 2016 p 18).

O lodo gerado nos reatores, também denominado de material digerido ou digestato, geralmente é direcionado a um sistema de compostagem, visando à estabilização final. Posteriormente, este pode ser submetido a um processo de peneiramento, com a finalidade de remover impróprios de dimensões reduzidas (como fragmentos de plásticos, vidro, etc.) e agregar qualidade ao material (PROBIOGAS, 2016 p 18).

Com relação ao aproveitamento energético e agrícola, a energia contida em 1m³ de biogás purificado equivale-se a 1,1L de gasolina, 1,7L de bioetanol ou 0,97m³ de gás natural (Neves et al., 2009 apud LIMA JR, 2015. p 32).

Embora versátil, o biogás contém níveis elevados de contaminantes, fazendo com que as características operacionais e econômicas do projeto sejam determinantes para a decisão sobre a melhor opção de uso e os níveis de tratamento adequados (CARVALHO, et al, 2019 p 20).

O metano purificado do biogás pode ser atualizado para gás 'natural' comprimido (Bio-CNG) ou gás 'natural' liquefeito (Bio-GNL) para combustíveis de transporte (GE et al 2016 apud, Yang et al., 2015). Cru ou purificado o biogás também pode ser transformado em combustíveis líquidos por via biológica ou métodos de conversão termoquímica (GE et al, 2016 apud, Sheets et al., 2015; Yang et al., 2015). O digestato contém grandes quantidades de nutrientes (por exemplo, nitrogênio e fosfato) e pode ser usado como fertilizante (GE et al, 2016 apud, Li et al., 2011; Yang et al., 2015).

Cabe finalmente destacar que a simples queima do biogás transforma o metano nele contido em dióxido de carbono, o que reduz seu impacto sobre o clima e diminui os riscos de explosão. Essa queima pode ser exigida por lei ou, no caso dos países em desenvolvimento, pode ser aproveitada para gerar créditos de carbono (CARVALHO, et al, 2019 p 20).

5 O DIGESTATO

O digestato é todo efluente de reator anaeróbio, obtido no processo de produção de biogás. É o material que se encontra no interior no reator anaeróbio, que já foi decomposto, que será deslocado para um tanque de descarga no momento em que o sistema for abastecido com nova carga de substrato.

Esse efluente tem grande quantidade de nutrientes e dependendo das características do solo onde será aplicado, poderá ser utilizado como fertilizante orgânico e complementar a aplicação de fertilizante químico.

Um dos maiores desafios para o desenvolvimento desta indústria é a necessidade da correta destinação do efluente dos biodigestores (digestato). Se, por um lado, existem tecnologias para tratamento do digestato, visando a remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e possibilitando o reuso da água residuária ou o seu lançamento em corpos hídricos receptores, por outro, o emprego destas tecnologias agrega custos que impactam na viabilidade econômica destes empreendimentos (KUNZ et al, 2019 p 95; Miele et al., 2015).

A reciclagem do digestato como fertilizante na agricultura afasta parte do custo agregado com a implantação e operação de sistemas de tratamento do digestato, porém aspectos relacionados à oferta de nutrientes via digestato, à demanda de nutrientes nas áreas agrícolas disponíveis para sua reciclagem e/a logística de distribuição do fertilizante devem ser considerados nos projetos destes empreendimentos visto que também agregam custos e têm limitações de ordem técnica (KUNZ et al, 2019 p 95; Miele et al., 2015; Nicoloso, 2014).

A qualidade do digestato e o seu potencial para uso agrônômico depende de diversos fatores, a saber:

- a) composição e variabilidade dos resíduos utilizados como substratos para a biodigestão (ex.: dejetos e carcaças de animais mortos, resíduos de agroindústrias, resíduos ou biomassa vegetal, entre outros);
- b) tipo de biodigestor e tecnologia de biodigestão utilizada;
- c) segregação e perdas de nutrientes nas estruturas de armazenamento dos substratos e do digestato;
- d) eficiência dos sistemas pré-tratamento do substrato (ex.: separação de fases antes do biodigestor) e/ou do tratamento do digestato; e
- e) diluição dos substratos e digestato com água (KUNZ et al, 2019 p 95).

Além das diferenças na composição química e variabilidade entre os substratos, as diferentes proporções das misturas de substratos a serem utilizadas na alimentação do

biodigestor também terão impacto preponderante na composição de nutrientes do digestato. Portanto, cada projeto deverá contar com uma análise específica para determinar a oferta e o teor de nutrientes do digestato disponível para reciclagem como fertilizante na agricultura (KUNZ et al, 2019 p 96).

A aplicação de fertilizantes ao solo, independente da fonte ter origem mineral ou orgânica, tem por objetivo suprir a demanda de nutrientes das culturas agrícolas a fim de que estas expressem o seu potencial produtivo. As plantas exploram o solo através do seu sistema radicular em busca por água e nutrientes que podem ter origem no próprio solo ou ser proveniente do fertilizante aplicado. Desta maneira, solos mais férteis demandam a aplicação de menores doses de fertilizantes do que solos que apresentam teores mais baixos de nutrientes disponíveis, visto que aqueles são capazes de suprir maiores quantidades de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Co, Ni e Zn) às plantas (KUNZ et al, 2019 p 100).

A adubação corretiva visa elevar os teores de nutrientes do solo (P e K) de modo que este seja capaz de suprir adequadamente a demanda das culturas reduzindo o consumo de fertilizantes. Quando o teor crítico de nutrientes no solo é atingido, passa-se a utilizar apenas a adubação de manutenção, com o objetivo de manter a produtividade das culturas próxima ao seu potencial produtivo e repor as perdas de nutrientes no solo. Neste sentido, a recomendação de adubação de manutenção é a dose a ser utilizada para dimensionamento da demanda de nutrientes a fim de manter os teores de nutrientes no solo estáveis e o empreendimento sustentável no longo prazo (KUNZ et al, 2019 p 108, Nicoloso e Oliveira, 2016).

