

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

MAYESK ALVES ROCHA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS  
ORGÂNICOS DE UM RESTAURANTE POPULAR**

São Cristóvão (SE)

2022

MAYESK ALVES ROCHA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESÍDUOS ORGÂNICOS DE UM RESTAURANTE POPULAR**

Dissertação apresentado ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Química,  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Martins de Oliveira Júnior

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Karla de Souza Abud

São Cristóvão (SE)

2022

CXXX Rocha, Mayesk Alves.

Avaliação do potencial de geração de biogás a partir de resíduos orgânicos de um restaurante popular / Mayesk Alves Rocha; orientadores Antonio Martins de Oliveira Júnior, Ana Karla de Souza Abud. – São Cristóvão, 2022.

74 p.: il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Biodigestor. 2. Inóculo. 3. Resíduos orgânicos. I. Oliveira Júnior, Antonio Martins (orient.). II. Abud, Ana Karla de Souza (orient.). III. Universidade Federal de Sergipe. IV. Título.

CDU: XXX.XXX.XXX

MAYESK ALVES ROCHA

AValiação DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS  
ORGÂNICOS DE UM RESTAURANTE POPULAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da  
Universidade Federal de Sergipe em 10 de fevereiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antônio Martins de Oliveira Júnior – Orientador  
Universidade Federal de Sergipe – UFS



Prof. Dra. Araci Karla de Souza Abad – Coorientadora  
Universidade Federal de Sergipe – UFS



Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza – Membro Interno  
Universidade Federal de Sergipe – UFS



Prof. Dr. Carlos Eduardo de Farias Silva – Membro Externo  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

## RESUMO

A urgência de inovação no âmbito energético, aliada à preocupação ambiental e à alta geração de resíduos no cenário mundial, impulsiona cada vez mais o uso de técnicas de digestão anaeróbia como tecnologia próspera para tratamento de tais passivos ambientais e produção de biogás. Desta forma, a utilização de um biodigestor para produção de biogás é uma das possíveis maneiras de aproveitar o potencial energético renovável disponível no meio ambiente. Diante disso, a pesquisa teve o objetivo de avaliar o potencial de produção de biogás na operação de biodigestor de bancada em batelada, a partir dos resíduos oriundos de restaurante popular localizado no bairro de Rosa Elze, na cidade de São Cristóvão, utilizando como inóculo esterco de caprinos, em concentração (0, 1, 2 e 3%). Os biodigestores utilizados no estudo foram desenvolvidos a partir a reutilização de garrafas de polietileno tereftalato (PET) e operados por 21 dias à temperatura de 25 °C. Foi possível verificar a evolução da geração diária de biogás por meio da decomposição anaeróbia de matéria orgânica e, também, acompanhar a temperatura e o pH das amostras, além de realizar as análises de nitrogênio, fósforo, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e sólidos totais, voláteis e fixos. De acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa, a melhor condição para a produção do biogás se deu na concentração de 3% de inóculo, com pH de 7,12, ou seja, com ajuste de pH, obtendo-se uma produção de 18 mL de biogás. Em relação aos sólidos voláteis e fixos, atingiu-se concentrações de 25,9% e 1,3%, respectivamente. Quanto às análises de DQO, nitrogênio e fósforo, obteve-se uma redução de 44%, 72,2% e 84%, nesta ordem. No potencial de geração de energia, o presente trabalho obteve uma geração de 321 kWh/ mês e, utilizando os cálculos tarifários apresentados no portal da empresa de energia atuante no Estado de Sergipe, a ENERGISA, foi possível adquirir como valor cobrado para o grupo que o restaurante está incluído, um valor de R\$ 0,49 por kWh consumido na tarifa verde, indicando um ganho de R\$ 157,97/mês com o biogás produzido pelos resíduos alimentares do restaurante popular. Os resultados evidenciam o uso promissor dos resíduos orgânicos do restaurante como fonte para formação de biogás e geração de energia. Indicaram, também, a digestão anaeróbia como processo sustentável e o biodigestor de bancada uma ótima opção para produção do gás, sendo eficiente e de baixo custo.

**Palavras-chaves:** Biodigestor; inóculo; resíduos orgânicos.

## ABSTRACT

The urgency of innovation in the energy field, combined with environmental concerns and the high generation of waste on the world stage, increasingly encourages the use of anaerobic digestion techniques as a prosperous technology for the treatment of such environmental liabilities and biogas production. In this way, the use of a digester to produce biogas is one of the possible ways to take advantage of the renewable energy potential available in the environment. Therefore, the research aimed to evaluate the potential of biogas production in the operation of a batch bench biodigester, from waste produced in a popular restaurant located in the neighborhood of Rosa Elze, in the city of São Cristóvão, using goat manure as inoculum, in concentrations (0, 1, 2 and 3%). The biodigesters used in the study were developed from the reuse of polyethylene terephthalate (PET) bottles and operated for 21 days at a temperature of 25 °C. It was possible to verify the evolution of the daily generation of biogas through the anaerobic decomposition of organic matter and, also, to monitor the temperature and pH of the samples, in addition to performing the analyzes of nitrogen, phosphorus, Chemical Oxygen Demand (COD) and total, volatile and fixed solids. According to the results found in this research, the best condition for the production of biogas was at a concentration of 3% of inoculum, with a pH of 7.12, that is, with pH adjustment, obtaining a production of 18 mL of biogas. In relation to volatile and fixed solids, concentrations of 25.9% and 1.3% were reached, respectively. As for the COD, nitrogen and phosphorus analyses, there was a reduction of 44%, 72.2% and 84%, in that order. In terms of energy generation potential, the present work obtained a generation of 321 kWh/month and, using the tariff calculations presented on the portal of the energy company operating in the State of Sergipe, ENERGISA, it was possible to acquire as a value charged to the group that the restaurant is included, a value of R\$ 0.49 per kWh consumed in the green tariff, indicating a gain of R\$ 157.97/month with the biogas produced by food waste from the popular restaurant. The results show the promising use of organic waste from the restaurant as a source for biogas formation and energy generation. They also indicated anaerobic digestion as a sustainable process and the benchtop biodigester a great option for gas production, being efficient and low cost.

**Keywords:** Biodigesters; inoculum; organic waste.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equivalência de 1 Nm <sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis .....	22
Tabela 2 - Comparação de tecnologia disponível para conversão de energia .....	25
Tabela 3 - Cardápio do restaurante popular nos 10 dias de coleta .....	33
Tabela 4 - Parâmetros referentes à caracterização química das amostras .....	37
Tabela 5 - Massa dos resíduos alimentares gerado pelo restaurante popular .....	44
Tabela 6 – Comparativo da geral total de resíduos orgânicos em restaurantes. ....	46
Tabela 7 – Acompanhamento pH ao longo do experimento .....	49
Tabela 8 – Análises de sólidos totais, voláteis e fixos dos resíduos coletados no restaurante popular .....	53
Tabela 9 – Composição de sólidos voláteis em resíduos alimentares .....	53
Tabela 10 – DQO presente no resíduo alimentar na entrada e saída do biorreator .....	54
Tabela 11 - Concentração de N e P presente no resíduo alimentar na entrada e saída do biorreator .....	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de Produção Mais Limpa .....	13
Figura 2 - Disposição do lixo no Estado de Sergipe .....	15
Figura 3 - Modelo em batelada de biodigestor .....	27
Figura 4 - Modelo indiano de biodigestor .....	27
Figura 5 - Modelo chinês de biodigestor .....	28
Figura 6 - Modelo canadense de biodigestor .....	28
Figura 7 – Testes de biodigestão em escala de bancada utilizando a seringa como medidor ..	35
Figura 8 - Triagem para retiradas de ossos, espinhas, palitos de dente e guardanapo .....	36
Figura 9 – Caracterização gravimétrica e quantidade de cada grupo gerado pelo restaurante	45
Figura 10 - Variação de temperatura em diferentes concentrações de inóculo .....	47
Figura 11 - Volume de gás produzido em diferentes concentrações de inóculo .....	51

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
	2.1. Meio Ambiente e Produção Mais Limpa .....	12
	2.2. Descarte dos Resíduos .....	13
	2.3. Uso do Biogás e Impactos Ambientais e Sanitários Causados pelo Descarte Inadequados dos Resíduos Orgânicos .....	16
	2.4. Biogás .....	18
	2.4.1. Processo de Obtenção .....	19
	2.4.2. Fatores que Influenciam sua Formação .....	20
	2.4.3. Características .....	21
	2.4.4. Viabilidade da Produção .....	22
	2.4.5. Conversão do Biogás em Energia Elétrica .....	23
	2.5. Biodigestores .....	25
	2.6. Parâmetros operacionais .....	29
	2.7. Implantação de Plantas Piloto para o Tratamento de Resíduos Orgânicos .....	31
3	METODOLOGIA .....	32
	3.1. Matéria-prima e inóculo .....	32
	3.2. Testes de biodigestão em escala de bancada .....	34
	3.3. Métodos Analíticos .....	37
	3.3.1. Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	37
	3.3.2. Sólidos Totais, Voláteis e Fixos .....	38
	3.3.3. Demanda Química de Oxigênio (DQO) .....	39
	3.3.4. Nitrogênio Total .....	40

3.3.5	Fósforo Total.....	41
3.4	Potencial de Geração de Energia .....	42
4	RESULTADOS .....	44
4.1	Inventário dos Resíduos Orgânicos Gerados .....	44
4.2	Temperatura .....	46
4.3	pH.....	48
4.4	Produção de Biogás.....	49
4.5	Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos .....	52
4.6	DQO .....	54
4.7	Nitrogênio e Fósforo .....	55
4.8	Potencial de Geração de Energia .....	57
5	CONCLUSÕES .....	59
	REFERÊNCIAS .....	61

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo tem-se utilizado energias não renováveis, tais como carvão mineral, petróleo e gás natural como única fonte para atender as necessidades energéticas do mundo. Diante da grande preocupação com o efeito estufa, no qual esses recursos têm uma grande contribuição, houve a necessidade de encontrar novas fontes, além de estratégias mais renováveis e menos poluidoras para suprir a demanda da população (FERNANDES, 2019).

Uma alternativa que apresenta um caminho promissor como fonte de energia renovável é a criação de tecnologias e de procedimentos de fácil aplicação, com custos reduzidos, no que tange à obtenção de energia através do aproveitamento de materiais e à utilização de uma produção mais limpa.

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP - *United Nations Environmental Program*), a produção mais limpa diz respeito ao aproveitamento contínuo de uma estratégia ambiental preventiva e integrada, de forma a ser aplicada em processos, produtos e serviços. Junto a isto, engloba-se o uso mais eficiente dos recursos naturais, minimizando a geração de resíduos e a poluição e, por conseguinte, os riscos à saúde humana e ao meio ambiente (UNEP, 1988).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, em seu Artigo 3º, aponta que a destinação final dos resíduos, adequada ao meio ambiente, é aquela que integra a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético. Também aborda a classificação e a distribuição de forma adequada dos rejeitos em aterros sanitários, tornando indispensável a observação de normas operacionais específicas, de modo a se evitar danos e/ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais adversos.

Os aterros sanitários são avaliados como uma modalidade adequada de disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo suas medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde regulamentada por leis e normas operacionais (BATTISTI, 2017).

Sua operacionalização se dá pela compactação dos resíduos sólidos, através de uma cobertura diária de camada de terra para permeabilizar o solo, utilizando dispositivos que visam a drenagem dos percolados e dos gases gerados, com a finalidade de impedir a sua exposição ao ar livre e, também, a não contaminar o solo (BATTISTI, 2017).

O tratamento através da digestão anaeróbia é um procedimento biológico de materiais orgânicos degradados por meio de microrganismos, sem a presença de oxigênio, resultando em um produto final, o biogás (SOARES *et al.*, 2019).

No Brasil, o uso de fontes renováveis de energia é beneficiado pela variedade de opções disponíveis no meio ambiente, bem como pela abundância de rejeitos orgânicos de atividades em sociedade. Desta forma, a utilização de biodigestor para produção de biogás é uma das possíveis maneiras de aproveitar o potencial energético renovável disponível no meio ambiente, sendo dependente da característica do rejeito utilizado e da maneira do processo de biodigestão (MACHADO, 2019).

Os biodigestores são equipamentos que consistem em uma câmara fechada onde os resíduos são fermentados através do processo anaeróbio, acelerando o processo de decomposição das matérias orgânicas (IENGEP, 2012).

Segundo Oliveira (2019), o biogás é um gás inflamável, formado a partir de uma mistura gasosa de diversas substâncias, tendo como principal componente o gás metano ( $\text{CH}_4$ ). É, também, composto por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), amônio ( $\text{NH}_4$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e aminas voláteis.

A composição do biogás possui, tipicamente, 40 a 70% de  $\text{CH}_4$ , 30 a 45% de  $\text{CO}_2$ , 0 a 1% de  $\text{H}_2$ , 0 a 1% de  $\text{N}_2$ , 0 a 3% de  $\text{H}_2\text{S}$  e 0 a 10% de vapor de água. Estes percentuais são variáveis a depender do tipo de resíduo, tratamento e eficiência do processo (MITTAL; AHLGREN; SHUKLA, 2018).

Tendo em vista a importância de uma produção mais limpa e o aproveitamento integral dos resíduos, este trabalho teve como objetivo principal avaliar o potencial de geração de energia a partir da utilização de biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos de restaurante popular localizado no bairro de Rosa Elze, localizado no município de São Cristóvão, no Estado de Sergipe.

Teve-se como objetivos específicos, o processo de formação do biogás, a construção de um biodigestor em batelada, e a estimativa do potencial de geração de energia.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Meio Ambiente e Produção Mais Limpa

O conceito de Produção Mais Limpa (PML), desenvolvido Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP - *United Nations Environmental Program*) no ano de 1988, envolve o aproveitamento contínuo de uma estratégia ambiental, preventiva e integrada, de forma a ser aplicada em processos, produtos e serviços. Como engloba o uso mais eficiente dos recursos naturais, minimiza a geração de resíduos e poluição, bem como os riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Para os processos, a PML abrange a transformação de matérias-primas e energia, eliminando o uso de materiais tóxicos e reduzindo a quantidade de toxicidade das emissões e resíduos (UNEP, 1988).

A PML, segundo o Centro Nacional de Tecnologias Limpas (CNTL), estabelece como estratégia o aumento da eficiência na utilização dos materiais e insumos utilizados no processo produtivo, a partir da reciclagem, minimização e, se possível, não geração dos resíduos e efluentes, podendo proporcionar vários benefícios às organizações, sociedade e meio ambiente (CNTL, 2003).

Alves e Oliveira (2007), utilizando os conceitos desenvolvidos pela UNEP, descreveram que as técnicas empregadas na PML consistem em eliminar ou minimizar ao máximo qualquer desperdício no processo, visto que o desperdício é tudo aquilo que não agrega valor para o produto ou o serviço.

Desta forma, a PML tem como princípio enxergar o sistema produtivo no campo ambiental e se apoia tanto em mudanças tecnológicas quanto na forma de gerenciamento, ou seja, visualiza as atividades, diagnostica-as, efetua análises e indaga sempre as causas e os efeitos das ações (FONSECA; MARTINS, 2018).

A Gestão Ambiental, em consonância com a PML, torna-se uma ferramenta de grande importância, possibilitando o funcionamento de organizações no âmbito social e ambiental responsável, influenciando as áreas econômicas e tecnológicas (SILVA FILHO *et. al.*, 2007).

Conforme o CNTL (2003), as ações da PML são divididas em dois conjuntos, sendo o primeiro vinculado às ações aplicadas dentro da organização, ou seja, à minimização de resíduos e emissões (Figura 1). Estas ações são subdivididas em dois níveis, onde o primeiro trata de evitar a geração de resíduos na fonte, seja através da modificação no produto ou no

processo, podendo serem realizadas boas práticas de produção mais limpa na substituição da matéria-prima utilizada ou na modificação dos seus recursos tecnológicos. O segundo nível trata da reciclagem interna, ou seja, da reutilização dos resíduos dentro da organização.

Figura 1 - Níveis de Produção Mais Limpa



Fonte: CNTL/SENAI (2003)

O segundo conjunto de ações da PML é o reuso de resíduos, efluentes e emissões, vinculado às ações aplicadas fora da organização. Este conjunto, representado pelo nível 3 na Figura 1, tem como finalidade a reciclagem externa, sendo repassada para outra empresa através de venda ou doação quando o resíduo não tem mais utilização na organização, ou por ciclos biogênicos, quando há a necessidade de finalizar o resíduo através de destino seguro, com o intuito de não agredir o meio ambiente (CNTL, 2003).

## 2.2. Descarte dos Resíduos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, em seu Artigo 3º, aponta que a destinação final adequada ao meio ambiente para os resíduos é aquela que integra a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético. Também aborda a classificação e a distribuição de forma adequada dos rejeitos em

aterros sanitários, fazendo-se indispensável a observação de normas operacionais específicas de modo a se evitarem danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais adversos.

Os aterros sanitários são avaliados como uma modalidade adequada de disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo suas medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde regulamentada por leis e normas operacionais (BATTISTI, 2017). A obrigatoriedade para o funcionamento dos aterros se dá por um sistema de impermeabilização na base e nas laterais, coleta e tratamento do lixiviado e dos gases, bem como sistema de drenagem superficial e de monitoramento (BRASIL, 2010). Sua operacionalização se dá pela compactação dos resíduos sólidos através de uma cobertura diária de camada de terra para permeabilizar o solo, utilizando dispositivos que visem a drenagem dos percolados e dos gases gerados, com a finalidade de impedir a sua exposição ao ar livre e, também, a não contaminação do solo (BATTISTI, 2017).

A promulgação da PNRS obrigou todos os municípios do país a tratarem os resíduos de forma mais criteriosa e responsável. Com isso, as administrações públicas municipais e estaduais têm como desafio de erradicar os lixões ou vazadouros a céu aberto, além realizar compostagem para o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos (ZONER; BONGIOVANNI, 2012).

Conforme dados divulgados pelo Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em parceria com órgãos estaduais e municipais, o Brasil, no ano de 2018, gerou em torno de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Dessa quantia, 92% (72,7 milhões) foram coletados, enquanto outros 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidos (ABRELPE, 2019).

Dos 72,7 milhões de toneladas coletados no Brasil no ano de 2018, 59,5% tiveram a disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários. Porém, unidades inadequadas, como lixões e aterros controlados, ainda têm uma participação muito presente no âmbito da destinação final dos resíduos, totalizando 23% e 17,5%, respectivamente (ABRELPE, 2019).

Os dados do IBGE (2008) e da ABRELPE (2019) apontam para um aumento da destinação final dos resíduos sólidos para aterros sanitários, em comparação aos anos de 1989 a 2018. No ano 1989, apenas 1,1% dos resíduos eram destinados ao aterro, enquanto em 2000 esse índice subiu para 17,3%. Em 2008 foi ampliado para 27,7% e, no ano de 2018, chegou a

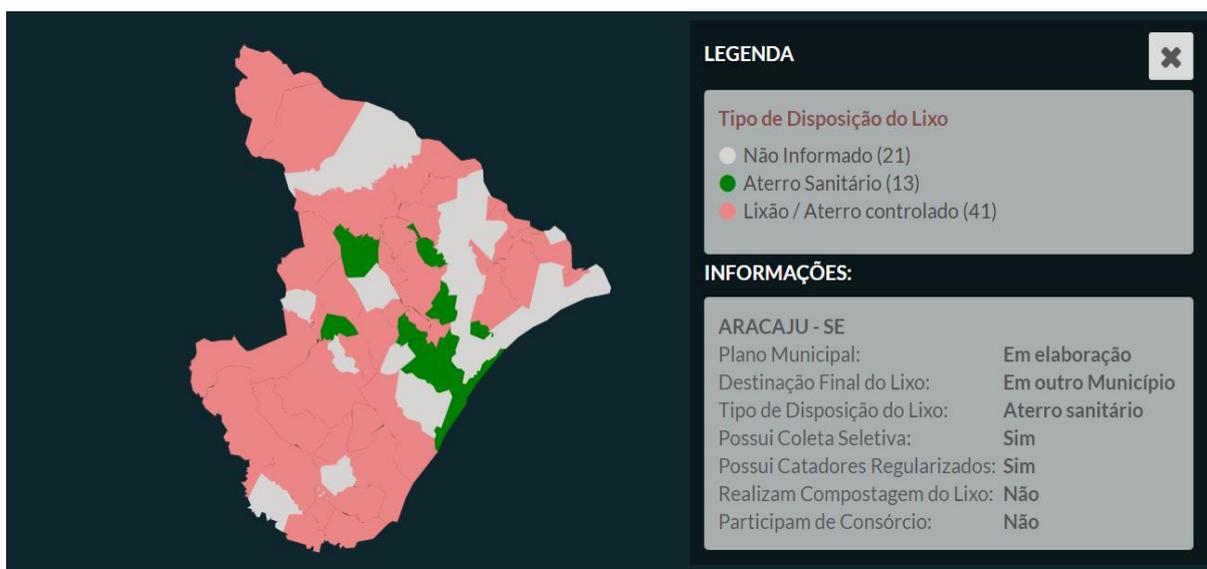
59,5%. Em contrapartida, os lixões tiveram um processo oposto, ocorrendo um decréscimo. Em 1989 era responsável por 88,2% da destinação final, em 2000 passou para 72,3%, chegou a 50,8% em 2008 e, na última divulgação (relatório 2018/2019), apenas 17,5% dos resíduos tinham sido destinados a lixões.

No cenário regional, o Nordeste do país teve uma produção de 53.975 toneladas de resíduos sólidos no ano de 2018. O índice de cobertura da coleta foi em torno de 81,31%, equivalendo à coleta de 43.763 toneladas e, segundo a ABRELPE (2019), ao menos 6 em cada 10 toneladas foram para aterros controlados e lixões. Estes dados indicam que mais de 28 mil toneladas por dia foram depositados em locais que poderiam levar à poluição ambiental, causando danos à saúde da população (ABRELPE, 2019).

Um fator importante a ser observado com relação aos aterros sanitários está no fato de ele enterrar os rejeitos separado dos lenções freáticos, não entrando em contato com o ar. No entanto, a utilização desse tratamento traz como consequência potenciais riscos, como a geração de gases contendo metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), a geração do chorume e a lixívia (FERREIRA, 2018).

A Confederação Nacional dos Municípios (2021), no Estado de Sergipe, aponta que 13 municípios destinam seus resíduos sólidos para aterro sanitário, 41 municípios destinam seus resíduos para lixões ou para aterro controlado e 21 municípios não informaram a suas destinações (Figura 2).

Figura 2 - Disposição do lixo no Estado de Sergipe



Fonte: CNM (2021)

Segundo o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Sergipe (CREA-SE), o município de Aracaju, desde do ano de 2013, encerrou as atividades do lixão da cidade, localizado no bairro Santa Maria, passando a enviar os seus resíduos sólidos para o aterro sanitário da cidade, no município de Rosário do Catete (CREA-SE, 2018). Ao mesmo tempo, a Ordem de Advogados Brasileiros do Estado de Sergipe (OAB/SE) calcula que 24% dos municípios sergipanos já estão dando uma destinação correta para os resíduos produzidos (OAB/SE, 2018).

Para Robéria Silva, presidente da Comissão de Direito Urbanístico e Ambiental da OAB/SE, os principais problemas para uma destinação correta dos resíduos são a coleta seletiva, a ausência de aterros sanitários adequados e a falha nas políticas voltadas para a educação ambiental (OAB/SE, 2018).

### **2.3. Uso do Biogás e Impactos Ambientais e Sanitários Causados pelo Descarte Inadequados dos Resíduos Orgânicos**

O biogás, como um gás renovável, possui potencial para substituir combustíveis fósseis, a exemplo do gás natural. Por ser uma alternativa energética de baixo impacto e possibilitar a implementação de modelos de negócios inovadores e com potência retorno financeiro, acredita-se que essa fonte de energia fará parte cada vez mais do agronegócio brasileiro e mundial, fortalecendo as práticas sustentáveis com a geração de energia limpa (GIACOBBO; FROTA, 2021).

Destaca-se, ainda, que o biogás tem “pegada negativa de carbono”, pois não apenas é de baixa emissão quanto também mitiga a poluição que seria causada, em caso de não aproveitamento, pelos próprios resíduos que constituem suas fontes de matéria-prima. Desta forma, o metano que iria para a natureza, poluindo o solo e a atmosfera, é transformado em fonte de energia (BNDES, 2018).

Recentemente, o governo federal lançou um programa intitulado RenovaBio, visando, dentre outros fatores, atender os compromissos assumidos voluntariamente no Acordo de Paris. O programa tem a função de promover a expansão dos biocombustíveis na matriz energética de transportes do país, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis, assegurando de forma sustentável o mercado de biocombustíveis e reduzindo a

emissão de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e o uso de biocombustíveis (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

A Resolução CNPE nº 8/2020 estabeleceu como interesse da Política Energética Nacional que as metas individuais dos distribuidores de combustíveis fossem reduzidas na mesma proporção dos créditos de descarbonização retirados de circulação do mercado por outros agentes não obrigados. Com isso, o RenovaBio permite que o biometano, obtido a partir da purificação do biogás, seja comercializado por meio de crédito de descarbonização (CBIO), o que equivale a 1 tonelada de emissão evitada de gás carbônico equivalente. Dessa forma, o biometano, eventualmente comercializado na forma de CBIO, além de aumentar a viabilidade econômico-financeira de uma planta de biogás, pode ser um substituto direto para os combustíveis fósseis, cujos preços estão cada vez mais caros no mercado nacional (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Ainda na ótica do RenovaBio, o governo federal inaugurou, no ano de 2020, uma das maiores plantas de biogás do mundo para a geração de energia elétrica sustentável, no Estado de São Paulo. Essa planta de biogás, instalada na usina Bonfim (Guariba/SP), permitirá abastecer em torno de 62 mil domicílios ou, aproximadamente, 150 mil habitantes (MINISTÉRIO DA CASA CIVIL, 2020).

Além desses benefícios ambientais do biogás, outro melhoramento foi a utilização do digestato na produção de biofertilizante. Os biofertilizantes apresentam benefícios socioeconômicos e ecológicos para o agricultor, com a melhoria da fertilidade do solo e, por conseguinte, da produção agrícola. Auxiliam, também, a redução da dependência de insumos externos à propriedade e colaboram com a redução da emissão de poluentes no meio ambiente ocasionada pela deposição dos dejetos alimentares, reduzindo o consumo de fertilizantes de origem mineral e gases inerentes da exploração dos minérios (SILVA; ALVES, 2019).

O desperdício de alimentos é responsável por 4,4 Gt CO<sub>2</sub>eq de emissão de gases no efeito estufa, caracterizando em torno de 8% de todas as emissões antrópicas. Essas emissões ocorrem durante toda a cadeia produtiva, que engloba a emissão em virtude da mudança no uso da terra e do desmatamento, a combustão de combustíveis fósseis para produção de alimentos, a produção e aplicação de fertilizantes minerais, o aquecimento de edifícios agrícolas e estufas, o processamento de alimentos, a refrigeração e transporte de alimentos e a decomposição de alimentos em lixões abertos ou em aterros sanitários (GIACOBBO; FROTA, 2021).

Beloni *et al.* (2020) acrescentam que o mau manejo de resíduos orgânicos se torna uma grande fonte de contaminação dos ecossistemas associados, visto que a decomposição da matéria orgânica produz um lixiviado (chorume). O chorume, ao entrar em contato com os corpos d'água, provoca a eutrofização, a proliferação de algas, a redução do oxigênio dissolvido e, por consequência, a mortalidade de diversas espécies de peixes, uma vez que é rico em nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (MOURA, 2017).

Por isso, medidas são necessárias para a redução de despejos dos materiais orgânicos em lugares inapropriados e, também, o emprego desses resíduos como fonte de energia para a produção de biogás e de biofertilizantes, conforme estipulado pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planeres). Isto pode ser alcançado a partir de políticas das três esferas do governo (federal, estadual e municipal), além de outras medidas com a participação da sociedade e do setor privado (MOURA, 2017).

#### **2.4. Biogás**

Segundo Oliveira (2019), o biogás é oriundo da decomposição de matéria orgânica por microrganismos, sem a presença de oxigênio, em um processo conhecido por decomposição anaeróbia. Tipicamente composto por 40 a 70% de CH<sub>4</sub>, 30 a 45% de CO<sub>2</sub>, 0 a 1% de H<sub>2</sub>, 0 a 1% de N<sub>2</sub>, 0 a 3% de H<sub>2</sub>S e 0 a 10% de vapor de água, a composição do biogás é influenciada pelo tipo de resíduo, tratamento e eficiência do processo (MITTAL *et al.*, 2018).

Um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume. A decomposição da matéria orgânica ocorre por meio de dois processos: (1) durante a deposição de resíduos no solo, tem-se o início da decomposição aeróbia; e (2) com a cobertura dos resíduos, ocorre a redução de oxigênio (O<sub>2</sub>) no ambiente, dando início à decomposição anaeróbia (FIGUEIREDO, 2011).

A taxa de geração do biogás a partir da decomposição de resíduos é variável com o tempo. Em condições normais, Borba (2006) cita que a taxa de decomposição atinge um pico entre o primeiro e o segundo ano, reduzindo continuamente por alguns anos.

#### 2.4.1. Processo de Obtenção

A conversão da matéria orgânica para a produção do biogás é formada por meio de cinco fases, começando pela hidrólise, seguida por etapas de acidogênese, acetogênese, metanogênese e, por fim, maturação. Cada fase gera um produto distinto, servindo de substrato para outras fases, formando o biogás e o biofertilizante (YENIGUIN; DEMIREL, 2013).

A primeira fase do processo, a hidrólise, é dividida em duas etapas, sendo a primeira caracterizada pela quebra de partículas de carboidratos, proteínas e lipídeos da matéria orgânica e a segunda pela transformação do material, por meio de enzimas extracelulares expelidas pelas bactérias, em monossacarídeos, aminoácidos e ácidos de cadeia longa. As principais bactérias responsáveis nesse processo são de gêneros *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus* (NELSON; COX, 2018).

Na segunda fase do processo, a acidogênese, os materiais produzidos na fase de hidrólise são absorvidos pelas bactérias fermentativas acidogênicas, permitindo a formação de ácidos graxos voláteis, ácido lático e compostos inorgânicos (OLIVEIRA, 2019).

A fase da acetogênese utiliza a mistura de dióxido de carbono e hidrogênio como fonte de carbono para a síntese celular. Substratos orgânicos, como o metanol e ácido fórmico, também são usados como fonte de carbono para a produção do material final, o acetato (SANTOS *et al.*, 2018).

Na metanogênese, os microrganismos estritamente anaeróbios convertem o ácido acético e o hidrogênio em metano e dióxido de carbono, sendo fundamental para um bom processo que todo o oxigênio tenha sido consumido em etapas anteriores para que este não iniba a formação de metano. As bactérias *Methanosarcina* spp. e *Methanosaeta* spp. são os principais gêneros responsáveis por essa fase (ASSUNÇÃO, 2020).

Depois da degradação de grande parte da matéria orgânica e da conversão do CH<sub>4</sub> e do CO<sub>2</sub>, ocorre o início da maturação, última fase do processo. A umidade continua atuando nas últimas massas de resíduo, favorecendo um decréscimo da geração de biogás, visto que a maior parte dos nutrientes foram consumidas nas fases anteriores (RODRIGUES, 2018).

#### 2.4.2. Fatores que Influenciam sua Formação

Para Figueiredo (2011), os principais fatores que influenciam uma maior geração de biogás em aterro sanitário são: Composição do resíduo, Umidade, pH, Temperatura, Teor de sólidos.

Composição do resíduo – quanto maior a porcentagem de matéria orgânica, maior o potencial para a produção de biogás. Salienta-se o fato de o resíduo de origem alimentar ter uma decomposição rápida, o que acelera a taxa de produção do biogás, enquanto materiais como madeira, plástico e vidro possuem uma decomposição mais lenta e, por conseguinte, não contribuem significativamente na geração do gás;

Umidade – quanto maior o teor de umidade, maior a taxa de produção do biogás. As condições de umidade dependem de fatores como o percentual de infiltração da superfície e do solo, a quantidade de chuva e a produção de água durante o processo da decomposição;

pH – o pH é um dos fatores que interferem na estabilidade da digestão anaeróbia. Quando não controlado, pode exercer ação inibidora sobre os microrganismos, ao passo que, dentro da faixa ótima de pH, a produção do metano é maximizada. Quando o pH se encontra abaixo de 6 ou acima de 8, a produção de metano fica estritamente limitada;

Temperatura - A Temperatura é considerada um dos fatores físicos mais importantes na digestão anaeróbia, justamente por estar relacionada ao crescimento biológico (GRANDO *et al.*, 2016). Logo a temperatura deve ser controlada durante todo o processo, no qual, as alterações de forma inesperada podem causar desequilíbrio nos microrganismos presentes, afetando de modo mais acentuada as bactérias *Methanosarcina* spp. e *Methanosaeta* spp, que tem como grande encargo, a formação do metano.

Para a formação do biogás a faixa ideal para a temperatura está entre 30 a 35°C, pois é nessa faixa que ocorre as melhores condições de crescimento das bactérias mesofílicas. A temperatura influencia na velocidade do metabolismo das bactérias, como por exemplo, na faixa de 20 a 25°C ocorre apenas a metade da utilização de substrato em comparação a temperatura de 35°C. (PAZ; JUÁREZ, 2020).

Teor de sólidos – A análise de teor de sólidos é utilizada para determinar a quantidade de matéria orgânica presente no substrato com potencial para ser biometanizada pelos microrganismos. O teor de sólidos é um parâmetro fundamental para caracterização da matéria orgânica a ser biodigerida e está diretamente relacionado com a quantidade de água presente no substrato e a quantidade de minerais, sendo demonstrada em gramas por litro ou

porcentagem. Conforme a quantidade de água presente, o substrato poderá assumir um aspecto líquido, pastoso ou sólido. Sua definição é essencial, não apenas para a caracterização dos substratos, além disso para especificação do tipo de tecnologia que será empregada no processo de digestão anaeróbia deste substrato (CHERNICHARO, 2007).

Segundo o “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005), há diversas frações diferentes de sólidos que podem ser quantificadas em uma amostra de substrato a ser biodigerida. No presente trabalho, serão analisados os sólidos totais, sólidos voláteis e os sólidos fixos.

Os sólidos totais (ST) representam a quantidade de sólidos presentes no resíduo e podem ser divididos em sólidos voláteis (SV), fração orgânica do resíduo encarregado pela geração do biogás, e sólidos fixos (SF), que representam aos compostos inorgânicos. Nesta configuração, quanto maiores os níveis de SV presentes no resíduo, mais indicado serão os processos biológicos de tratamento, como a digestão anaeróbia. (LEITE; POVINELLI, 1999);

Outros fatores que podem influenciar a geração do biogás são os nutrientes, as bactérias, a compactação dos resíduos e o processamento de resíduos diversos.