A produção de biogás pode contribuir diretamente com a redução de custos da produção agrícola, reduzindo a necessidade de compra de fertilizantes químicos. Indiretamente, essa substituição (fertilizantes comerciais pelo biofertilizante) também contribui para a redução dos gases do efeito estufa, seja pela emissões evitadas durante a produção de fertilizantes, seja pelas emissões evitadas na logística para a fábrica de fertilizantes e a propriedade rural onde será aplicado.

O dimensionamento da área agrícola necessária para destinação dos efluentes de um biodigestor, é a oferta de nutrientes pelo digestato e demanda de nutrientes na área agrícola. Utilizando-se os mesmos princípios, pode-se também fazer o cálculo reverso para dimensionar a oferta de substrato e tamanho do biodigestor em função da área agrícola disponível para a reciclagem do digestato. Esta análise é válida tanto para pequenos biodigestores operando em propriedades rurais ou para uma usina de biogás de grande escala. No entanto, é importante

destacar que este dimensionamento deve ser realizado considerando ambos os fatores (demanda e oferta de nutrientes) no longo prazo (KUNZ et al, 2019 p 108).

A aplicação excessiva de fertilizantes, independente da origem mineral ou orgânica, pode causar impactos ambientais significativos, especialmente devido ao aumento das perdas de nutrientes do solo e sua transferência para o ambiente (Aita et al., 2014; Escosteguy et al., 2016; Soares et al., 2014). Neste sentido, inúmeras iniciativas de pesquisa vêm procurando estabelecer indicadores e limites críticos ambientais (LCAs) de disponibilidade de nutrientes no solo a fim de minorar os riscos de poluição ambiental. Os LCAs podem ser considerados valores indicadores de qualidade do solo que impõem limites à aplicação de fertilizantes ao solo. Desta maneira, os LCAs podem ser utilizados pelos órgãos reguladores e fiscalizadores a fim de estabelecerem doses máximas aceitáveis ou mesmo proibir a aplicação de qualquer fonte de nutrientes ao solo, incluindo o digestato, resíduos agroindustriais ou fertilizantes minerais (KUNZ et al, 2019 p 110).

Entretanto, segundo Ferreira (2000), os resíduos domiciliares contêm alguns compostos que, mesmo em pequenas concentrações, podem conferir certa periculosidade a estes resíduos, tais como pilhas, baterias, óleo de motor, tintas, pesticidas, embalagens de inseticidas, solventes, produtos de limpeza, lâmpadas, termômetros, medicamentos e cosméticos. A presença destes materiais não tende a dificultar o tratamento da fração orgânica via metanização, entretanto, prejudica a qualidade final do composto orgânico, ou bio sólido, obtido ao final do processo, bem como seu uso posterior para fins agrícolas. Este tema possui relevância uma vez que a destinação dos materiais finais impacta diretamente na viabilidade técnica e econômica de plantas de metanização, em particular àquelas localizadas nas adjacências de áreas urbanas. Este tema deve ser trabalhado na busca por melhorar a segregação de componentes indesejáveis e a qualidade do composto final (PROBIOGAS, 2015a p 79).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram feitas pesquisas bibliográficas em livros, artigos, realização de coleta de dados em sítios da rede global de informação especializada e do poder público sobre o tema.

Com base nas informações coletadas foram mensurados: a quantidade (ton) de resíduos sólidos urbanos descartados anualmente das três cidades; a capacidade de geração de biogás (m^3/h) dos RSU; a capacidade de geração de energia elétrica (MWh) da planta biodigestor; o custo de implantação de uma planta biodigestor de referência, o tempo de retorno do investimento (payback) e as possíveis dificuldades para o projeto.

Para o cálculo da estimativa da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados por ano para as três cidades, foi levado em consideração uma média simples entre os três principais sítios da internet do governo federal entre o período 2017 – 2019 os valores encontrados estão na tabela 3.

Os cálculos estimativos foram feitos com base na quantidade máxima e mínima de resíduo sólido urbano gerado pelas três cidades.

Para a quantidade máxima consideramos a informação do sítio da EPE e para a quantidade mínima consideramos a informação do sítio do SNIS.

Para o cálculo da estimativa da quantidade de biogás gerado por dia, foi levado em consideração somente a quantidade de resíduo orgânico gerado, que por referência bibliográfica o teor é de 0,50

$M = \text{Quantidade de RSU coletada} \times \text{teor de residuo orgânico (equação 1)}$

Dividimos os valores encontrados por 3 para a quantidade anual de RSO conforme a equação 2.

$$A_{qEPE} = M_{EPE} \div 3 \text{ (equação 2)}$$

$$A_{qSNIS} = M_{SNIS} \div 3 \text{ (equação 2)}$$

Dividimos os valores encontrados por 365 para saber a quantidade diária máxima e mínima de resíduo orgânico conforme a equação 3.

$$D_{qEPE} = A_{qEPE} \div 365 \text{ (equação 3)}$$

$$D_{qSNIS} = A_{qSNIS} \div 365 \text{ (equação 3)}$$

Considerando um potencial de geração de biogás de aproximadamente $100 \text{ Nm}^3/t$ de matéria original (material orgânico original) (PROBIOGAS, 2016, p 33), conseguimos converter a tonelada de RSO por quantidade de volume de biogás gerado em metros cúbicos, conforme a equação 4.