#### 2.4.3. Características

As características do biogás dependem da pressão, da umidade, da temperatura, da concentração de gás metano e da concentração de outros gases. Pecora (2006) cita que a umidade afeta a temperatura da chama, reduz o poder calorífico e diminui o limite de inflamabilidade, além da presença de CO<sub>2</sub>, forma mais oxidada do carbono, não ser capaz de ser queimado.

A presença de substâncias não combustíveis na composição do biogás, como o vapor de água e o CO<sub>2</sub>, prejudica o processo de queima, resultando na redução de sua eficiência pelo fato de absorverem parte da energia gerada, tornando o poder calorífico do biogás menor à medida que se eleva as suas concentrações (PEREIRA; CASTILHOS, 2018).

Outro prejuízo devido à presença de água na produção do biogás está relacionado às instalações utilizadas para a conversão energética, pois a umidade é capaz de ser um agente corrosivo após a solidificação. Para remover o vapor de água na saída do biodigestor existem alguns métodos, como a condensação, a adsorção e a absorção (RAJENDRAN *et al.*, 2014).

Quanto ao CO<sub>2</sub>, um maior volume no processo implica na necessidade de uma maior capacidade de armazenamento. Outra substância maléfica ao processo é o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S)

que, mesmo em pequenas concentrações, pode provocar corrosão das partes metálicas, diminuindo a vida útil dos equipamentos e reduzindo a eficiência do processo (FIGUEIREDO, 2011). Para a remoção do gás sulfídrico, pode-se utilizar a dessulfurização biológica no biodigestor ou, externamente, a lavagem bioquímica e uma dessulfurização química com carvão ativado (SILVA; TREVISAN, 2019).

A necessidade de remoção dos gases presentes no biogás modifica de acordo com a finalidade da sua utilização. Se a aplicação do biogás visa sua transformação em energia elétrica, deve-se remover o vapor de água e o  $H_2S$  (SILVA; TREVISAN, 2019).

#### 2.4.4. Viabilidade da Produção

Para desenvolver um combustível através do biogás, faz-se necessário um estudo de viabilidade do mesmo. Como ponto de partida para o estudo, deve-se verificar o poder calorífico do biogás. Considerando uma concentração de 40 e 80% de metano na mistura, além da presença de contaminantes e outras substâncias, encontra-se um poder calorífico entre 4,17 e 8,04 kWh/Nm<sup>3</sup> (FIGUEREDO, 2011). Magalhães *et al.* (2014) encontraram, para o metano puro, um poder calorífico de 8.500 kcal/Nm<sup>3</sup>, ou seja, 9,88 kWh/Nm<sup>3</sup>.

Cardoso Filho (2001) cita que a equivalência energética do biogás, em relação a outros combustíveis é determinada levando em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão e apresenta a Tabela 1 com a equivalência de 1 Nm<sup>3</sup> de biogás frente a outros combustíveis.

Tabela 1 - Equivalência de 1 Nm<sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Quantidade equivalente a 1 Nm<sup>3</sup> de biogás</b>
Carvão Vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo Diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Gasolina Amarela	0,61 L
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,45 L
kWh	1,43 L
Álcool Carburante	0,80 L
Carvão Mineral	0,74 kg

Fonte: Cardoso Filho (2001)

A produção de metano na geração de energia renovável é um significativo benefício ambiental e social. A Tabela 1 mostra que o biogás pode substituir outros combustíveis utilizados na indústria, pois o potencial calorífico de 1 Nm<sup>3</sup> de biogás é equivalente a 1,5 kg de lenha ou 0,74 kg de carvão mineral. Logo, a digestão anaeróbia compõe uma tecnologia ainda mais próspera no que tange ao potencial energético alcançado a partir do seu principal produto, o biogás (ALVES, 2016).

Segundo a ANEEL (2008), a aplicação de biogás promove a redução dos gases que intensificam o efeito estufa, gerados pela degradação espontânea da matéria orgânica e pela queima de combustíveis fósseis que seriam utilizados para geração de energia, minimizando a poluição do solo e dos lenções freáticos (MOURA, 2017).

O potencial de geração de biogás e o teor de metano dos resíduos está diretamente ligado a sua composição macromolecular e elementar. Uma forma para avaliar o potencial dos resíduos é através da utilização do ensaio do potencial bioquímico de metano. Através desse ensaio, Walker *et al.* (2009) encontraram o potencial de geração de metano de 200 L/kg de sólidos voláteis (L/kg SV) para resíduos municipais. Por outro lado, a literatura também descreve que o valor pode variar entre 200 a 400 m<sup>3</sup>/t (HENRIQUES, 2009).

O potencial de geração do metano para resíduos orgânicos tende a ser maior do que o valor médio de 200 m<sup>3</sup>/t RSU, pois os resíduos urbanos podem conter compostos inorgânicos (plásticos, vidros, metais, entre outros), dificultando o acesso de nutrientes aos microrganismos e diminuindo o potencial de geração de biogás a partir da digestão anaeróbia (ALVES, 2016).

Segundo o Inventário Energético de Resíduos Sólidos Urbanos, o Brasil apresenta um potencial de produção de biometano através da recuperação de gás do lixo (GDL) em aterro sanitário de aproximadamente 1,86 Mm<sup>3</sup>/dia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA, 2014).

#### 2.4.5. Conversão do Biogás em Energia Elétrica

A conversão energética de um combustível incide na transformação de um tipo de energia para outra. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada, podendo ativar

um gerador para converter em energia elétrica ou ser aproveitada em forma de energia térmica (CHAVES, 2020).

A geração de energia elétrica a partir do biogás apresenta como vantagens a utilização de um combustível renovável de baixo custo, com uma menor emissão de gases poluentes, reduzindo os impactos no ar e na atmosfera e, também, um balanço de carbono negativo, além da possibilidade de geração descentralizada próxima aos pontos de distribuição, acarretando uma redução dos custos operacionais e perdas na transmissão (FIGUEIREDO, 2011).

A conversão do biogás em energia elétrica pode ser obtida por meio de diversos equipamentos, como os motores de combustão interna de ciclo Otto, das turbinas a gás e da cogeração (SIEBERT, 2021).

Os motores de combustão interna de ciclo Otto funcionam a partir da aspiração do ar-combustível antes de ser comprimido no interior dos cilindros e a combustão da mistura é dada por centelhas produzidas numa vela de ignição (PEREIRA, 2006). Os motores de combustão interna já são bastante utilizados para geração de energia, através da queima de gasolina e diesel, necessitando apenas da adaptação desse motor para o recebimento de gás (JUSTINO, 2020). Lombard *et al.* (2004) observaram que a eficiência do motor é reduzida de forma drástica com a concentração de metano inferior à 50% na composição do biogás. Os estudos de Silva (2018), por sua vez, mostraram que quando o biogás é utilizado como combustível em um motor de ciclo Otto, o rendimento teórico esperado é na ordem de 30%, indicando que a energia elétrica gerada tem o potencial de 30% em comparação ao motor utilizando outras fontes de combustível, como a gasolina ou diesel.

Nas turbinas a gás, o ar é sugado do ambiente e comprimido por um compressor. Esse ar atinge a câmara de combustão, que recebe o biogás, e onde acontece a queima, que gera o aumento da temperatura e, por imediato, a expansão do volume. Os gases quentes alcançam uma turbina onde, então, dilatam-se, possibilitando mais energia do que o necessário para mover o compressor. Esse excedente de energia não utilizado pelo compressor é encaminhado a um gerador de energia elétrica (FNR, 2010).

Em motores de combustão, boa parte de energia é dissipada em forma de calor, energia que, normalmente, não é aproveitada. Pensando nesse cenário, e partindo do pressuposto da necessidade de utilizar esse calor não aproveitado, o conceito de cogeração tem sido visto com outros olhos, devido à capacidade de geração energética, produzindo duas

formas de energia no mesmo sistema e com perdas mínimas (HAKAWATI *et al.*, 2017). Nasceu, assim, o conceito de planta Combined Heat and Power (CHP), que consiste na geração simultânea de eletricidade e energia térmica de uma única fonte de combustível. O sistema promove menor quantidade de combustível, alta rentabilidade e alta eficiência de conversão, normalmente acima de 75% e podendo chegar a 90%, mas seu principal problema ainda é o custo operacional, por ser uma tecnologia nova (YIN *et al.*, 2019).

Na Tabela 2 é possível observar as características de cada motor, com as análises de potência instalada, o rendimento elétrico e a emissão de NO<sub>x</sub> (ppm).

Tabela 2 - Comparação de tecnologia disponível para conversão de energia

<b>Tecnologia de Conversão</b>	<b>Potência Instalada</b>	<b>Rendimento Elétrico</b>	<b>Emissão de NO<sub>x</sub> parte por milhão (ppm)</b>
Ciclo de Otto	30 kW – 20 MW	30 a 34%	< 250 ppm
Ciclo Diesel	5 kW – 20 MW	30 a 35%	27 ppm
Turbinas a gás (médio porte)	500 kW – 150 MW	20 a 30%	35 a 50 ppm
Microturbinas a gás (pequeno porte)	30 kW – 100 kW	24 a 28%	< 9 ppm

Fonte: CHAVES (2020)

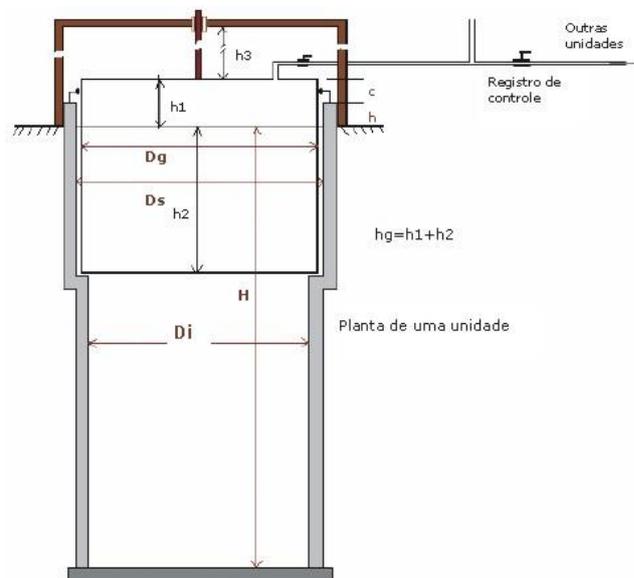
## 2.5. Biodigestores

Os biodigestores são equipamentos que consistem em uma câmara fechada onde os resíduos são fermentados através do processo anaeróbio, acelerando o processo de decomposição do material orgânico. Gera-se, neste processo, o biogás, o biofertilizante, parte sólida que decanta no fundo do tanque, e uma parte líquida que corresponde ao efluente tratado (mineralizado) (INGEP, 2012; OLIVEIRA, 2018).

Fernandes Filho *et al.* (2018) apontam os biodigestores como instrumentos valiosos na gestão de resíduos orgânicos pois, além de gerenciar e promover o tratamento dos resíduos, têm como vantagem a simplicidade operacional, a produção de biofertilizantes e a produção de biogás em substituição ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

De acordo com Frigo *et al.*, 2015, o biodigestor modelo batelada é composto por um corpo cilíndrico, um gasômetro flutuante e uma estrutura para o controle do gasômetro, no qual pode ser um sistema de travas e roldanas. Segundo Silva *et al.*, 2017, sua instalação pode ser do tipo de um tanque anaeróbio ou diversos tanques em série. Este modelo é utilizado quando a biomassa fica disponível em períodos mais longos, como foi o caso, a matéria orgânica proveniente de um restaurante e mantido fechado por período conveniente, para assim, ocorrer a fermentação da matéria orgânica. A figura 3 mostra como é a configuração de um modelo em batelada.

Figura 3 - Modelo em batelada de biodigestor



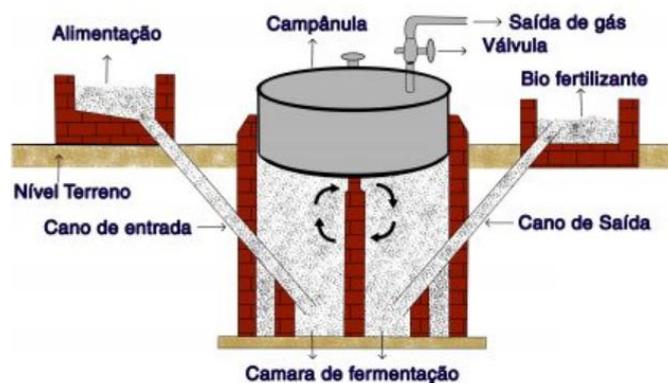
Fonte: Empraba (2019)

Onde temos:  $D_i$  é o diâmetro interno do biodigestor;  $D_s$  é o diâmetro interno da parede superior;  $D_g$  é o diâmetro do gasômetro  $H$  é a altura do nível do substrato;  $h_1$  é a altura ociosa do gasômetro;  $h_2$  é a altura útil do gasômetro;  $h_3$  é a altura útil para deslocamento do gasômetro;  $b$  é a altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;  $c$  é a altura do gasômetro acima da parede do biodigestor.

Outra forma de construção de um biodigestor é através da alimentação contínua, onde o sistema é mantido fechado durante todo o processo de entrada e saída de material (OLIVEIRA, 2018). Quanto ao tipo de construção, os mais utilizados são os modelos indiano, chinês e canadense, também conhecido por modelo de lona ou marinha (GONÇALVES, 2018).

O modelo indiano (Figura 4) possui uma de construção relativamente simples e é caracterizado por possuir uma campânula (tampa) móvel na parte superior do sistema que funciona como gasômetro, armazenando o gás produzido no processo (DEGANUTTI *et al.*, 2008). Para a alimentação, o resíduo deverá apresentar uma concentração de sólidos totais não superior a 8% (m/v), pois tem a necessidade de circulação dos resíduos pelo interior da câmara de fermentação. Esta alimentação deve ser de forma contínua e o tempo de digestão é determinado pelo tamanho do sistema e pela carga de alimentação diária. Frigo *et al.* (2015) sugerem que, quando a matéria orgânica não possuir composição homogênea, a mesma deverá ser triturada para evitar o entupimento de canos de entrada e saída de material. Para Gonçalves (2018), a desvantagem do modelo indiano está nas perdas de calor geradas pela campânula metálica de armazenamento do biogás.

Figura 4 - Modelo indiano de biodigestor

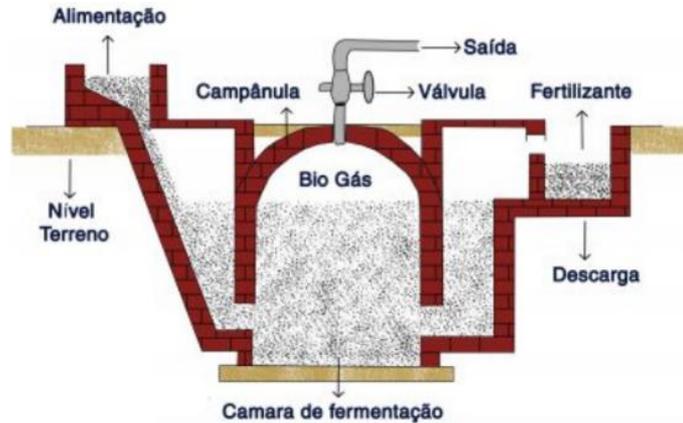


Fonte: Rodrigues (2019)

O modelo chinês (Figura 5) possui uma câmara cilíndrica construída em alvenaria, onde ocorre a fermentação, e uma superfície superior (tampa) fixa, impermeável e abobada, onde o biogás é armazenado. O princípio de operação é baseado numa prensa hidráulica, aumentando a pressão do interior devido ao acúmulo de biogás e deslocando o efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido contrário quando ocorre descompressão (JORGE; OMENA, 2012). Sua construção é inteiramente rígida e subterrânea, tornando seu isolamento natural, sendo considerado melhor que o modelo indiano (SEIXAS, 1981). Semelhante ao modelo indiano, o fornecimento de matéria orgânica deve ser contínuo e a concentração de sólidos totais também não deve ser superior a 8% (m/v) para evitar

entupimentos no sistema de entrada e facilitar a circulação do material (DEGANUTTI *et al.*, 2008).

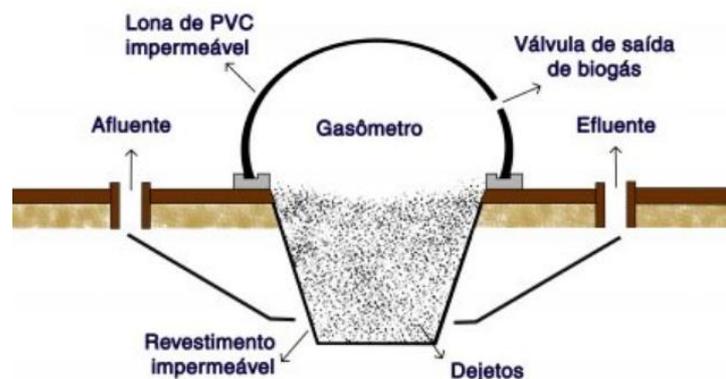
Figura 5 - Modelo chinês de biodigestor



Fonte: Rodrigues (2019)

Considerado o mais utilizado nas propriedades rurais do Brasil, o modelo canadense (Figura 6) é construído na forma horizontal e possui uma caixa de carga com largura maior que a profundidade, permitindo uma maior área de exposição ao sol e, por conseguinte, uma maior possibilidade de produção de biogás, evitando o entupimento do sistema (GONÇALVES, 2018). A cobertura do sistema é feita em material plástico maleável para aproveitar a exposição ao sol, geralmente lona de PVC, sendo capaz de inflar à medida que a produção de gás aumenta. Tem como principais características a necessidade de ser totalmente vedado e o fato de poder ser abastecido tanto de forma contínua quanto por batelada (CASTANHO; HARRUDA, 2008).

Figura 6 - Modelo canadense de biodigestor



Fonte: Rodrigues (2019)

## 2.6. Parâmetros operacionais

O número de estágios (fases) e a concentração de sólidos totais são os principais fatores que influenciam na escolha e na classificação de um projeto de biodigestores anaeróbios. Esses parâmetros interferem no custo total, no desempenho e na credibilidade do processo de digestão (BARCELOS, 2009).

Os métodos ou tipos de sistemas utilizados no tratamento anaeróbio dos resíduos sólidos orgânicos são classificados por estágio único, múltiplo e em batelada. Nos reatores de único estágio, todas as etapas do processo de digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem, simultaneamente, em um único tanque de reação, de mistura completa.

Já nos digestores múltiplos, geralmente se utilizam dois reatores, sendo o primeiro para as transformações bioquímicas da primeira (hidrólise, acidificação e liquefação) e o segundo para a formação do acetato, hidrogênio, dióxido de carbono e, logo em seguida, transformação do metano. Devido à possibilidade de um controle mais específico nas distintas fases do processo biológico, os reatores multiestágio tendem a ter um ganho na produtividade de biogás e um melhor desempenho do processo de digestão anaeróbia como um todo. Reatores em bateladas são alimentados, submetidos às reações de digestão, esvaziados e carregados novamente, tendo como grande vantagem a tecnologia simples, o baixo custo e a robustez (PROBIOGAS, 2015).

Outra classificação que pode ser discutida sobre os reatores anaeróbios está relacionada ao teor de Sólidos Totais (ST) contidos no reator. São considerados reatores com baixo teor de sólidos (BTS) quando se tem menos de 15% de ST, médio teor quando ST estiver entre 15 e 20 %, e alto teor (ATS) quando ST estiver na faixa de 22 a 40%. (TEIXEIRA, 2019). De acordo com Barcelos (2009), os reatores que operam com altas taxas de sólidos têm apresentado maiores vantagens em comparação com os de baixa concentração, por estes últimos terem um maior teor de água e, por conseguinte, maior dificuldade para a utilização do material bioestabilizado. Com teor de sólidos totais mais elevado tem-se menor umidade, permitindo uma maior taxa de geração de biogás (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Quanto ao teor de umidade, ou seja, a quantidade de matéria seca no processo, a PROBIOGAS (2015) caracteriza como digestão “úmida” a adição de água ou efluente líquido proveniente do lodo digerido no sistema ao resíduo até se obter um percentual de matéria seca entre 10 e 15 %. Um dos grandes problemas desse sistema é a quantidade de água, cuja concentração pode inibir ou intoxicar o meio biológico. Segundo Kelleher (2007), os processos de pré-tratamento dos resíduos requeridos nos sistemas via úmida ocasionam uma maior perda de sólidos voláteis, o que diminui a produtividade de biogás no sistema.

A digestão “seca”, é a tecnologia na qual os reatores operam com um teor de matéria seca em torno de 20% a 40%. Em comparação com o sistema “úmido”, utiliza menos água, o que leva a menores demandas energéticas para as necessidades da planta, necessitando de menos energia para o aquecimento da água, e de uma manipulação mais fácil dos contaminantes (pedras, vidros, plástico, metais e entre outros materiais) (CORDEIRO, 2018). O principal problema apresentado neste tipo de tecnologia decorre do acúmulo de inertes no reator, que resulta em deficiências na homogeneização do material e na criação de zonas mortas, acarretando perda de capacidade de digestão, entupimento e problemas operacionais diversos (PROBIOGAS, 2015).

Os digestores “extrassecos” são reatores que operam com elevado teor de sólidos (35 a 50%), em operação descontínua e regime de batelada sequencial, fazendo-se uso de pás carregadeiras para a introdução da fração orgânica dos resíduos a serem tratados no seu interior. As plantas com este sistema têm sido projetadas com quatro ou mais reatores, possibilitando a introdução e a remoção de substrato de maneira sequencial e uma operação em estágios distintos de metanização, gerando uma maior produção de biogás (PROBIOGAS, 2015).

As tecnologias mais utilizadas no processo via seco são a da Dranco e a da Kompogas (PROBIOGAS, 2015). O sistema Dranco é um processo de digestão anaeróbia termofílico via seca, com reator vertical (formato cilíndrico e fundo cônico) de único estágio e fluxo contínuo, podendo ser construído em concreto armado ou aço, abrigando uma grande variedade de resíduos orgânicos e trabalhando com teores de ST variando entre 15% e 40% na introdução. O tempo de detenção hidráulica varia de 20 a 30 dias e a produtividade de biogás entre 80 e 120 Nm<sup>3</sup>/t. O sistema Kompogas é um processo de digestão anaeróbia via seca, predominantemente operado na faixa termofílica (55 – 60 °C), com reator horizontal fluxo pistão de único estágio, alimentação semicontínua, de formato retangular e fundo cilíndrico,

edificado em concreto armado ou aço. A produção média esperada de biogás para plantas com tecnologia Kompogas é de 100 Nm<sup>3</sup>/t de resíduos orgânicos e 150 Nm<sup>3</sup>/t de resíduos com elevado teor de restos alimentares (INTERNATIONAL, 2005).

No sistema extrasseco, a tecnologia utilizada é o sistema de garagem, também denominado de túneis de metanização. Trata-se de um processo de digestão anaeróbia operado na faixa mesofílica, sendo o reator disposto na horizontal (formato retangular) e construído, normalmente, em concreto armado, com o resíduo permanecendo no interior do reator até a completa metanização. Como sistema auxiliar, realiza-se a recirculação do lixiviado, que é encaminhado para um reator de líquido, sendo reintroduzido no processo via aspersão no material em digestão. Terminado o processo de metanização, ar ambiente é injetado no túnel reator para eliminar o metano presente, minimizando riscos de explosão durante a abertura do reator para a retirada do material digerido. Após a extração, o material digerido é conduzido para a compostagem, onde o processo de estabilização é finalizado (PROBIOGAS, 2015).

## **2.7. Implantação de Plantas Piloto para o Tratamento de Resíduos Orgânicos**

Algumas universidades e institutos brasileiros estão implementando as tecnologias via seca e extrasseca para tratamento dos resíduos orgânicos provenientes dos seus restaurantes universitários e, também, das comunidades circunvizinhas.

Como exemplo, citam-se o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, que instalou uma unidade piloto na cidade de Bertoga (SP) para realizar o tratamento de biodigestão anaeróbia e tratamento térmico, atendendo cerca de duas mil pessoas da Vila Itapanhaú, com geração de 2 t/dia de resíduos. A planta piloto instalada em Bertoga foi baseada na tecnologia extrasseca e construída pela empresa Methanvm. A geração de energia elétrica excedente na planta piloto é esperada como 0,022MWh/t da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU), consumindo 75% da energia gerada (ITP, 2018).

Outro projeto piloto é o da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), também em parceria com Methanvm Resíduos e Energia, no qual foi desenvolvida uma planta piloto com a iniciativa de realizar o tratamento a seco dos resíduos proveniente do restaurante universitário da Instituição. Segundo a empresa Methanvm Resíduos e Energia (2020), a

capacidade de tratamento da Planta de Metanização de Resíduos Orgânicos (pMethar) é de 500 a 800 kg/dia e a geração de biogás da planta é de 100-120 Nm<sup>3</sup> de biogás por tonelada de resíduos.

Na cidade do Rio de Janeiro, no ecoparque do Caju, uma parceria da prefeitura do Rio de Janeiro com a empresa Methanvm Engenharia Ambiental, cooperação técnica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), está implementando a primeira unidade de biometanização da América Latina, com o objetivo de transformar a matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em biogás na geração de energia, biocombustível e condicionador de solos para a agricultura e reflorestamento. O projeto inicial visa processar em torno de 35 a 50 t/dia, sendo a energia gerada a partir da combustão do biogás capaz de atender à demanda da própria planta, além de ser suficiente para abastecer a Unidade de Transferência de Resíduos do Caju (UTR). No projeto, o excedente poderá abastecer mais de 1.000 residências, considerando o consumo médio da família brasileira em cerca de 160 kWh/mês, além da frota elétrica da Comlurb, atualmente composta de nove veículos (PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2018).

### **3 METODOLOGIA**

A digestão anaeróbia de resíduo orgânico é uma alternativa promissora tanto no cenário ambiental quanto economicamente, pois tem como subproduto, o biogás. Contudo, para avaliar se a rota metabólica é viável, é necessário conhecer as características do resíduo utilizado na produção de biogás e a sua biodegradabilidade (STEINMETZ *et al.*, 2014). Logo, foram realizados estudos em escala laboratorial, buscando simular as condições de um biodigestor para observar e analisar como é o comportamento do biogás, verificando a quantidade de gás liberada a partir de uma operação em batelada.

Neste sentido, para avaliar as características do resíduo orgânico, foram realizadas as análises de pH, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), Demanda Química de Oxigênio (DQO), nitrogênio (N), fósforo (P).

#### **3.1. Matéria-prima e inóculo**

A matéria-prima utilizada neste estudo foram resíduos adquiridos de um restaurante popular localizado no bairro de Rosa Elze, município de São Cristóvão, no Estado de Sergipe.

A Tabela 3 apresenta o cardápio dos 10 dias de coletas no restaurante, possibilitando a identificação dos alimentos contidos na amostra.

Os rejeitos foram coletados no restaurante na lixeira destinada ao resto de alimentos, dentro do restaurante e no horário das 13:30. Depois de cada dia de coleta, as amostras eram pesadas, separadas manualmente para a realização da pesagem de cada item analisado, foi separado a partir dos grupos, grãos e carboidratos (arroz, feijão, milho, grão de bico, macarrão e entre outros); frutas, legumes e hortaliças e o grupo das carnes ( frango, boi, peixe, ovos e porco), para assim fazer um levantamento de quanto de cada grupo era desperdiçado e também para fazer uma proporção a ser utilizado nas análises de sólidos totais, em seguida, as amostras eram acondicionadas em um balde plástico essa separação e o armazenamento era realizado no Laboratório de Secagem, no Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), e conservada em freezer a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nos dez dias de coletas.

Foi utilizado como inóculo dejetos de caprinos (esterco), coletados no Biotério da Universidade Federal de Sergipe (UFS). A escolha dos dejetos de caprinos como inóculo foi dada pela facilidade em coletar este material na faculdade. O material coletado foi pesado e acondicionado por 1 dia em recipiente fechado a temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  até o uso.

Tabela 3 - Cardápio do restaurante popular nos 10 dias de coleta

<b>Dia da coleta</b>	<b>Cardápio</b>
14/07 (quarta-feira)	Feijão, arroz, macarrão alho e óleo, bife acebolado, frango assado, beterraba ralada, alface, tomate
15/07 (quinta-feira)	Feijão, arroz, macarrão ao molho de tomate, carne de panela, frango assado, beterraba ralada, quiabo cozido, tomate, batata cozida
19/07 (segunda-feira)	Feijão, arroz, macarrão ao molho de tomate, fígado, bisteca, batata cozida, tomate, beterraba cozida
20/07 (terça-feira)	Feijão, arroz, macarrão alho e óleo, peixe empanado, carne de sol, vinagrete, batata cozida
21/07 (quarta-feira)	Feijão, arroz, macarrão alho e óleo, lasanha de queijo e presunto, frango assado, couve crua, alface, cenoura cozida, pepino

22/07 (quinta-feira)	Feijão, arroz, macarrão ao molho de tomate, frango assado, bisteca, tomate, beterraba ralada, couve refogado, farofa de manteiga
26/07 (segunda-feira)	Feijão, arroz, macarrão ao molho de tomate, lasanha de frango, bife, cenoura ralada, batata cozida
27/07 (terça-feira)	Feijão, arroz, macarrão ao molho de tomate, farofa de manteiga, frango assado, bife, batata cozida, couve refogado
28/07 (quarta-feira)	Feijão, arroz, macarrão ao molho de tomate, carne de panela, frango assado, beterraba ralada, quiabo cozido, tomate

Fonte: Acervo do autor (2021)

### 3.2. Testes de biodigestão em escala de bancada

Os experimentos realizados em escala laboratorial simularam um sistema de biodigestão operando em batelada, utilizando a garrafa de politereftalato de etileno (PET) como um biorreator e a seringa como medição do biogás (Figura 7).

A montagem do experimento com a seringa para medição do biogás (Figura 7) utilizou 8 garrafas PET de 500 mL com tampa rosqueada, contendo 250 mL de resíduo orgânico com água. A saída na tampa rosqueada do frasco possuía uma mangueira de silicone com o comprimento de 5 cm e com circunferência de 5 x 10 mm, permitindo a passagem do biogás até o gasômetro. Para a montagem do gasômetro foi utilizada uma seringa graduada em 60 mL.

Figura 7 – Testes de biodigestão em escala de bancada utilizando a seringa como medidor



Fonte: Acervo do autor (2021).

Para o processo de biodigestão anaeróbia em batelada, o processo de alimentação do reator ocorreu apenas e exclusivamente no começo da operação. Com isso, foi realizado um outro experimento com 8 garrafas PET utilizando tampa rosqueada e com equipo gravitacional de 30 cm para realizar, durante o processo fermentativo, a medição de pH, com a retirada de uma parte da amostra por meio de uma seringa de 5 mL. É importante salientar que o ajuste de pH foi feito apenas na partida do processo e, durante o mesmo, efetuou-se apenas a medição do pH.

Todos os frascos foram devidamente vedados para garantir condições estritamente anaeróbias ao resíduo, possibilitando o processo de decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Os experimentos (com o medidor e com o equipo) foram realizados simultaneamente.

No preparo do experimento, o resíduo foi descongelado até temperatura ambiente e, logo após o descolamento, foi feita uma triagem para a remoção de algumas matérias, para não danificar o liquidificador e, também, facilitar a trituração. A Figura 8 mostra alguns materiais removidos, como espinhas de peixe, osso de galinha e de porco, palitos de dentes e papel de guardanapo.

Figura 8 - Triagem para retiradas de ossos, espinhas, palitos de dente e guardanapo



Fonte: Acervo do autor (2021).

Posteriormente, foram pesados 250 g de resíduos, sendo transferidos para o liquidificador e adicionado a ele 500 mL de água. A mistura foi triturada em liquidificador até atingir uma textura entre líquida e pastosa, para facilitar o processo de fermentação.

O inóculo (esterco de caprino) foi utilizado em três concentrações: 1, 2 e 3% (m/v).

Os experimentos foram divididos em oito frações, sendo elas:

- (1) sem inóculo e sem ajuste de pH (pH =5,55);
- (2) sem inóculo e com ajuste do pH (pH=7,0);
- (3) com inóculo com concentração de 1% e sem ajuste de pH;
- (4) com inóculo com concentração de 1% e com ajuste de pH;
- (5) com inóculo com concentração de 2% e sem ajuste de pH;
- (6) com inóculo com concentração de 2% e com ajuste de pH;
- (7) com inóculo com concentração de 3% e sem ajuste de pH;
- (8) com inóculo com concentração de 3% e com ajuste de pH

O ajuste de pH no substrato foi realizado em pHmetro Tecnal TEC-5, com a utilização de potenciômetro e eletrodo. O acompanhamento dos experimentos foi realizado a partir de medições de temperatura do processo, por meio de termômetro digital infravermelho modelo MT- 9002, e pelo monitoramento do deslocamento do gás dentro e da seringa.

### 3.3. Métodos Analíticos

Análises físico-químicas foram utilizadas para caracterizar o resíduo orgânico, avaliar capacidade de estabilização a partir da produção de biogás e acompanhar os processos de tratamento.

Para a caracterização físico-química, foram realizadas análises de pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO) inicial e final, sólidos dissolvidos (SD), sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) nos 10 dias da coleta das amostras, nitrogênio (N) e fósforo total (P) inicial e final. Todas as análises foram mensuradas de acordo com o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995).

As análises foram realizadas no Laboratório de Fenômenos de Transportes, Laboratório de Secagem e Laboratório de Análises de Alimentos, todos pertencentes ao Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), bem como em laboratório terceirizado. A Tabela 4 sumariza todos os parâmetros analisados e os respectivos métodos utilizados.

Tabela 4 - Parâmetros referentes à caracterização química das amostras

Parâmetro	Unidade	Método	Referência
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	Espectrofotométrico	SMEWW*5220 D
Nitrogênio	mg/L	Kjeldahl e titulométrico	SMEWW* 4500-N C
Fósforo	mg/L	Espectrofotométrico	SMEWW* 4500-P C
pH	--	Potenciométrico	SMEWW*4500 B
Série de Sólidos	mg/L	Gravimétrico	SMEWW* 2540 B, 2540 C, 2540 D

\* Standard Methods for Examination of Water and Wastewater

Fonte: Acervo do autor (2021).