1 ton de RSO = 100m³ biogás (equação 4)

Para o cálculo da quantidade de gás gerado por hora, dividimos por 24 conforme a equação 5. Devido os parâmetros de processo sofrer variações, foi considerado a concentração do biogás em 55% de gás metano por referência bibliográfica e calculado conforme a equação 6.

Quantidade de gás gerado por dia ÷ 24 horas (equação 5)

Quantidade de biogás gerado por hora × 0,55CH₄ (equação 6)

Considerando o poder calorífico do biogás, de 9,97 kwh/m³ (PROBIOGAS, 2016 p 33) conforme a equação 7

1m³ = 9,97KWh (equação 7)

Para a estimativa da geração de energia elétrica, foi considerado o rendimento mínimo de 34% e a máximo de 45% do conjunto motor-gerador para geração de energia elétrica, com base em referência bibliográfica, conforme as equações 8 e 9.

R = energia elétrica produzida × 0,34 (equação 8)

R = energia elétrica produzida × 0,45 (equação 9)

Sabemos que em torno de 50% desta energia produzida será consumida pela própria unidade para movimentar e operar suas máquinas e equipamentos, os outros 50% poderá ser vendido como excedente para a concessionária de energia elétrica local, consideramos como energia elétrica disponível para venda, conforme a equação 10.

EE_{disp} = energia elétrica produzida × 0,5 (equação 10)

Considerando que uma residência popular no Brasil consome em torno de 5KW de energia elétrica por dia, conseguimos estimar a quantidade de casas que serão atendidas pelo fornecimento de energia elétrica da usina biodigestor conforme a equação 11.

5KW/dia = 1casa popular (equação 11)

A tabela 4 mostra os todos resultados obtidos a partir da quantidade de RSU dos sítios EPE (máximo) e do sítio SNIS (mínimo).

Para o cálculo da receita bruta anual, foi levado em consideração a energia elétrica disponível para venda, multiplicado por 24 horas, multiplicado por 365 dias, multiplicado pelo coeficiente de preço da energia comprada pela ANEEL, conforme a equação 12

R_b = EE_{disp} × 24horas × 365dias × R\$639,00 (equação 12)

Para o investimento de uma planta biodigestor, foi levado em consideração a referência bibliográfica informativa que atendem as principais características de operação de um

biodigestor e a quantidade de RSU consumida pela planta. Através do investimento de uma planta biodigestor dividido pela receita bruta anual, foi possível calcular o tempo de retorno do investimento (payback) de acordo com a equação 13 abaixo.

$$I = R_b \times P_b \text{ (equação 13)}$$

Após o levantamento de todas as informações poderemos concluir se será viável ou não, a instalação da planta biodigestora, informando os principais desafios para a implantação na região.

Maiores detalhes dos a respeito dos cálculos estimados estão disponíveis nos tópicos a frente.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos através dos cálculos estimativos. Primeiramente fizemos o cálculo da quantidade (ton) de RSU descartados pelas cidades no período pré definido. A partir da quantidade de RSU pudemos estimar a quantidade (m³) biogás gerado.

Para o cálculo do tempo de retorno do investimento (*payback*), primeiro tivemos que calcular a receita bruta anual, feito através da venda de energia elétrica para a ANEEL, depois foi levado em consideração o valor de investimento de uma usina biodigestor com base em referência bibliográfica e que pudesse atender quantidade mínima de RSU descartado pelas cidades, com base nestas duas informações conseguimos estimar qual foi o *payback* do empreendimento.

7.1 QUANTIDADE DE RSU DESCARTADOS PELAS CIDADES BM, RES, VR

De acordo com a tabela 3 abaixo, foram encontrados quantidade de RSU descartada para cada cidade, repare que os valores informados pelos órgãos públicos SINIR e SNIS são praticamente idênticos. Usaremos a quantidade informada pelo sítio da EPE para o máximo e do SNIS para o mínimo.

Tabela 3: Tabela comparativa da quantidade de RSU entre os órgãos públicos

QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (ton)			
	ÓRGÃOS PÚBLICOS		
CIDADES	EPE	SINIR	SNIS
Barra Mansa	388.214	141.945	141.945
Resende	136.599	104.098	104.097,3
Volta Redonda	568.091	211.196	211.194,9
TOTAL ANUAL	364.301,333	152.413	152.412,4
TOTAL (2017-19)	1.092.904	457.239	457.237,2

É necessário separar a fração orgânica dos demais resíduos que não entrarão no sistema de biodigestor. Iremos considerar que 50% do total de RSU das cidades são orgânicos, esta porcentagem foi considerada através do Programa Nacional do Lixão Zero estabelecido pelo governo federal conforme a referência BRASIL, 2019.

Multiplicando os valores máximos e mínimos por 0,50 conforme a equação 1, a quantidade de resíduos sólidos orgânicos do período de 2017-2019 é:

Considerando:

M_{EPE} – Quantidade máxima de RSO

M_{SNIS} – Quantidade mínima de RSO

$$M_{EPE} = 1.092.904 \times 0,50$$

$$M_{EPE} = 546.452,00 \text{ ton}$$

$$M_{SNIS} = 457.237,2 \times 0,50$$

$$M_{SNIS} = 228.618,6 \text{ ton}$$

Dividindo os valores acima por 3 conforme a equação 2, encontraremos a quantidade anual de RSO.

Considerando:

A_{qEPE} = Quantidade máxima anual RSO

A_{qSNIS} = Quantidade mínima anual de RSO

$$A_{qEPE} = 546.452,00 \div 3$$

$$A_{qEPE} = 182.150,67 \text{ ton /ano}$$

$$A_{qSNIS} = 228.618,6 \div 3$$

$$A_{qSNIS} = 76.206,1 \text{ ton /ano}$$

Dividindo o valor acima por 365 conforme a equação 3, encontraremos a quantidade diária máxima e mínima de resíduo orgânico.