#### 3.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para a avaliação do pH foi utilizado o pHmetro marca Tecnal, modelo TEC-5. Este equipamento possui uma faixa de leitura de 0 a 14, onde o 0 representa a acidez máxima, 7 representa a neutralidade e 14 representa a alcalinidade máxima. Além disso, o equipamento

mede a temperatura da amostra (TECNAL, 2021). A medição de pH foi realizada semanalmente.

### 3.3.2 Sólidos Totais, Voláteis e Fixos

A análise de sólidos totais foi realizada com o auxílio de uma estufa de secagem da marca TECNAL, modelo TE-394/2, e ocorreu a partir do método gravimétrico 2540-B (APHA, 2012). Para a realização da análise foram utilizados cadinhos de porcelana previamente calcinados e pesados.

Colocou-se no cadinho 10 g de amostra, pesada em balança semianalítica da marca EXACTA, modelo EL-320AB-BI. Logo em seguida, a amostra foi colocada na estufa de secagem com temperatura de 105 °C por um período 24 h para que a água presente na amostra evaporasse. Após o tempo e secagem, as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente em um dessecador de vidro fechado. Por fim, pesou-se novamente o cadinho contendo a amostra seca. A partir da Equação 1 foi possível calcular o percentual de sólidos presentes na amostra.

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{(A-B)}{(C-B)} * 100 \quad (1)$$

onde  $A$  é o peso da amostra após estufa,  $B$  é o peso do cadinho e  $C$  o peso do cadinho com amostra.

As análises de sólidos voláteis e fixos foram realizadas a partir dos métodos gravimétricos 2540-D (APHA, 2017), processadas em um forno do tipo mufla com temperatura de 600 °C por um período de 4 h. Para esta análise, foi utilizado o material da análises de sólidos totais. As Equações 2 e 3 foram utilizadas para calcular os valores de sólidos voláteis e sólidos fixos respectivamente.

$$\text{Sólidos Voláteis (\%)} = \frac{(A-D)}{(A-B)} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Sólidos Fixos (\%)} = \frac{(D-B)}{(A-B)} * 100 \quad (3)$$

onde  $A$  é o peso da amostra após estufa,  $B$  é o peso do cadinho e  $D$  o peso do cadinho após a mufla.

As análises dos sólidos totais, voláteis e fixos foram realizadas 10 vezes e em duplicata, ou seja, a cada dia de coleta do resíduo no restaurante eram realizadas estas análises, sendo separadas, proporcionalmente, 10 g da amostra.

### 3.3.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise de DQO indica a quantidade de oxigênio necessária para degradar quimicamente a matéria orgânica presente na amostra e foi realizada a partir do método titulométrico de refluxo fechado 5220D, do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Esta análise consiste na digestão do dicromato, trata-se de uma reação de oxidação em meio fortemente ácido e elevada temperatura na presença de um catalisador (o sulfato de prata). É usado o dicromato de potássio (cromo na forma de  $\text{Cr}^{6+}$ ) devido a sua forte capacidade oxidante, facilidade de manipulação e aplicabilidade, além de ser um padrão primário. A utilização de um catalisador, como o sulfato de prata, é necessária para tornar possível a oxidação de compostos alifáticos de cadeia reta.

Após a oxidação da matéria orgânica presente, a DQO é obtida diretamente ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ) no espectrofotômetro DR2000, através de uma curva padrão inserida no laboratório. (ITPS, 2021).

Em relação as amostras para esta análise devem estar bem homogêneas, principalmente aquelas que contenham muito sólidos sedimentáveis, como o caso dos esgotos, tornando necessário uma cuidadosa homogeneização antes de se tomar a alíquota adequada para análise. Para tornar a amostra ainda mais homogeneizada o presente trabalho utilizou-se de filtro de papel.

No que diz respeito os reagentes utilizados no trabalho para realizar a análise de DQO, foi usado os seguintes reagentes:

- Solução de digestão: adicionar em 125 mL de água destilada 2,554 g de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), previamente seco em estufa a  $103^\circ\text{C}$  por 2 horas, 41,75 mL de ácido sulfúrico, 8,325 g de  $\text{HgSO}_4$ . Dissolver, esfriar e completar com água destilada o volume em balão volumétrico de 250 mL.

- Reagente de ácido sulfúrico: adicionar sulfato de prata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) cristal ou pó em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  numa proporção de 2,03 g de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  para 200 mL de ácido sulfúrico concentrado. A dissolução completa do sulfato de prata demora cerca de 24 horas, por isso se deve estar sempre atento à necessidade de se fazer nova solução.
- Solução padrão de Biftalato de potássio: de uma quantidade de Bifalato de potássio,  $\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$ , seca a  $120^\circ\text{C}$  por 2 horas, pesar 425,0 mg e dissolver em aproximadamente 500 ml de água destilada e então completar o volume para 1000 ml em balão volumétrico. Esta solução é estável por até 3 meses quando guardada sob refrigeração. Relação teórica entre o biftalato de potássio e a DQO: 1 mg de biftalato de potássio = 1,171 mg  $\text{O}_2$ .
- Ácido sulfúrico concentrado: Ácido sulfúrico 20%: dissolver 20 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado para cada 100 mL de solução.

E por fim para determinar o DQO na amostra, foi executada as seguintes etapas:

- 1 - Colocar nos tubos, 1,5 mL da solução de digestão;
- 2 – Adicionar 2,5 mL de amostra de água residuária;
- 3 – Adicionar 3,5 mL de reagente ácido sulfúrico;
- 4 - Fechar os tubos e agitar várias vezes para a homogeneização;
- 5 – Colocar os tubos no bloco digestor para fazer a digestão da amostra a  $150^\circ\text{C}$  por 2 horas (tempo estabelecido no Standard Method/s)
- 6- Retire os tubos do bloco digestor, esfriar, agitar e deixar sedimentar.
- 7 – Ligar o espectrofotômetro, chamar o método 955, ajustar o comprimento de onda para 600 nm e “zerar” com a prova em Branco. Fazer a leitura da amostra. O valor obtido no espectrofotômetro já está expresso em  $\text{mgO}_2/\text{L}$  de DQO. (APOSTILA DE QUÍMICA SANITÁRIA E LABORATÓRIO DE SANEAMENTO II, 2002).

### 3.3.4 Nitrogênio Total

Nitrogênio total significa a soma do nitrogênio orgânico mais os íons amônio. Foi utilizado o Método 4500 N C Semi-Micro-Kjeldahl publicado no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Para a realização da análise foi utilizado um tubo de proteína onde foi colocado 25 mL de amostra já diluída, mais 50 mL da solução de digestão composta por sulfato de potássio, sulfato de cobre e ácido sulfúrico concentrado. Depois, a mistura foi aquecida em um bloco digestor à 150 °C até que ocorresse a redução de 30 mL do volume inicial e, em seguida, aumentou-se a temperatura até 385 °C e a manteve por mais 2 h aproximadamente, quando a amostra apresentou cor esverdeada.

Após a digestão e com as amostras já resfriadas, foi realizada a destilação. Para isso, adicionou-se 50 mL de hidróxido de sódio à 40% com tiosulfato de sódio no destilador. Para a coleta do destilado, foi acoplado no destilador um Erlenmeyer com 50 mL de ácido bórico à 2% e quatro gotas de indicador misto. Com a destilação, a cor inicial roxa do líquido presente no erlenmeyer passou a tomar tonalidade esverdeada indicando a presença de nitrogênio. Em seguida, foi realizada a titulação do destilado com ácido sulfúrico 0,02N até retomar a cor roxa inicial.

A Equação 5 apresenta o cálculo utilizado para determinação de nitrogênio total.

$$NTK \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(A-B) \cdot 280 \cdot F}{V_a} \quad (5)$$

onde  $A$  é o volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação da amostra (mL),  $B$  é o volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação do branco (mL),  $F$  é o fator de correção da normalidade do ácido e  $V_a$  o volume de amostra utilizado na análise

A análise de nitrogênio total foi realizada nas amostras inicial e final dos experimentos.

### 3.3.5 Fósforo Total

Para determinar o fósforo total na amostra foi utilizado o Método SMEW\* 4500- P C publicado no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Para a realização dos procedimentos de determinação de fósforo pelo método de espectrometria utilizou-se solução estoque de  $KH_2PO_4$ , que contem  $50 \text{ mgL}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , para balões volumétricos de 50 mL.

Adicionou-se na amostra respectivamente, 20 mL de água destilada e 15 mL da solução vanadomolíbica, realizando agitação e completando o volume com água,

homogeneizando até a mesma atingir uma coloração amarela. Após um repouso de 10 min para completar o desenvolvimento da cor, fez-se a leitura da absorbância da solução em espectrofotômetro, com comprimento de onda na faixa de 400-420 nm, empregando como branco a solução com 20 mg/L de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. O cálculo da concentração de fósforo foi realizado pela Equação 6.

$$\frac{mg}{L} P_2O_5 = \frac{1,25C}{A*G} \quad (6)$$

onde  $C$  é a concentração de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na solução de leitura (mgL<sup>-1</sup>),  $A$  é o volume da alíquota tomada do extrato (mL) e  $G$  é a massa inicial da amostra (g).

A análise de fósforo total foi realizada nas amostras inicial e final dos experimentos.

### 3.4 Potencial de Geração de Energia

Para estimar a potencial geração de energia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos do restaurante popular, levou-se em consideração o poder calorífico inferior do metano adquirido através dos resultados qualitativos do biogás e a produção média de sólidos voláteis e geração diária de resíduos alimentares produzido pelo restaurante.

Quando o biogás é utilizado como combustível em um moto gerador de eletricidade, por exemplo, o rendimento teórico esperado é da ordem de 30%, indicando que a energia elétrica gerada tem o potencial de somente 30% em comparação ao motor que utiliza a gasolina como combustível (SILVA, 2018). Esse baixo rendimento ocorre por conta de que o gás possui sua energia menos concentrada em volume em comparação a gasolina (SOUZA, 2020).

A utilização do biogás como recurso energético ocorre, principalmente, por causa do metano (CH<sub>4</sub>) puro e em condições normais de pressão (1 atm) e temperatura (PTN), tendo um poder calorífico inferior (PCI) de 9,97 kWh/m<sup>3</sup>. O biogás, com um teor de metano entre 50% e 80%, terá um poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup> (COLDEBELLA *et al.*, 2006).

Através do valor obtido do poder calorífico do biogás, foi possível determinar a capacidade de conversão em eletricidade, a partir da Equação 7.

$$\text{Potencial energético } \left( \frac{kWh}{\text{dia}} \right) = \text{Produção diária de metano} * \text{Poder calorífico inferior} \quad (7)$$

Como o rendimento de motor gerador é de ordem de 30%, tem-se que a produção real de energia é equivalente à Equação 8.

$$\text{Produção real de energia } \left( \frac{kWh}{\text{dia}} \right) = \text{Potencial energético } \left( \frac{kWh}{\text{dia}} \right) * 30 \quad (8)$$

## 4 RESULTADOS

Neste sentido, para avaliar as características do resíduo orgânico, foram realizadas as análises de pH, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), Demanda Química de Oxigênio (DQO), nitrogênio (N), fósforo (P).

### 4.1 Inventário dos Resíduos Orgânicos Gerados

A Tabela 5 apresenta a massa de resíduo orgânico aferida para cada dia de coleta. (14/07/2021 a 28/07/2021).

Um ponto que deve ser ressaltado é que, a depender do dia da semana, o cardápio influenciou de forma significativa a geração dos resíduos no restaurante. Logo, houve dias com maior fluxo de pessoas, ou seja, com um cardápio mais agradável ao paladar e, também, com mais ossos, espinhas, dentre outros, interferindo diretamente no volume dos resíduos produzidos nas refeições. Outro destaque é que a pesquisa foi realizada durante a pandemia, isto é, sem sua capacidade máxima do restaurante. Como mencionado pelo proprietário, seu principal público eram os estudantes e funcionários na universidade, que não estavam comparecendo no local em função da suspensão das aulas presenciais.

Tabela 5 - Massa dos resíduos alimentares gerado pelo restaurante popular

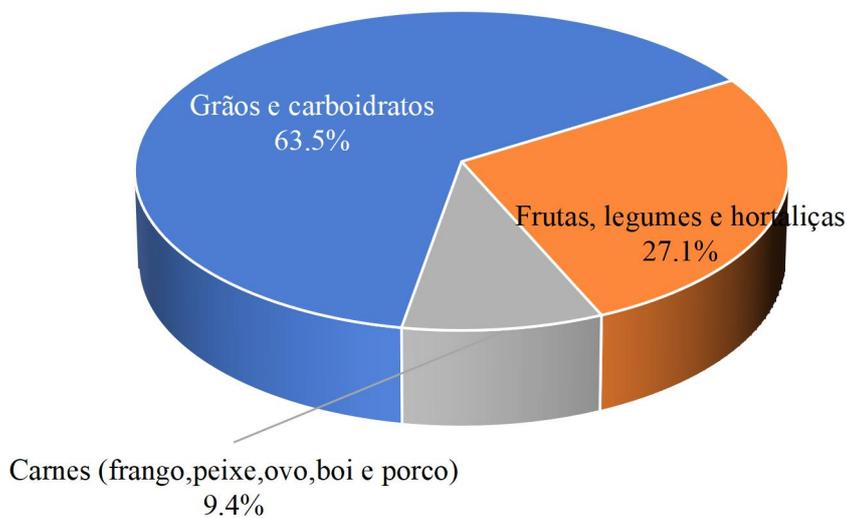
<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>
14/07 (quarta-feira)	147,24 g
15/07 (quinta-feira)	156,40 g
19/07 (segunda-feira)	197,74 g
20/07 (terça-feira)	237,57 g
21/07 (quarta-feira)	231,78 g
22/07 (quinta-feira)	286,52 g
26/07 (segunda-feira)	289,58 g

27/07 (terça-feira)	259,25 g
28/07 (quarta-feira)	254,62 g

Fonte: Acervo do autor (2021).

A Figura 9 ilustra a caracterização gravimétrica e as quantidades das frações encontradas nos resíduos orgânicos em cada grupo.

Figura 9 – Caracterização gravimétrica e quantidade de cada grupo gerado pelo restaurante



Fonte: Acervo do autor (2021).

A média de resíduos orgânicos referentes ao preparo do almoço no restaurante foi de 30 kg, como informado pelo restaurante. Segundo o restaurante, essa é uma média diária e está abaixo dos dias sem pandemia. Esse valor será utilizado no trabalho para realizar os cálculos para o potencial de geração de energia elétrica gerada com os resíduos orgânicos.

O trabalho utilizou as metodologias de Moura (2017), Mazzonetto *et al.* (2021) e Araújo *et al.* (2020), onde foram realizados levantamentos da quantidade de resíduos orgânicos desperdiçados por dia nos restaurantes universitários, no restaurante popular na cidade de Tietê/SP e nos estabelecimentos comerciais na cidade de Marabá/PA, respectivamente. Destaca-se que os trabalhos mencionados foram realizados no período de pré-pandemia, acarretando valores maiores que o encontrado nesta pesquisa. A Tabela 6 apresenta alguns valores da massa de resíduos orgânicos nos restaurantes.

Tabela 6 – Comparativo da geral total de resíduos orgânicos em restaurantes.

Referência	Estabelecimento	Resíduo Orgânico (kg)
Albertone (2013)	UTFPR	168,66
Rocha (2016)	UFJF	112,00
Sotti (2014)	UTFPR-LD	68,92
Gomes (2014)	UFMG	406,72
Menezes <i>et al.</i> (2002)	USP	268,60
Mazzonetto <i>et al.</i> (2021)	Rest. M. A. Cancian	50
Araujo <i>et al.</i> (2020)	Rest. em Marabá (médias dos restaurantes da cidade foram 184)	100

Fonte: Acervo do autor (2021).

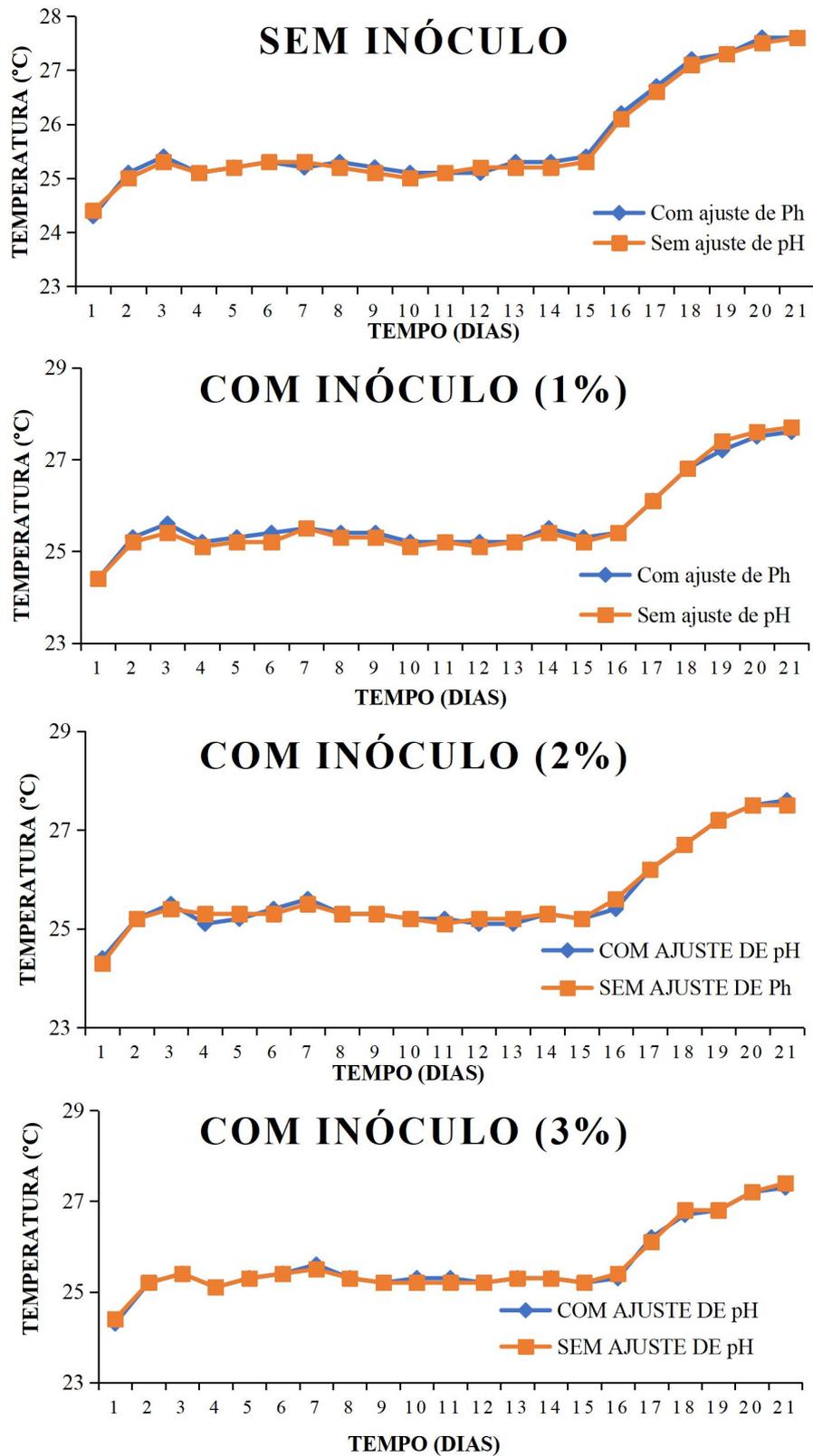
## 4.2 Temperatura

A Figura 10 ilustra as variações da temperatura média ao longo dos 21 dias de experimento nos 8 biodigestores, fazendo uma comparação com e sem ajuste de pH e nas diferentes concentrações de inóculo.

A determinação das temperaturas no interior do biodigestor foi realizada 4 vezes por dia, 2 vezes no período da manhã (8 e 11 horas) e 2 vezes no período da tarde (14 e 17 horas), sendo os dados relatados referentes à média do dia. Outro ponto importante no âmbito da temperatura é que a temperatura externa foi controlada através de ar-condicionado, a uma temperatura de 25 °C, escolha dessa temperatura se deu pois, segundo Climate-Data (2021), a temperatura anual média na cidade de Aracaju é de 25,4 °C, para se ter uma menor variação da temperatura externa, interferindo minimamente na variação da temperatura nos biodigestores.

No que tange à temperatura, os biodigestores tiveram uma variação muito pequena ao se comparar a mesma concentração de inóculo e diferenciando com ou sem ajuste de pH. O mesmo aconteceu quando se comparou as diferentes concentrações de inóculo.

Figura 10 - Variação de temperatura em diferentes concentrações de inóculo



Fonte: Acervo do autor (2021).

As maiores temperaturas dos experimentos ocorreram no biodigestor com 1% (m/v) de esterco e sem ajuste de pH, alcançando 27,7 °C. Os experimentos com 3% de inóculo terminaram o processo com temperaturas de 27,3 °C e 27,4 °C para o com ajuste e sem ajuste, respectivamente. Nos experimentos com 2% de inóculo, as temperaturas finais foram 27,6 °C e 27,5 °C para o com ajuste e sem ajuste, respectivamente. Já com 1% de esterco, o experimento com ajuste de pH alcançou 27,3 °C, enquanto o biodigestor sem inóculo terminou com a mesma temperatura de 27,6 °C, independentemente do pH. Todos os biorreatores terminaram com temperaturas acima de 27 °C e as maiores variações foram 0,4 °C, tanto no biorreator com 1% de inóculo e sem ajuste de pH quanto no biorreator com 3% de inóculo e com ajuste de pH.

Observou-se um acréscimo em torno de 1 °C nos primeiros 3 dias, seguindo por uma estabilidade até o 15º dia, quando ocorreu uma variação térmica foi de 1,7 °C. De acordo com Oliveira (2019), uma variação da temperatura em torno de 2 a 3 °C é suficiente para a mortalidade de grandes partes das bactérias digestoras e, uma variação em torno de 5 °C, a biodigestão é inviabilizada.

Para Alkanok, Demirel e Onay (2014), se a temperatura interna for maior que 10 °C, há a ação das bactérias metanogênicas, o que ocorreu nesse trabalho. Os autores ainda estimaram que temperaturas entre 35 e 40 °C permitem uma maior aceleração na biodigestão anaeróbia.

Gyalpo (2010), utilizando o biodigestor com resíduos sólidos orgânicos (RSO) de suínos a 25 °C, obteve produção de biogás durante 68 dias. E, seguida, elevou a temperatura para 45 °C, fato que elevou a produção do biogás, que ocorreu ao longo de 131 dias.

### **4.3 pH**

Em relação ao pH, a Tabela 7 apresenta os resultados do pH inicial, coletado depois do processo de trituração da amostra com água, seus ajustes e os valores de pH medidos no 7º, 14º e 21º dias, este último o pH final.

A medição do pH nos 7º e 14º dias após o início do processo de produção do biogás foi para verificar a acidez nas amostras para, assim, observar se as bactérias metanogênicas estavam em um ambiente propício para sua sobrevivência, ou seja, se ainda estava ocorrendo o processo de produção do biogás.

Após 21 dias de experimento foi realizado a medição do pH final, onde os biodigestores sem o ajuste de pH tiveram o pH menor do que foi ajustado. O experimento com inóculo a 2%, terminou com o maior pH, 4,54.

Tabela 7 – Acompanhamento pH ao longo do experimento

<b>Amostras</b>	<b>pH inicial</b>	<b>pH (1ª semana)</b>	<b>pH (2ª semana)</b>	<b>pH final</b>
Sem inóculo e sem ajuste de pH	5,55	5,23	4,12	4,13
Sem inóculo e com ajuste de pH	7,12	6,29	4,52	4,52
1% de inóculo e sem ajuste de pH	5,55	5,22	4,11	4,12
1% de inóculo e com ajuste de pH	7,12	6,27	4,50	4,53
2% de inóculo e sem ajuste de pH	5,55	5,21	4,12	4,13
2% de inóculo e com ajuste de pH	7,12	6,24	4,51	4,54
3% de inóculo e sem ajuste de pH	5,55	5,20	4,10	4,14
3% de inóculo e com ajuste de pH	7,12	6,23	4,48	4,50

Fonte: Acervo do autor (2021).

Lourenço (2019) cita que a faixa ideal de pH para a produção de biogás está entre 6,0 e 8,0 e que o desenvolvimento de ácidos orgânicos no início do processo de biodigestão anaeróbia, devido à hidrólise, leva à redução do pH. Com isso, as bactérias metanogênicas permitem a transformação de ácidos em produtos gasosos.

Fernandes (2019) relata que, quando o pH decresce para valores abaixo de 5,0, devido à produção de ácidos orgânicos pelas bactérias hidrolíticas, há uma possível interrupção no processo de fermentação e, por consequência, na produção de biogás.

#### **4.4 Produção de Biogás**

A Figura 11 apresenta os valores médios de biogás produzido por dia em cada biodigestor, fazendo uma comparação entre a mesma concentração de esterco e diferenciando o processo com e sem ajuste de pH.

É possível identificar um comportamento similar a todos os processos no que tange o início do experimento, com o início da produção de biogás a partir do 5º dia de fermentação. Uma justificativa para essa demora, segundo Gyalpo (2010), é devido à temperatura, pois a

literatura estabelece 45 °C como temperatura ideal, enquanto estes experimentos ocorreram a uma temperatura inicial média de 24,4 °C. Oliveira (2019) observou a mesma demora, iniciando a produção do biogás também a partir do 5º dia, mas em uma temperatura média de 18,3 °C, muito abaixo do ideal.

Enquanto o experimento sem inóculo e com ajuste de pH iniciou o processo de produção de biogás no 5º dia, o sem ajuste teve início no 6º dia. Todavia, após o 9º dia, o experimento com ajuste de pH apresentou um crescimento maior em relação ao sem ajuste. Os experimentos obtiveram uma estabilidade na produção de gás a partir do 11º dia. Com a finalização do experimento no 21º dia, o biodigestor sem ajuste terminou com um volume de 5 mL e o com ajuste de pH com um volume de 6 mL.

Nos experimentos com adição de 1% de inóculo no biodigestor, verificou-se nos sete primeiros dias um crescimento semelhante. A partir do 8º dia, o experimento com ajuste de pH teve uma pequena aceleração, terminando com um volume total de 7 mL, enquanto o sem ajuste de pH finalizou com um volume de 6 mL de gás. A estabilização na formação de biogás também ocorreu no 11º dia.

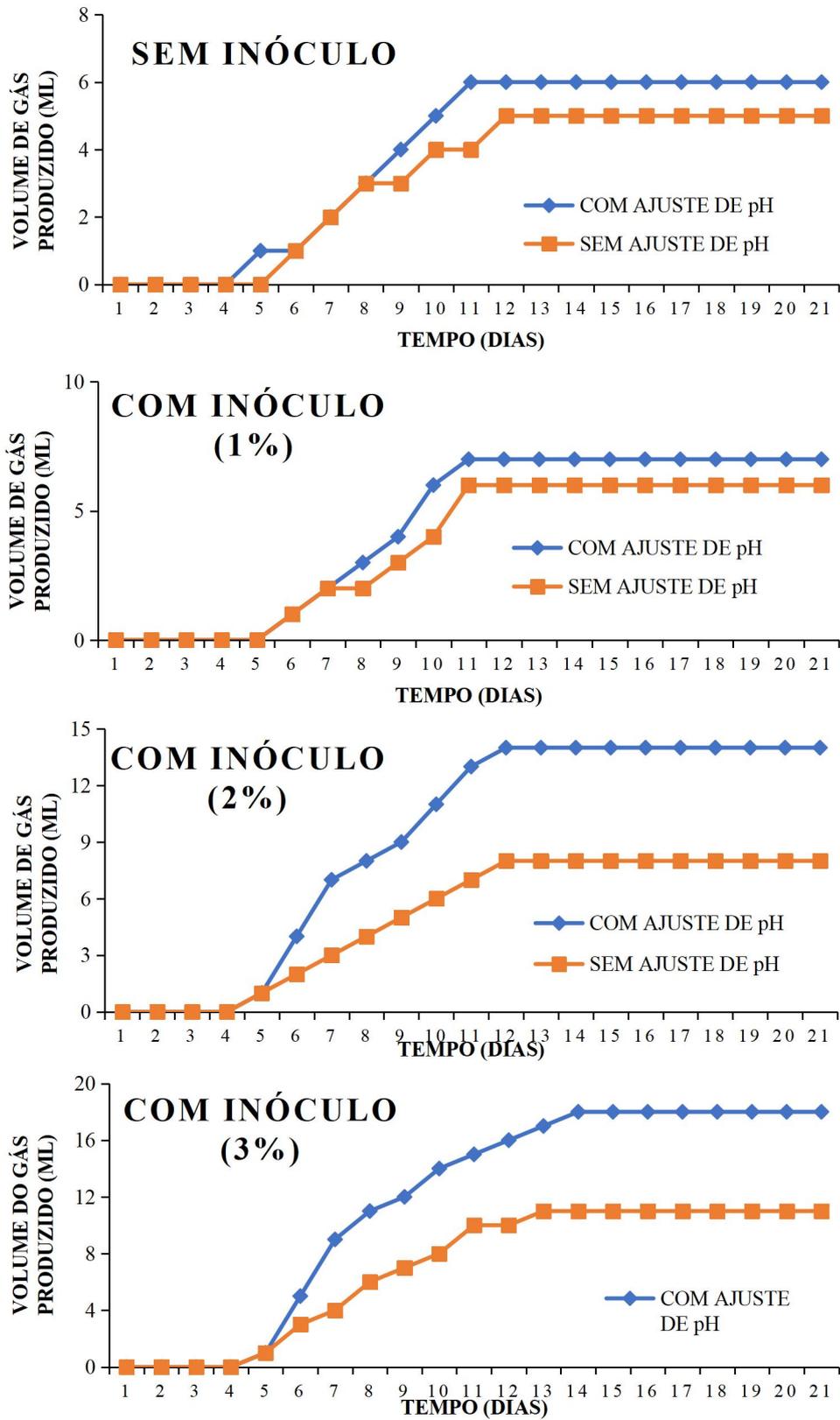
Nos experimentos com 2% de inóculo no biodigestor notou-se o início de produção no 5º dia. O biodigestor com ajuste de pH obteve uma aceleração da fabricação de biogás até 12º dia, obtendo uma estabilidade logo em seguida e, depois dos 21 dias, encerrou com a formação de 14 mL de gás produzido. O experimento sem ajuste de pH finalizou com 8 mL, um volume 43% inferior ao com controle de pH.

Para a biodigestão com 3% de inóculo, o ajuste de pH proporcionou uma produção de biogás 40% maior do que o processo sem ajuste de pH.

Todos os biodigestores tiveram uma estabilidade no final da segunda semana de experimentos. Isso pode ser justificado pela medição do pH, como exposto na Tabela 4, uma vez que na 2ª semana os valores se encontravam abaixo do recomendado na literatura ( $\text{pH} > 5,0$ ), indicando que a produção de ácidos orgânicos pelas bactérias hidrolíticas levou à interrupção no processo de fermentação e, por consequência, na produção de biogás.

A medição do biogás, como descrito na metodologia do presente trabalho, foi realizada a partir de um gasômetro, utilizando-se de uma seringa de 60 mL. Entretanto, por condições financeiras e de materiais, não foi possível realizar a análise da composição deste biogás.

Figura 11 - Volume de gás produzido em diferentes concentrações de inóculo



Fonte: Acervo do autor (2021).

Alkanol, Demirel e Onay (2016), na biodigestão de resíduos de frutas, vegetais, flores, obtiveram uma produção de 6 mL de biogás e, com biodigestão de resíduos mistos, obtiveram uma produção de 6,8 mL.

Oliveira (2019), em biodigestor contendo arroz e feijão, conseguiu uma produção de 20 mL de biogás e. no biodigestor com arroz, feijão, beterraba e alface, gerou apenas 12,5 mL.

Em comparação a esses dois trabalhos, o presente estudo teve uma boa eficiência na produção de biogás a partir de resíduos semelhantes.

#### **4.5 Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos**

A análise de sólidos é uma ferramenta importante para a identificação da fase biodegradável dos resíduos. Os sólidos totais (ST) são compostos pelos sólidos voláteis (SV), parte orgânica do resíduo, e pelos sólidos fixos (SF), parcela inorgânica. Desta forma, estudando os ST e SV é possível avaliar se a digestão anaeróbia é viável como tratamento, além do fato da produção de biogás ser fundamentada pela relação da massa de SV presentes no resíduo (ZHANG *et al.*, 2013).

Kubaská *et al.* (2010) destacam que análise de SV é fundamental para a avaliação do rendimento de biogás, uma vez que esse rendimento está relacionado ao volume de biogás produzido por unidade de SV contido no substrato e aplicado no reator por um intervalo de tempo regular, sob uma dada condição de temperatura.

A Tabela 8 apresenta os valores dos sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) durante os 10 dias de coleta dos resíduos do restaurante, além do valor médio e do desvio padrão.

A metodologia empregada para a avaliação do potencial de geração de biogás através dos resíduos alimentares do restaurante popular se fundamentou na bibliografia apresentada por diversos autores, que indicam que a porcentagem de sólidos voláteis (SV) que compõem os resíduos alimentares varia na faixa de 22,4 a 36,1% (Tabela 9).

Conforme exposto na Tabela 8, os teores de sólidos voláteis obtidos nesse estudo estão em conformidade aos parâmetros encontrados na literatura. Tais resultados também sugerem uma boa eficiência de conversão da matéria orgânica em biogás a partir do processo de digestão anaeróbia.

Tabela 8 – Análises de sólidos totais, voláteis e fixos dos resíduos coletados no restaurante popular

<b>Dia da coleta</b>	<b>Sólidos Totais (%)</b>	<b>Sólidos Voláteis (%)</b>	<b>Sólidos Fixos (%)</b>
1	23,27 ± 0,13	22,17±0,05	1,01±0,002
2	25,87± 0,27	24,09±0,24	1,78±0,11
3	30,53±0,04	29,38±0,06	1,13±0,03
4	27,46±0,12	26,15±0,16	1,31±0,02
5	28,17±0,11	26,83±0,13	1,34±0,07
6	30,65±0,06	29,32±0,09	1,33±0,04
7	28,60±0,24	27,22±0,21	1,38±0,11
8	27,95±0,16	26,56±0,18	1,39±0,11
9	24,72±0,06	23,32±0,08	1,4±0,04
10	25,40±0,08	24,24±0,10	1,16±0,05
<b>Média</b>	27,26	25,93	1,32
<b>Desvio padrão</b>	2,43	2,44	0,21

Fonte: Acervo do autor (2021).