Considerando:

D_{qEPE} = Quantidade máxima diária de RSO

D_{qSNIS} = Quantidade mínima diária de RSO

$$D_{qEPE} = 182.150,67 \div 365$$

$$D_{qEPE} \cong 499,043 \text{ ton /dia}$$

$$D_{qSNIS} = 76.206,1 \div 365$$

$$D_{qSNIS} \cong 208,784 \text{ ton /dia}$$

7.2 QUANTIDADE ESTIMADA DE BIOGÁS

O rendimento potencial de metano é determinado principalmente pela composição do substrato utilizado, ou seja, pelos seus teores de gorduras, proteínas e carboidratos. Esses três grupos apresentam diferentes rendimentos específicos de metano, sendo o das gorduras elevado, o das proteínas médio e o dos carboidratos baixo. Em termos de massa, as gorduras permitem maior rendimento de metano que os carboidratos (PROBIOGAS, 2010 p 29).

Considerando-se um potencial de geração de biogás de aproximadamente 100 Nm³/t de matéria original (material orgânico original) (PROBIOGAS, 2016, p 33).

Com base nisso, podemos afirmar que, na prática, os rendimentos de metano obtidos são significativamente maiores que os calculados. Segundo o atual nível de conhecimento, não existe método que, do ponto de vista estatístico, seja suficientemente confiável a ponto de permitir o cálculo exato do rendimento de gás. No entanto, o rendimento de biogás que se pode atingir depende de outros fatores como o tempo de retenção dos substratos no biodigestor, o teor de matéria seca, a concentração de ácidos graxos e eventuais substâncias inibidoras (PROBIOGAS, 2010 p 28).

De todos os componentes, o de maior importância é o metano, pois ele representa a parte combustível do biogás e, portanto, seu teor influencia diretamente o poder calorífico inferior. O controle de processo seletivo dá pouca margem para a alteração da composição do biogás, que depende principalmente da composição do material introduzido. Além disso, o teor de metano é influenciado por parâmetros do processo tais como a temperatura de fermentação, nível de carga do reator e tempo de retenção hidráulica, bem como pela biodessulfurização e por distúrbios no processo. (PROBIOGAS, 2010 p 29). Fazendo a conversão conforme a equação 4, encontraremos a quantidade máxima e mínima de geração de gás por dia.

$$499,043\text{ton} = 49.904,3m_{\text{máx}}^3/\text{dia}$$

$$208,784\text{ton} = 20.878,4m_{\text{mín}}^3/\text{dia}$$

Dividimos o valor acima por 24 conforme a equação 5, para encontrar a quantidade máxima e mínima de gás gerado por hora.

Considerando:

Q_{EPE} = Quantidade máxima de biogás por hora

Q_{SNIS} = Quantidade mínima de biogás por hora

$$Q_{EPE} = 49.904,3 \div 24$$

$$Q_{EPE} \cong 2.079,346m^3/h$$

$$Q_{SNIS} = 20.878,4 \div 24$$

$$Q_{SNIS} \cong 869,93m^3/h$$

Devido os parâmetros de processo sofrer variações, já citados no texto acima, iremos considerar o valor conservador para a concentração do biogás em 55% de gás metano (PROBIOGAS, 2016, p 33) conforme a equação 6, teremos a quantidade máxima e mínima de gás metano por hora.

Considerando:

Q_{EPECH_4} = Quantidade máxima de biogás CH_4

Q_{SNISCH_4} = Quantidade mínima de biogás CH_4

$$Q_{EPECH_4} = 2.079,346 \times 0,55CH_4$$

$$Q_{EPECH_4} = 1.143,640m^3/h CH_4$$

$$Q_{SNISCH_4} = 869,93 \times 0,55CH_4$$

$$Q_{SNISCH_4} = 478,461m^3/h CH_4$$

7.3 QUANTIDADE ESTIMADA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O aproveitamento do biogás pode ser feito de várias formas. Usualmente, nos países desenvolvidos, onde essa prática é muito utilizada, gera-se energia elétrica com motores de combustão interna (ciclo Otto) ou turbinas a vapor (SILVA et al, 2009).

Para a utilização do biogás para geração de energia elétrica, geralmente se utilizam motores à combustão com gerador de eletricidade que, devido à produção de calor, podem ser utilizados como CHP, com motores do tipo Otto/Gasolina (a gás) e diesel (bicombustíveis) (PROBIOGAS, 2015b p 70).

Os motores a gás têm sido mais procurados atualmente devido às menores emissões de gases NO_x , que, nesses motores, representam cerca de 20% das emissões dos motores

bicombustíveis, além da redução na emissão de partículas de fuligem. Ambos os tipos de motores devem ser adequados pra suportar a variação na qualidade do biogás e as cargas de impureza, sendo que, no caso dos motores a gás, muitas vezes faz-se necessário um pré-tratamento do biogás (PROBIOGAS, 2015b p 70).

O grau de eficiência elétrica está entre 34 e 45% nos motores a gás, enquanto, para os motores bicombustíveis, a faixa de variação é de 30 a 45% (PROBIOGAS, 2015b p 72).

A quantidade de energia elétrica gerada irá depender da tecnologia empregada no processo de conversão, no qual, terá a variação da eficiência desta conversão entre 30% a 45%.

Considerando o poder calorífico do biogás, de 9,97 kwh/m³ (PROBIOGAS, 2016 p 33) conforme a equação 7, teremos a geração de energia elétrica máxima e mínima.

$$1.143,640m^3 \cong 11.402,091 KWh$$

$$478,461m^3 \cong 4.770,256 KWh$$

Considerando o rendimento mínima de 34% e a máxima de 45% do conjunto motor-gerador para geração de energia elétrica, conforme a equação 8 e 9, teremos como valores estimados a quantidade de energia elétrica entre:

Considerando:

R = Rendimento

R_{EPE} = Rendimento EPE

R_{SNIS} = Rendimento SNIS

Para rendimento mínimo teremos:

$$R_{EPE} = 11.402,091 \times 0,34$$

$$R_{EPE} = 3.876,711 KWh$$

$$R_{SNIS} = 4.770,256 \times 0,34$$

$$R_{SNIS} = 1.621,887 KWh$$

Para rendimento máximo teremos:

$$R_{EPE} = 11.402,091 \times 0,45$$

$$R_{EPE} = 5.130,941 KWh$$

$$R_{SNIS} = 4.770,256 \times 0,45$$

$$R_{SNIS} = 2.146,615 KWh$$

Considerando o rendimento conservador do grupo motor gerador de 34%, a quantidade de energia elétrica gerada é entre 1,621 MWh, a 3,876 MWh.

Considerando o rendimento máximo do grupo motor gerador de 45%, a quantidade de energia elétrica gerada é entre 2,146MWh, a 5,130 MWh.

Sabemos que em torno de 50% desta energia produzida será consumida pela própria unidade para movimentar e operar suas máquinas e equipamentos, os outros 50% poderá ser vendido como excedente para a concessionária de energia elétrica local. De acordo com a equação 10, temos:

EE_{disp} = Energia elétrica disponível para venda

$$EE_{dispSNIS} = 1,621 \times 0,5$$

$$EE_{dispSINIR} = 0,810\text{MWh}$$

$$EE_{dispEPE} = 3,876 \times 0,5$$

$$EE_{dispEPE} = 1,938\text{MWh}$$

$$EE_{dispSNIS} = 2,146 \times 0,5$$

$$EE_{dispSNIS} = 1,073\text{MWh}$$

$$EE_{dispEPE} = 5,130 \times 0,5$$

$$EE_{dispEPE} = 2,565\text{MWh}$$

Considerando que uma residência popular no Brasil consome em torno de 5KW de energia elétrica por dia, e, de acordo com a equação 11 temos:

Para rendimento de 34%, temos:

$$810\text{KW} \times 24\text{h}/5\text{KW} = 3.888 \text{ casas populares}$$

$$1.938\text{KW} \times 24\text{h}/5\text{KW} = 9.302 \text{ casas populares}$$

Para rendimento de 45%, temos

$$1.073\text{KW} \times 24\text{h}/5\text{KW} = 5.150 \text{ casas populares}$$

$$2.565\text{KW} \times 24\text{h}/5\text{KW} = 12.312 \text{ casas populares}$$

De acordo com o cálculo acima podemos concluir que a venda excedente de energia elétrica poderá abastecer entre 3.888 a 12.312 casas populares por dia.

7.4 TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

De acordo com PROBIOGÁS, 2016 p 26, foi feita uma estimativa de valores R\$ para uma planta biodigestora com tratamento manual, mecânico e biológico (TMB), no qual considerou uma população estimada de 135.000 habitantes, representada por um consórcio de municípios, totalizando 50.000 toneladas de RSU por ano, ou o equivalente a 135 t de RSU/dia, há ainda a expectativa da participação de outros municípios da região, o projeto previu um da capacidade de tratamento para 150.000 t/a de RSU. O investimento para a fase E com o nível máximo de tratamento das frações do RSU, é de R\$ 49.869.000,00, incluindo todos os seus componentes tecnológicos.

As fases de implantação consideradas no estudo do autor foram:

- » Fase A – Unidade de triagem de recicláveis;
- » Fase B – Unidade de triagem de recicláveis + CDR;
- » Fase C – Unidade de triagem de recicláveis + CDR + compostagem para tratamento da fração orgânica;
- » Fase D – Unidade de triagem de recicláveis + CDR + metanização para tratamento da fração orgânica + compostagem direta do lodo digerido;
- » Fase E – Unidade de triagem de recicláveis + CDR + metanização para tratamento da fração orgânica + separação de fases do lodo digerido + pós-tratamento diferenciado das fases sólida e líquida.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL a notícia publicada no próprio sítio, no dia 30/09/2021, a valor pago pela oferta de energia elétrica através de resíduos sólidos urbanos será de R\$ 639,00/MWh para contratos de 20 anos. Com base neste valor será possível estimar o tempo de retorno do investimento ou Payback.

Iremos apenas considerar o tempo de retorno de investimento, das informações coletadas do sítio SNIS do governo federal, pois a quantidade de RSU informado neste sítio é o mais próximo da planta biodigestora de referência. A quantidade de RSU do sítio da EPE é o dobro da planta de referência e, portanto, o valor do investimento proporcionalmente deverá ser maior.

Considerando a equação 12 temos:

R_b – Receita bruta anual

Para o rendimento de 34%, temos:

$$R_b = 0,810 \times 24h \times 365dias \times R\$639,00$$

$$R_b = R\$4.534.088,4$$

Para o rendimento de 45%, temos:

$$R_b = 1,073 \times 24h \times 365dias \times R\$639,00$$

$$R_b = R\$6.006.267,72$$

Calculando o tempo de retorno do investimento de acordo com a equação 13, temos:

I – Valor do Investimento em R\$

Rb – Receita bruta anual

Pb – Payback

Para o rendimento de 34%, temos:

$$P_b = \frac{49.869.000,00}{4.534.088,4}$$

$$P_b \cong 11 \text{ anos}$$

Para o rendimento de 45%, temos:

$$P_b = \frac{49.869.000,00}{6.006.267,72}$$

$$P_b \cong 8,30 \text{ anos}$$

7.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A tabela 4 abaixo mostra os resultados obtidos a partir da quantidade de RSU dos sítios EPE (máximo) e do sítio SNIS (mínimo).