Tabela 9 – Composição de sólidos voláteis em resíduos alimentares

<b>Autor</b>	<b>Teor de sólidos voláteis (%)</b>
Zhu <i>et al.</i> (2010)	36,10
Zhang <i>et al.</i> (2011)	26,40
Carrilho (2012)	25,0
Browne <i>et al.</i> (2012)	27,6
Malinowsky (2016)	22,4

Fonte: Acervo do autor (2021).

Percebe-se, também, que o menor teor de SV foi encontrado no primeiro dia de coleta (22,17%) e os maiores valores foram obtidos no 3º e no 6º dia (29,38 e 29,32%, respectivamente).

Uma justificativa para esses dois dias terem tido valores mais elevados, pode ser visualizada no cardápio (Tabela 2), ao disponibilizar no cardápio a bisteca, um alimento que possui uma camada de gordura e consiste em uma grande presença de água.

Segundo Silva (2018), 1 t de sólidos voláteis de substratos provenientes de resíduos alimentares produz, em média, um volume de 400 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>. Já Zhang, Lee e Jahng (2011) apresentam que 1 kg de sólidos voláteis produz 0,460 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, enquanto para Lissens *et al.* (2004), esse valor é da ordem de 0,525 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV.

#### 4.6 DQO

A demanda química de oxigênio (DQO) é um importante parâmetro para averiguar a eficiência do processo com respeito à biodegradabilidade da matéria orgânica (NEVES, 2016). Em consonância com Neves (2016), Sánchez-Reyes *et al.* (2016) acrescentam que o monitoramento da DQO auxilia na quantificação de oxigênio para degradar quimicamente a matéria orgânica que poderá ser convertida em biogás.

A análise dos valores de DQO em efluentes e em águas de superfície é uma das mais expressivas para determinar o grau de poluição da água, refletindo na quantidade total de componentes oxidáveis, seja carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, fósforo, entre outros. Ou seja, através desse parâmetro é possível identificar se houve uma redução de carga orgânica a partir do processo de biodigestão (ASSUNÇÃO, 2020).

Em processos envolvendo a produção de biogás via digestão anaeróbia é importante avaliar a evolução do conteúdo de DQO, onde o seu decréscimo ao longo do tempo de investigação pode demonstrar que o conteúdo no interior do reator apresenta menor concentração de matéria orgânica (NEVES, 2016). A Tabela 10 mostra a variação da DQO após 21 dias.

Tabela 10 – DQO presente no resíduo alimentar na entrada e saída do biorreator

Instante de coleta	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)
Inicial	1500
Final	990

Fonte: Acervo do autor (2021).

Como é possível observar, processo apresentou uma redução de 44% do conteúdo de matéria orgânica. Esta quantificação foi realizada apenas no biorreator de melhor desempenho na produção de biogás (Figura 11), ou seja, na condição de 3% de inóculo e com ajuste de pH. A justificativa para realizar o experimento no melhor teste foi devido à pandemia, onde muitos laboratórios estavam fechados e sem pessoal para auxiliar, havendo a necessidade de realizar a análise em laboratório particular, sem recursos financeiros.

Zhu *et al.* (2008) observaram durante a digestão anaeróbia de resíduos de batata a 35 °C uma redução no conteúdo de DQO de 64% no reator metanogênico. Já nos

experimentos de Neves (2016), com resíduo alimentar e lodo do tratamento de vinhaça, verificou-se que o reator teve uma redução de 48% na DQO.

Em comparação aos trabalhos mencionados, esse trabalho teve uma redução abaixo dos encontrados na literatura, indicando que ainda havia matéria orgânica no biorreator para ser biodegradada, o que pode ter acontecido em função de um controle não tão rígido do pH, como visualizado na 2ª semana de processo (pH < 5,0).

Ainda assim, a utilização de reator de metanogênico com resíduos alimentares constatou um valor alto de redução no teor de matéria orgânica. Desta forma, o uso desse sistema pode incentivar a produção de biogás, uma vez que se aproveitam resíduos antes descartados para geração de energia elétrica.

Destaca-se ainda, que o biogás tem “pegada negativa de carbono”, pois não apenas é de baixa emissão como também mitiga a poluição que seria causada em caso de não aproveitamento dos resíduos, fonte de matéria-prima. O baixo teor de carga orgânica (DQO) residual também pode ser utilizado para fertilizantes em atividades agrícolas (ZHU *et al.*, 2010), reforçando os aspectos de produção mais limpa e de sustentabilidade ambiental, energética e social.

#### 4.7 Nitrogênio e Fósforo

É de suma importância o emprego de alguns nutrientes ao sistema de biodigestão, visto que estes são fundamentais para o desenvolvimento e atividade dos microrganismos. Nitrogênio (N) e fósforo (P) são os principais nutrientes, pois se encontram diretamente relacionados à disponibilidade microbiana em alcançar energia para síntese (CHERNICHARO, 2007).

As análises de nitrogênio e fósforo foram realizadas para avaliar a capacidade de utilização do resíduo final como biofertilizante. Para isso, foram quantificadas as concentrações destes nutrientes na entrada e na saída do biorreator (Tabela 11) para verificar se o processo de digestão anaeróbia interferiu nessas concentrações.

Tabela 11 - Concentração de N e P presente no resíduo alimentar na entrada e saída do biorreator

<b>Instante de coleta</b>	<b>Nitrogênio (g/kg<sub>resíduo</sub>)</b>	<b>Fósforo (g/kg<sub>resíduo</sub>)</b>
Inicial	7,2	0,1446
Final	2,0	0,0231

Fonte: Acervo do autor (2021).

Conforme a Instrução Normativa nº 64, de 18 de dezembro de 2008, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) entende que biofertilizante é todo produto que contém componentes ativos ou agentes biológicos, capaz de atuar de forma direta ou indireta sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, melhorando o desempenho do sistema de produção e que seja isento de substâncias proibidas pela regulamentação de orgânicos.

A Instrução Normativa nº 6, de 10 de março de 2016, do MAPA trata, no capítulo VII, dos requisitos mínimos para avaliação da viabilidade e eficiência agrônômica e elaboração do relatório técnico-científico para fins de registro de produto novo – fertilizante, corretivo, biofertilizante, substrato para plantas e remineralizadores. O artigo 7 inciso 4 diz que “quando se tratar de biofertilizante, demonstrar que o produto atua, isolada ou cumulativamente, no crescimento, na ontogenia, em variáveis bioquímicas e na resposta a estresses abióticos, elevando a produtividade da cultura.”

Segundo Rêgo (2021), o biofertilizante é um subproduto líquido do processo de produção do biogás pela digestão anaeróbia. A utilização desse material que sai do biodigestor, passando posteriormente por uma estabilização, é um ótimo material para o uso como adubo orgânico, pois possui nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) que ajudam no crescimento e na produtividade da planta, e pode ocupar o lugar de fertilizantes sintéticos.

Os benefícios dos biofertilizantes também possuem cunho socioeconômico e ecológico para o agricultor, com a melhoria da fertilidade do solo e da produção agrícola. Para o ambiente, auxilia na redução da dependência de insumos externos à propriedade, além de colaborar com a redução da emissão de poluentes no meio ambiente ocasionada pela deposição dos dejetos alimentares, reduzindo o consumo de fertilizantes de origem mineral e dos gases inerentes da exploração dos minérios (SILVA; ALVES, 2019).

Foi possível observar na Tabela 11 o nitrogênio inicial foi de 7,2 g/kg de resíduos e, após o processo no biodigestor, o nitrogênio final teve um valor de 2 g/kg de resíduos. Já na análise de fósforo, o inicial teve um valor de 0,1446 e encerrou com 0,0231 g/kg. Desta forma, ocorreu uma redução nos teores tanto de nitrogênio (72,23%) quanto de fósforo (84,03%).

Como mencionado acima, estas quantificações foram realizadas apenas no biorreator de melhor desempenho na produção de biogás (Figura 11), ou seja, na condição de 3% de inóculo e com ajuste de pH.

Apesar de o nitrogênio ser fundamental para vida e desenvolvimento dos microrganismos, faz-se necessário o acompanhamento do mesmo no meio reacional, pois em altas concentrações torna-se um fator danoso ao sistema, devido ao favorecimento da formação de amônias livres (tóxicas >150 mg/L) (CHERNICHARO, 2007).

Em consonância a Chernicharo (2007), Prochazka *et al.* (2012) acrescentam que uma baixa concentração de nitrogênio (500 mg/L) causa diminuição da produção de metano, perda de biomassa e perda na atividade das bactérias metanogênicas acetoclásticas. Altas concentrações (acima de 4.000 mg/L) inibem a produção de metano, sendo a faixa ideal para concentração de nitrogênio total 2.100 a 3.100 mg/L.

De acordo com experimentos de Neves (2016), a concentração de nitrogênio na amostra utilizando resíduo alimentar e lodo do tratamento de vinhaça foi 27,32 g/kg de nitrogênio para resíduo alimentar, 0,38 g/kg para vinhaça e 0,80 g/kg para lodo.

Segundo os experimentos de Assunção (2020), que utilizou diferentes diluições do dejetos bovino e a influência nutricional (1:6 e 1:10), a concentração de nitrogênio total na amostra foi 5,6 e 3,6 mg N/L, respectivamente. Na análise de fósforo obteve 0,98 e 0,69 mg/L.

A partir de experimentos encontrados na literatura, o presente trabalho conclui que tanto nitrogênio quanto fósforo tiveram concentrações satisfatórias.

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) rege as instruções normativas para a aplicação do biofertilizante no âmbito agrícola. Portanto, para próximos estudos de produção de biogás, faz-se necessário realizar testes de crescimento em diferentes espécies de plantas para verificar a efetividade do biofertilizante.

#### **4.8 Potencial de Geração de Energia**

Os resíduos alimentares utilizados nesta pesquisa obtiveram em média 25,93% de sólidos voláteis em sua composição (Tabela 8) e, considerando a quantidade diária de 30 kg de resíduos alimentares gerados pelo restaurante, obteve-se um valor equivalente de sólidos voláteis de 7,78 kg SV/dia.

Empregando a média dos valores de potencial metanogênico dos resíduos alimentares exibida por diversos autores, chegou-se a 0,462 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, indicando que a produção diária de metano gerada pelos resíduos alimentares do restaurante popular seria equivalente a 3,6 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/dia.

Segundo os experimentos de Malinowsky (2016), para Carga Orgânica Volumétrica (COV) de 2 kg SVT/m<sup>3</sup> dia aplicados no sistema experimental, taxas elevadas de produção de biogás foram alcançadas, com uma concentração de metano em torno de 64%.

Considerando-se que porcentagem de metano na composição do biogás procedente da biodigestão dos resíduos orgânicos do restaurante popular seja equivalente a 64%, obtém-se um volume de biogás gerado igual a 5,625 m<sup>3</sup>/dia.

Para Coldebella *et al.* (2006), o biogás possui um teor de metano entre 50 e 80% e um poder calorífico inferior (PCI) entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup>. Utilizando o teor de metano de 64% para resíduos alimentares, tem-se um PCI médio de 6,34 kWh/m<sup>3</sup>. Dessa forma, tem-se a produção de 35,66 kWh/dia de biogás em um restaurante popular.

No entanto, como já mencionado anteriormente, a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica com grupos geradores (motores ciclo Otto) é de aproximadamente 30%, tornando a produção real de energia equivalente a 10,70 kWh/dia, ou seja, 321 kWh/mês.

Através de cálculos tarifários apresentados pelo site da companhia elétrica ENERGISA, foi possível obter o preço cobrado pelo kWh ao grupo a qual o restaurante está incluído, sendo o valor obtido de R\$ 0,49209 por kWh consumido na tarifa verde. Desta forma, o biogás gerado pelos resíduos alimentares do restaurante popular, poderiam representar uma economia aproximada de R\$ 157,97/mês.

## 5 CONCLUSÕES

Conforme apresentado no trabalho, a sociedade e a administração pública, se esbarram com um grande desafio em relação a gestão de resíduos sólidos. Uma vez que sua produção vem aumentando anos após anos devido a intensificação das atividades humanas. Diante desse cenário, a sociedade vem enfrentando obstáculo no que se refere ao manejo e na disposição correta para os mesmos.

Quando esses dejetos são enviados para uma disposição de forma inadequada, como é o exemplo dos lixões, geram grande problemas para o meio ambiente e para a sociedade, como exemplo, a poluição os lençõs freáticos e contaminação do solo através do chorume e a poluição do ar, pela geração do metano, cuja emissão para atmosfera contribui para o aumento do aquecimento global.

Este trabalho apontou que, por meio de uma gestão eficiente no que tange os resíduos sólidos orgânicos é possível aproveitar o potencial energético desses resíduos através da transformação em biogás e conseqüentemente diminuir o consumo de combustíveis fósseis, reaproveitando os resíduos no qual seria destinado ao aterro sanitário, e com isso, reduzindo os impactos ambientais e contribuindo para melhoria social e econômico.

O presente trabalho conclui que utilizar os resíduos sólidos orgânicos para produção de biogás para a produção de geração de energia é uma alternativa interessante conforme a redução da conta de energia elétrica no final do mês para o estabelecimento. Conforme o potencial de geração de energia, a produção de energia foi de 321 kWh/mês.

Utilizando os cálculos tarifários apresentados pela companhia elétrica atuante no Estado de Sergipe, a ENERGISA, foi possível obter o preço cobrado pelo kWh ao grupo no qual o restaurante está incluso e o valor de consumo por kWh na tarifa verde (R\$ 0,49209). Os resultados deste estudo mostraram que o biogás gerado pelos resíduos alimentares do restaurante pode gerar um ganho de R\$ 157,97/mês. Tem que ser ressaltado que essa pesquisa foi feita durante a pandemia, logo teve uma redução de resíduos orgânicos despejados, e com isso, tem tempos sem pandemia a geração de resíduos seria maior e por conseqüência a geração de energia elétrica aumentaria.

Também deve ser ressaltada a implantação de um sistema de geração de energia em um estabelecimento tem custo elevado, visto que os equipamentos como o motor de ciclo otto,

que vai transformar a energia do biogás em energia elétrica, tem um preço alto e também para a sua implantação.

Devido a capacidade de geração de energia elétrica e às vantagens apresentadas, a proposta deste trabalho utilizando os resíduos orgânicos digeridos anaerobicamente, utilizando esterco de caprinos como inóculo, geraram resultados satisfatórios quando comparados a outros estudos encontrados na literatura, ainda que a temperatura e o pH ácido possam ter acarretado um rendimento inferior e a produção de biogás não tenha atingido sua produção máxima.

De acordo com os resultados alcançados no estudo, o melhor desempenho em relação ao volume de biogás produzido usando resíduos orgânicos do restaurante popular com o uso de esterco de caprinos como inóculo foi dado pela mistura de 250 mL de resíduo orgânico, 3% de esterco de caprinos como inóculo e pH ajustado inicialmente na faixa de 7,12, resultando na produção de 18 mL de biogás durante 21 dias de experimento, em uma temperatura ajustada em 25 °C.

Recomenda-se, em estudos futuros, a adição de neutralizadores como pré-tratamento para que todo o processo ocorra na faixa ideal de pH para produção de biogás. Já no contexto da temperatura, recomenda-se um equipamento que controle melhor a sua variação em ambiente externo. Para verificar a efetividade do biofertilizante, faz-se necessária a realização de testes de crescimento com diferentes espécies de plantas, seguindo as instruções normativas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e por fim, realizar um estudo para implantação de um sistema geração de energia.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 8.419**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo. 2019.
- ALBERTONI, T. A. **Caracterização física dos resíduos sólidos gerados em restaurante universitário**. 2013. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.
- ALKANOK, G.; DEMIREL, B.; ONAY, T. T. **Determination of biogás generation potential as a renewable energy source from supermarket wastes**. Waste Management, v. 34, n. 1, p. 134-140, 2014.
- ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G.; **Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental**. São Paulo, 2007.
- ALVES, I. R. F. S.; **Avaliação da codigestão na produção de biogás**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de informações de geração**. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp)>. Acesso em 18 de março de 2020
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19<sup>a</sup> ed. Washington, D.C, 1995.
- APHA,; AWWA; WEF – WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION; AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater. american public health association (apha)**: Washington, DC, USA, 2005
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22<sup>a</sup> ed. Washington, D.C, 2012.

**Apostila de Química Sanitária e Laboratório de Saneamento II**, CESET/UNICAMP, Profa. Dra. Maria Aparecida C. de Medeiros e colaboradores, 2002.

ARAÚJO, C. S.; RODRIGUES, G.; SIQUEIRA, J. L. P.; ALBINO, U. B. **Resíduos sólidos orgânicos gerados nos estabelecimentos comerciais de Marabá - PA, do problema às soluções**. Braz. J. of Develop, Curitiba. 2020.

ASSUNÇÃO, G. P. **Avaliação da produção de metano no biogás frente a diferentes diluições do dejetos bovino e a influência nutricional**. 2020. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Goiás. Catalão – Goiás.

BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Brasília. Brasília – Distrito Federal.

BATTISTI, A. C.; BITTENCOURT, E. S.; FONTES, C. H. O.; FILHO, S. A.; FERREIRA, A. M. S.; **Avaliação técnica e econômica do biogás gerado no aterro sanitário de Vitória da Conquista- Bahia para aproveitamento energético**. XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2017.

BELONI, M. V.; FERREIRA, N. S.; IGNACCHITI, M. D.C.; OTENIO, M. H.; RESENDE, J. A. **Biodigestão anaeróbia: uma alternativa viável para a redução dos impactos causados pelos dejetos da pecuária leiteira**. Tópicos Especiais em Ciência Animal IX. 2020

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. **Biogás: a próxima fronteira da energia renovável**. 2018. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogasproxima>. Acesso em: 08 de outubro de 2021.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterro sanitários: estudo de caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.