Tabela 4: Tabela comparativa dos cálculos entre os órgãos públicos

	EPE		SNIS	
Geração de RSU no período 2017-2019 (ton)	1.092.904		457.237,2	
Geração de RSU anual (ton)	364.301,33		152.412,4	
FORSU (ton)	182.301,33		76.206,2	
Qtde. de RSO/dia (ton)	499,043		208,784	
Qtde. de biogás/dia (m ³ /dia)	49.904,3		20.878,4.	
Qtde. de biogás/hora (m ³ /hora)	2.079,346		869,930	
Qtde. de CH ₄ /hora (m ³ /hora)	1.143,640		478,461	
Qtde. de energia elétrica gerada (KWh)	11.402,091		4.770,256	
Rendimento do GMG (KWh)	MÁX = 045	MÍN = 0,34	MÁX = 045	MÍN = 0,34
	5.130,941	3.876,711	2.146,615	1.621,887
Energia elétrica disponível pra venda (KWh)	2.565	1.938	1.073	810
Qtde. de casas populares atendidas (UN)	12.312	9.302	5.150	3.888
Tempo de Retorno do Investimento (Payback) (anos)	-----	-----	8,3	11

Levando em consideração a planta operar de forma ideal 24h/365dias e ininterrupta com o valor ofertado de R\$639,00, e, o rendimento do grupo motor-gerador variar entre 34% a 45% o tempo de retorno do investimento será entre 11 a 8,3 anos, estamos desconsiderando a diferença de tempo e inflação entre a planta biodigestora de referência com a deste estudo, a depreciação da planta, impostos, encargos, inflação ao longo do contrato, manutenção do empreendimento, salários com a mão de obra, o valor pago pela venda da energia elétrica ao longo do tempo, etc, nos quais poderão influenciar e alterar o período, mas, ainda sim é um prazo bastante atraente para os investidores, se considerarmos um contrato de longo prazo de 30anos.

É importante ressaltar que os resultados aqui obtidos, foram feitos com base numa visão mais conservadora tanto na quantidade dos resíduos gerados pelas cidades, como também, no processo de geração do gás metano e no rendimento operacional do grupo motor-gerador.

Existem também outras formas da planta biodigestora aumentar a renda além da venda com energia elétrica e dos recicláveis, pode-se fazer contratos com as prefeituras para ser a responsável para a coleta de todos os resíduos sólidos em geral. Próximo a estas cidades, existem outras cidades como Itatiaia (32.312 hab.), Bananal/SP (11.039 hab.), Porto Real (20.254 hab) e Quatis (14.562 hab.) que poderiam se juntar de forma a contribuir num conglomerado para que a planta biodigestora possa receber também os resíduos sólidos urbanos destas cidades.

Podemos levar em consideração, que a planta biodigestora poderá tratar também o lodo das estações de tratamento de esgoto destas cidades, aumentando a quantidade de substrato para a geração de gás metano. O esgoto doméstico também é um sério problema, sendo que a maioria das cidades brasileiras o esgoto é lançado in natura para os rios.

Outro ponto a ser considerado, a pecuária leiteira é significativa para região, sendo uma outra fonte de substrato o destino das fezes dos ruminantes para a planta biodigestora. Em contrapartida a planta biodigestora poderá vender o digestato (biofertilizante) para agricultores da região ou até mesmo para outras localidades do país, gerando mais renda.

Assim como, as indústrias da região poderiam fazer parcerias dos resíduos orgânicos das sobras de restaurantes, destinação do lodo das ETE's desde que não tenha elementos químicos perigosos e, empresas prestadoras de serviços de limpeza de fossas sépticas e caixas de gorduras, todos destinando para a planta biodigestor, aumentando ainda mais a renda da planta.

Pode-se trabalhar no processo de purificação do digestato para retirar e vender macronutrientes como o fósforo e nitrogênio, venda do biogás para redes distribuidoras de gás natural e além da geração de receitas com o créditos no mercado de carbono.

É claro que todo este aumento de entrada de RSU, influenciará o investimento para o tratamento, e portanto, estes cálculos realizados nesta dissertação servem de um direcionamento para um estudo mais aprofundado para a viabilidade ou não do empreendimento.

Além dos benefícios econômicos e ambientais, outros benefícios são considerados com a implantação de uma planta biodigestor, como melhoria da qualidade do serviço prestado que é a coleta dos resíduos domésticos na fonte geradora; descentralização do poder público na

prestação do serviço de coleta de resíduo sólido urbano; geração de emprego renda; melhoria na imagem do poder público para a sociedade.

Um dos maiores desafios para o desenvolvimento desta indústria é a necessidade da correta destinação do efluente dos biodigestores (digestato). A reciclagem do digestato como fertilizante na agricultura afasta parte do custo agregado com a implantação e operação de sistemas de tratamento do digestato, porém, a destinação do digestato em centros urbanos torna-se complexo devido a ausência de áreas próximas agriculturáveis, e por isso, é necessário levar em consideração como será o tempo de armazenamento do digestato na usina biodigestor e a logística no transporte.

Oportunidades da destinação do digestato nos centros urbanos, seria com as prefeituras, para que fossem usados nas praças e jardins das cidades, fazer parcerias com mercados atacadistas e estabelecimentos comerciais para serem vendidos para sociedade e fazer parcerias com os fornecedores de alimentos para as cidades.

8 CONCLUSÃO

A quantidade de resíduos sólidos urbanos descartados anualmente para as três cidades foram sítio EPE = 364.301,33 ton, sítio SNIS 152.412,4 ton e sítio SINIR 152.413 ton.

A capacidade de geração de biogás CH₄ através dos RSU coletados das cidades foi de sítio EPE 1.143,640 m³/h e sítio SNIS 478,461 m³/h.

A quantidade de energia elétrica gerada variou entre sítio EPE 1,938 MWh a 2,565 MWh e sítio SNIS 0,810 MWh a 1,073 MWh.

Levando em consideração apenas as informações do sítio SNIS, o tempo de retorno de investimento payback será entre 11 a 8,3 anos.

Através dos cálculos realizados os resultados apresentados a princípio, se mostraram favoráveis para a implantação do empreendimento.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vimos que há possíveis dificuldades encontradas para a implantação do projeto, são adequações das legislações por parte do poder público para autorizar o uso desta tecnologia, viabilizar a entrada do poder privado através de incentivos fiscais e garantias operacionais para a coleta e transporte do RSU e venda do gás gerado, melhorar a infraestrutura como estradas de acesso ao empreendimento, as vias de circulação nas cidades para a logística de coleta e destinação, máquinas e equipamentos em geral de toda a cadeia para a produção do biogás, melhorar a capacitação técnica dos profissionais através das escolas técnicas, fazer campanhas de conscientização ambiental para as cidades explicando a importância da coleta seletiva de forma correta e eficaz e também mostrar a importância do empreendimento para a região.

O aproveitamento energético do resíduo urbano deve ser considerado levando em conta as boas práticas ambientais, sociais e econômicas para fins de tratamento adequado dos resíduos urbanos gerados pela nossa sociedade, melhorando significativamente a qualidade de vida e preservando o meio ambiente.

É necessário fazer estudos de análise de viabilidade econômica no médio e longo prazo a fim de encontrar com mais riqueza de informações acerca do retorno financeiro.

Faz-se necessário fazer estudos mais aprofundados acerca da qualidade do biofertilizante, a fim de verificar a viabilidade de instalação de equipamentos para o beneficiamento de macronutrientes e posterior venda.

É necessário maior entrosamento entre as diferentes esferas governamentais, maior aproximação entre os setores acadêmico e privado, maior conscientização da população e melhor caracterização do resíduo gerado em cada localidade do país. Quanto melhor a infraestrutura existente, mais fácil será aproveitar o gás (CARVALHO et al, 2019 p 22).

A localização do empreendimento é muito importante, pois dela dependerão os trajetos que os caminhões de lixo irão fazer após as coletas nos bairros das cidades, com isso, uma malha viária nas cidades e rodovias com boa infraestrutura de trânsito, é necessário a fim de evitar transtornos e acidentes.

Outro fator a levar em consideração, a planta biodigestor poderá emitir odores desagradáveis durante a operação, logo, deverá ficar afastada das cidades, instalação de tecnologias para controle de emissões atmosféricas se fazem necessários, principalmente para a retirada e queima do gás sulfídrico, pois em contato com peças metálicas corroem danificando-os, é um gás altamente tóxico para o homem.

Os investimentos para a planta biodigestora são elevados, com isso se faz necessário que o poder público (federal, estadual) e as prefeituras locais facilitem a instalação e implantação do empreendimento através de incentivos fiscais, garantias jurídicas e políticas de longo prazo.

Deve-se fazer parcerias para a capacitação e treinamento da mão de obra através das escolas técnicas (federal e estadual) para formar profissionais mais qualificados por se tratar de uma tecnologia nova no país.

As secretarias ambientais municipais em parceria com o empreendimento devem realizar diversas campanhas educacionais e de conscientização ambiental através de folders explicativos para as cidades sobre a importância da correta destinação dos resíduos orgânicos e a não contaminação dos mesmos por outros tipos de resíduos, facilitando e otimizando o processo de triagem na planta.

Conforme a Lei nº 14.026/2020 do novo marco legal do saneamento no art. 54 parágrafo 2º estabelece o prazo limite de 08/2022 para municípios com população superior a 100 mil habitantes, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos e que disponham de mecanismos de cobrança que garantam sua sustentabilidade econômico-financeira.

Alcançar todo o potencial de produção e uso de biogás no país exige apoio de agências federais, maior investimento, ampliação de mercado nacional e maior pesquisa e desenvolvimento. Os benefícios tanto da produção do biogás quanto de seu aproveitamento energético são claros. O objetivo é reduzir as barreiras e promover oportunidades, principalmente financeiras, para alavancar o desenvolvimento sustentável deste combustível no Brasil.

As três cidades destinam seus resíduos sólidos urbanos em aterros controlados ou aterros sanitários, o que do ponto de vista legal estes estabelecimentos não atendem de forma plena a disposição adequada dos resíduos urbanos, porém, a falta de rigor na fiscalização por parte dos órgãos ambientais federais e estaduais dificulta a instalação deste empreendimento apenas pela iniciativa privada, faz-se necessário uma vontade política e de conscientização por parte do poder público.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL, Z. F.; PIROZZI, D.; AUSIELLO A.; FLORIO C.; TURCO, M.; ZUCCARO, G.; MICOLI, L.; TOSCANO, G.; 2015, Biogas production from solid state anaerobic digestion for municipal solid waste, *Chemical Engineering Transactions*, 43, 2407-2412 DOI: 10.3303/CET1543402
- ARELLI, V.; BEGUM, S.; ANUPOJU, G. R.; KURUTI, K.; SHAILAJA, S. Dry anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pre treatment on methane yield and quality of biomanure. *Bioresource Technology* 253 (2018) 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.050>
- BESSEN, G.; JACOBI, P. R.; SILVA, C. L. 10 anos da Política de Resíduos Sólidos: caminhos e agendas para um futuro sustentável [Recurso eletrônico]. São Paulo: IEE-USP: OPNRS, 2021. 238 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana: Programa Nacional Lixão Zero [recurso eletrônico] / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental, Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos, Coordenação-Geral de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. – Brasília, DF: MMA, 2019. 72 p
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022. 209 p.
- CARVALHO, R. Q.; TAVARES, A. N.; SANTOS, G. V.; BAJAY, S. V. Oportunidades Enterradas. Geração Elétrica a Partir do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos. 1ª edição, EDUFES. Vitória, 2019. p 302. Modo de acesso:
http://repositorio.ufes.br/handle/10/774/browse?type=title&sort_by=1&order=ASC&rpp=20&etal=-1&null=&starts_with=O
- COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; JUNIOR, A. D. N. F.; SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo: IEE-USP, 2018. 218 p.
- GARCIA JUNIOR, L. C., PIRES, M. V., & DA CUNHA, D. A. Biodigestores para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela bovinocultura na região sudeste, Brasil. *Revista De Economia E Agronegócio*, 2016. 14(1,2,3). <https://doi.org/10.25070/rea.v14i1,2,3.355>
- GE, X.; XU, F.; LI, Y. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. X. Ge et al. / *Bioresource Technology* 205 (2016) 239–249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.050>

JHA, A. K.; LI, J.; NIES, L.; ZHANG, L. Research advances in dry anaerobic digestion process of solid organic wastes. *African Journal of Biotechnology* Vol. 10(65), pp. 14242-14253, 24 October, 2011. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJB>. doi: 10.5897/AJB11.1277

KOTHARI, R.; PANDEY A. K.; KUMAR, S.; TYAGI, V. V.; TYAGI, S. K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. R. Kothari et al./ *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014) 174–195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato - Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.

LIMA JR, R. G. S. Estratégias de Compostagem como Pré-Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos. Rio de Janeiro. 2015. 225 f. Tese Doutorado Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro 2015.

MILANEZ, A. Y.; et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018.

NASIR, I. M.; GHAZI, T. I. M.; OMAR, R. Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review. *Appl Microbiol Biotechnol* (2012) 95:321–329. DOI 10.1007/s00253-012-4152-7

NBR 16849/2020 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos.

PROBIOGÁS. Guia Prático do Biogás. Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás – Ministério das Cidades. Publicado pela Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), com o apoio do Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, em virtude de uma decisão do Parlamento Federal Alemão. 5ª edição, totalmente revista e atualizada, Gülzow, 2010. p 236.

PROBIOGÁS. O estado da arte da tecnologia de metanização seca / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor, Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015a. 97 p.

PROBIOGÁS. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Oliver Jende [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015b. p 86.

PROBIOGÁS. Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; autores, Luis Felipe de D. B. Colturato [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2016. 124 p.

RIBEIRO, S. D. Determinação das dimensões de um biodigestor em função da proporção gás/fase líquida. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal. HOLOS, vol. 1, 2011, pp. 49-56

SILVA, C.L.; RABELO, J.M.; RAMAZZOTTE, V.; ROSSI, L.F.; BOLLAMAN, H. A. (2009). A cadeia de biogás e a sustentabilidade local: uma análise socioeconômica ambiental da energia de resíduos sólidos urbanos do aterro da Caximba em Curitiba. Innovar, 19(34), 83-98.

TOLMASQUIM, M. T. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016. p 452.

PROSAB. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás / Sérgio Túlio Cassini (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003. p 210.

<https://abren.org.br/2021/05/13/brasil-pode-ter-23-gw-e-solucao-de-saneamento-com-usinas-wte->

[canalenergia/#:~:text=Tecnologia%20ainda%20pouco%20explorada%20no,anual%20na%20ordem%20de%2018.864. \(acessado em 08/06/2021\)](#)

<https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2021/01/27/projetos-se-multiplicam-e-biogas-avanca-no-brasil.ghtml> (acessado em 08/06/2021)

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/volta-redonda/panoramal> (acessado em 08/09/2021)

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/barra-mansa/panorama> (acessado em 08/09/2021)

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/resende/panorama> (acessado em 08/09/2021)

<https://antigo.mdr.gov.br/saneamento/probiogas/publicacoes/publicacoes-do-probiogas> (acessado em 12/10/2021)

<https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/->

[/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/leilao-de-energia-nova-a-5-e-aprovado-pela-aneel-e-sera-realizado-em-30-](#)

[9/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-](#)

[exibicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_XGPXSqdMFHrE%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-](#)

[2%26p_p_col_count%3D3](#) (acessado em 12/10/2021)

EPE, NOTA TÉCNICA PR 04/18. Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2018 p 184. Modo de acesso:
<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050> (acessado em 13/10/2021)

EPE, NOTA TÉCNICA DEA 18/14. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2014 p 50. Modo de acesso:
<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf> (acessado em 13/10/2021)

<https://energiaebiogas.com.br/biogas-no-brasil> (acessado em 15/03/2022)

https://www.gefbiogas.org.br/residuos_urbanos.html (acessado em 07/06/2022)

<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaazoniodesertificacao/MinutaProgramaMetanoZero.pdf> (acessado em 07/06/2022)

<https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-71-de-21-de-marco-de-2022-387378473> (acessado em 07/06/2022)

<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.936-de-12-de-janeiro-de-2022-373573578> (acessado em 07/06/2022)

<https://abrelpe.org.br/panorama/> (acessado em 07/06/2022)

<https://sinir.gov.br/relatorios/municipal/> (acessado em 13/06/22)

<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#> (acessado em 13/06/22)

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sienergia> (acessado em 13/06/22)

<https://www.bgsequipamentos.com.br/historia-do-biogas/> (acessado em 13/06/22)