BRASIL. Lei nº 12.305, 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências**. Brasília, 2010.

BROWNE, J. D.; MURPHY, J. D. **Assessment of the resource associated with biomethane from food waste**. Appl. Energy, v. 104, p. 170-177, 2012

CARDOSO FILHO, E. P.; **Fatores que influenciam na digestão anaeróbica de efluentes líquidos**. CETESB, 2001.

CARRILHO, N. F. Q. **Valorização de Bio-resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de Estudo: Campus da FCT/UML**. 2012 Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa – Portugal.

CASTANHO, D., S.; ARRUDA, H., J. **Biodigestores**. VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brasil, 2008.

CHAVES, Y. A. O. **Análise de Viabilidade de um Sistema Híbrido alimentado por Biogás e Energia Solar**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Instituto Policlínico de Bragança, Bragança – São Paulo.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic Reactors**. Londres: IWA Publishing, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios-Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, 2da Ed., vol. 5. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CLIMA-DATA. **Dados climatológicos da cidade de Aracaju/ Sergipe**. 2021 Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sergipe/aracaju-2192/> Acesso em: 27 de setembro de 2021.

CNM – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS MUNICIPIOS. **Diagnóstico municipal para a política nacional de resíduos sólidos**. Disponível em: < <http://www.lixoes.cnm.org.br/>>. Acesso em 17 de agosto de 2021.

CNTL - CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS. **Implementação de Programas de Produção mais limpa**. Porto Alegre: SENAI, 2003.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite**. AGRENER, São Paulo, 2006.

CORDEIRO, F. B. **Análise de tecnologias de digestão anaeróbia para tratamento de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.

CREA/SE – CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DE SERGIPE. **Fechamento de lixões em Sergipe**. Disponível em: < <http://www.crea-se.org.br/fechamento-de-lixoes-em-sergipe-e-lembrado/>>. Acesso em 17 de março de 2020

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. 2008. Disponível em:< [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores\\_000g76qdzev02wx5ok0wt-edt3spdi71p.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wt-edt3spdi71p.pdf)>. Acesso em: 10 dezembro 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inventario energético dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2014.

ENERGISA. **Tarifa de Energia Elétrica**. 2021. Disponível em:< <https://www.energisa.com.br/Paginas/simulador-tarifa-branca.aspx>>. Acesso em: 13 de setembro de 2021.

FERNANDES FILHO, A. C.; SANTANA, C. O. S.; GATTAMORTA, M. A. **Utilização de biodigestores para geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos no Brasil**. INOVAE – Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation, v. 6, p. 67-84, 2018.

FERNANDES, F. P. **Produção de biogás a partir de biomassa ruminal de diferentes grupos genéticos de ovinos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Maranhão. Chapadinha, Maranhão.

FERREIRA, W. R. **Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do estado de Minas Gerais no horizonte de 2050**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso**. 2011. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo – São Paulo.

FNR. Fachagentur Nachwachsende Rohstoff. **Guia prático do biogás: Geração e utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor (BMELV), 2010.

- FONSECA, M. A. P.; MARTINS, M. F.; **Produção mais limpa no setor de cachaça: estudo em um engenho no estado da Paraíba**. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. 2018.
- FRIGO, K. D. A.; FEIDEN, A.; GALANT, N. B.; SANTOS, R. F.; MARI, A. G.; FRIGO, E. P. **Biodigestores: seus modelos e aplicações**. Acta Iguazu, Cascavel, v. 4, n.1, p. 57-65, 2015.
- GIACOBBO, D. G.; FROTA, L. M. **AGRO – O papel do agronegócio brasileiro nas novas relações econômicas mundiais**. Synergia Editora. São Paulo, 2021.
- GONÇALVES, M. N. **Os efeitos da temperatura na produção de biogás em biodigestores**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Minas Gerais.
- GOMES, J. N. C. **Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do campus Pampulha da UFMG**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais.
- GRANDO, R. L.; ANTUNES, A. M.; FONSECA, F. V. Estudo prospectivo da cadeia produtiva do biogás. *Ciência e Tecnologia: Fatec - JB, Jaboticabal (SP)*, v.8, n.1, p.73–88, 2016
- GYALPO, T. **Anaerobic digestion of canteen waste at a secondary school in Dar es Salaam, Tanzania**. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland. 2010.
- HAKAWATI, R.; SMYTH, B. M.; MCCULLOUGH, G.; DE ROSA, F.; ROONEY, D. **What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?** *Applied Energy*, v. 206, p. 1076–1087, 2017.
- HENRIQUES, R. M.; **Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação**. 2009. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008**. Brasília: IBGE, 2008.

IENGEPE. **Biodigestores**. 2012. Disponível em: < <http://www.iengep.com.br> >. Acesso em 16 de outubro de 2019.

INTERNATIONAL, R. **Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area - Final Report. Report to SMUD Advanced Renewable and Distributed Generation Program** – Ris International Ltda. and MacViro Consultants Inc. Sacramento, EUA. 2005.

ITP – INSTITUTO TECNOLÓGICO E DE PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Rotas tecnológicas integradas**. 2018. Disponível em: < [https://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=1427](https://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1427)>. Acesso em: 06 de outubro de 2021.

ITPS – INSTITUTO TECNOLÓGICO E DE PESQUISA DO ESTADO DE SERGIPE. **Amostra e Ensaio**. 2021.

JORGE, L., H., A.; OMENA, E. Biodigestor. **Dossiê Técnico**. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Março, 2012.

JUSTINO, C. E. G. **Avaliação técnico-econômica de processos de aproveitamento de biogás para a produção de energia**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal Fluminense. Niterói – Rio de Janeiro.

KELLEHER, M.; **Anaerobic Digestion Outlook for Msw Streams**. BioCycle. Vol. 48, N. 8, p. 51, 2007.

KUBASKÁ, M; SEDLÁČEK, S.; BODÍK, I; KISSOVÁ, B. **Food Waste as Biodegradable Substrates for Biogas Production**. In: 37th International Conference of SSCHE. Tatranské Matliare, Slovakia, 2010.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. **Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, n. 2, p. 229-232, 1999.

LISSENS, G.; THOMSEN, A. B.; BAERE, L.; VERSTRAETE, W.; AHRING, B. K. **Thermal wet oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste**. Environmental Science & Technology, 2004.

LOURENÇO, V. A.; NADALETI, W. C.; VIEIRA, B. M.; LEANDRO, D.; SILVA, M. A.; SANTOS, R. F.; SANTOS, G. B.; VALENTINI, M. H. K.; SCHOELER, G. P.; KOSCHIER, I. F.; DUARTE, V. H.; CORRÊA, A. G. **Produção de biogás via codigestão anaeróbia de efluente da parboilização de arroz e resíduos orgânicos**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.4, p.219-231, 2019

LOMBARD, X.KHAIRALLAH, P. **Return of experience for microturbines running on landfill gas / waste water in Europe**. Bioturbine Project Workshop. Belgium. 2004.

MACHADO, A. R. **Potencialidades e desafios da utilização de biogás para transporte e geração de energia**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, Santa Maria, Rio Grande do Sul.

MAGALHÃES, E. A.; SOUZA, S. N. M.; AFONSO, A. D. L.; RICIERI, R. P. **Confecção e avaliação de um sistema de remoção de CO<sub>2</sub> contido no biogás**. Acta Scientiarum Technology, Maringá, v. 26, n. 1, p. 11-19, 2004.

MALINOWSKY, C. **Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - Santa Catarina.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Regulamento Técnico para os Sistemas Orgânicos de Produção Animal e Vegetal**. 2008 Disponível em < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/vigilancia-agropecuaria/ivegetal/bebidas-arquivos/in-no-64-de-18-de-dezembro-de-2008.pdf/view>>. Acesso em: 20 de setembro de 2021.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 6, DE 10 DE MARÇO DE 2016**. Disponível em < [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393222/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-6-de-10-de-marco-de-2016-21393092](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393222/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-6-de-10-de-marco-de-2016-21393092)>. Acesso em: 20 de setembro de 2021.

MAZZONETTO, A. W.; CARNIEL, R. B. F.; CATALA, L. B.; PEDRO, A. da C. **Avaliação do potencial energético dos resíduos orgânicos de um restaurante de Tietê/SP – um estudo de caso**. Bioenergia em revista. São Paulo, 2021.

MENEZES, R. L.; SANTOS, F. C. A.; LEME, P. C. S. **Projeto de minimização de resíduos sólidos no restaurante central do campus de São Carlos da Universidade de São Paulo**. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002.

METHANVM. **Plataforma de metanização de resíduos orgânicos - pMethar Aplicação Digestão Anaeróbia descentralizada e em pequena escala**. 2020. Disponível em: <Aplicação[https://www.globalmethane.org/documents/5.msw1.4.Colturato%20\(1\).pdf](https://www.globalmethane.org/documents/5.msw1.4.Colturato%20(1).pdf)>. Acesso em: 06 de outubro de 2021.

MINISTÉRIO DA CASA CIVIL. **Energia elétrica sustentável**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2020/outubro/governo-federal-inaugura-uma-das-maiores-plantas-de-biogas-no-mundo-para-geracao-de-energia-eletrica-sustentavel>>. Acesso em: 08 de outubro de 2021.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **PROBIOGÁS - o estado da arte da tecnologia de metanização seca**, 2015. Disponível em: <[www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-metanizacao-rsu.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-metanizacao-rsu.pdf)>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **RENOVABIO**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabioova>>. Acesso em: 08 de outubro de 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Metas individuais compulsórias definitivas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para 2021**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/metas-individuais-compulsorias-definitivas-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-2021>>. Acesso em: 08 de outubro de 2021.

MITTAL, S.; AHLGREN, E. O.; SHUKLA, P. R. **Barriers to biogás dissemination in India – A review**. Energy Policy, v. 112, p. 361-370, 2018.

MOURA, R. P.; **Avaliação do potencial de geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do restaurante universitário central da UFRJ**. 2017. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.

NELSON, D. L.; COX, M. M. livro **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. 7.ed. Artmed Editora. Porto Alegre, 2018.

NEVES, G. N.; **Produção de hidrogênio e metano via codigestão anaeróbia em reatores de dois estágios a partir de resíduo alimentar e lodo do tratamento de vinhaça**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas – São Paulo.

OLIVEIRA, D. E. P. **Estudo de viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado pela biodigestão de resíduos sólidos orgânicos de uma central de abastecimento paulista**. 2019. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis), Universidade Nove de Julho, São Paulo – São Paulo.

OAB/SE – ORDEM DE ADVOGADO DO BRASIL EM SERGIPE. **Problemas dos lixões e o processo de coleta no estado**. Disponível em: <<http://oabsergipe.org.br/blog/2019/07/04/oab-discute-em-audiencia-publica-os-problemas-dos-lixoes-e-o-processo-de-coleta-no-estado/>> Acesso em 17 de março de 2020.

PAZ, Y. G.; JUÁREZ, O. A. **Efeito del ph e de la temperatura sobre la producción de biogás em um reator tipo CSTR em lote a partir de vinazas tequileras**. Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable. 2020.

PECORE, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residual da USP – estudo de caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo – São Paulo.

PEREIRA, J. C. **Motores e geradores – princípios de funcionamento, instalação e manutenção de grupos diesel geradores**. Disponível em: <[www.joseclaudio.eng.br](http://www.joseclaudio.eng.br)>. Acesso em 05 de outubro de 2021.

PEREIRA, M. W.; CASTILHOS, A. B. **Simulação da geração de biogás: estudo de caso aterro de Brusque/SC**. REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA, v. 12, n. 3, p. 30-42, 2018.

PORTAL SANEAMENTO BÁSICO. **Número de aterros sanitários será reduzido em Sergipe**. 2018. Disponível em: <<https://www.saneamentobasico.com.br/numero-de-aterros-sanitarios-em-sergipe/>>. Acesso em: 10 dez. 2019

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Primeira unidade de biometanização da América Latina.** 2018. Disponível em:

<<http://www.rio.rj.gov.br/web/guest/exibeconteudo?id=8806038>>. Acesso em 06 de outubro de 2021.

PROCHAZKA, J.; DOLEJS, P.; MÁCA, J.; DOHÁNYOS, M. **Stability and inhibition of anaerobic processes caused by insufficiency or excess of ammonia nitrogen.** Appl Microbiology and Biotechnology. 2012.

RAJENDRAN, K.; KANKANALA, H. R.; LUNDIN M.; TAHERZADEH, M. J. **Bioresource technology a novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus.** Bioresource Technology, v. 168, p. 7-13, 2014.

RÊGO, J. O.; BRANDÃO, M. C. P.; NETO, A. B. T.; CAVALCANTE, L. A. P. **Análise de viabilidade de geração de energia e produção de biofertilizantes a partir de dejetos animais em uma fazenda no Sul da Bahia.** Revista Brazilian Journal of Development. 2021.

ROCHA, C. **Proposta de Implantação de um Biodigestor Anaeróbio de Resíduos Alimentares.** Juiz de Fora: UFJF, 2016.

RODRIGUES, J. **Energias renováveis se tornam uma opção para moradores do Cone Sul.** 2019. Disponível em:< <http://www.morcegada.unir.br/?p=995>>. Acesso em 12 dez. 2019

RODRIGUES, N.S.; BLANS, N. B.; SCLINDWEIN, M. M. **Uso de biodigestores para impulsionar a sustentabilidade ambiental.** Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 1, p. 462-487, 2019.

SÁNCHEZ-REYES, C.; PATIÑO-IGLESIAS, M. E.; ALCÁNTARA-FLORES, J. L.; REYES-ORTEGA Y.; PÉREZ-CRUZ, M. A.; ORTÍZ-MUÑOZ, E. **Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares.** Rev. Int. Contaminacion Ambiental 2016.

SANTOS, R. C.V.; MARQUES, R. F. P. V., SILVA, A. M.; RIBEIRO, A. G. C., VICTÓRIA, L. C. **Avaliação dos parâmetros de um biodigestor para tratar lixiviados de resíduos sólidos urbanos.** Sustentare, Três Corações, v. 1, n. 1, p. 45-56, 2017.

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MARCHETTI, D. A. B. **Construção e funcionamento de biodigestores.** Brasília: Embrapa - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1981.

- SIEBERT, C. M. **Avaliação de desempenho de uma planta microgeradora de energia elétrica a partir do biogás**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel – Paraná.
- SILVA, V. L.; ALVES, W. C. **Análise físico-química de biofertilizante oriundo da decomposição anaeróbica de dejetos bovinos**. *Gestão & Tecnologia*, Goiânia, v. 1, n. 28, p. 51–61, 2019.
- SILVA, M. A. Z.; SILVA, H. de O. F.; ALVARES, I. L. **Dimensionamento de biodigestores batelada através do método primal dual barreira logarítmica**. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, v. 6, n. 1, 2018.
- SILVA, A. C. G.; TREVISAN, G. M. **Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado**. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.2, p.197-210, 2019.
- SILVA, J. C. **Estudo da metanização de resíduos alimentares como fonte de energia no restaurante universitário da UFSC**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – Santa Catarina.
- SILVA FILHO, J. C. G.; CALÁBRIA, F. A.; SILVA, G. C. S.; MEDEIROS, D. D. **Aplicação da Produção mais Limpa em uma empresa como ferramenta de melhoria contínua**. São Paulo Jan./Apr. 2007
- SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; SAQUET, M. A.; ALVES, A. F. **Produção de biogás como alternativa energética sustentável: perspectivas de desenvolvimento territorial com autonomia**. *Revista Orbis Latina*. 2019.
- SOTTI, G. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. 2014. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina – Paraná.
- SOUZA, A. A. **Estudo de caso de geração distribuída com biogás no aterro municipal de Cascavel – PR**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná.
- STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; AMARAL, A. C. do; MOTA, S.C.A. **Avaliação da produção de biogás de resíduos de incubatório de ovos**. Bento Gonçalves: Anais do 4º Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental na Agropecuária, 2014.

TCHOBANOGLIOUS, G.T.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. **Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues**. New York: McGraw-Hill, 1993. 978p.

TECNAL. **Phmetro**. 2021. Disponível em: < [https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/11271\\_medidor\\_de\\_ph\\_microprocessado](https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/11271_medidor_de_ph_microprocessado)>. Acesso em 17 de agosto de 2021.

TEIXEIRA, R. A. **Digestão anaeróbica e potencial de geração de biogás a partir da borra de café**. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Sustentável). Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória – Espírito Santo.

UNEP: United Nations Environmental Program. **Marco Global para Ação em Produção e Consumo Sustentável**. Disponível em <<https://www.unep.org/pt-br/news-and-stories/story/environmental-moments-un75-timeline> />. Acesso em: 04 de fevereiro. 2020.

YENIGÜN, O.; DEMIREL, B. **Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review**. Process Biochemistry, v. 48, n. 5-6, p. 901-911, 2013.

YIN, Y.; MA, Z.; NONG, G.; WANG, S. **Strategies of energy management in a cassava starch plant for increasing energy and economic efficiency**. Journal of Cleaner Production, v. 234, p. 1296–1305, 2019.

WALKER, M.; BANKS, C.J.; HEAVEN, S.; **Two-stage anaerobic digestion of biodegradable municipal solid waste using a rotating drum mesh filter bioreactor and anaerobic filter**. Bioresource Technology. 2009

ZHANG, L.; LEE, Y.; JAHNG, D. **Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements**. Bioresource Technology, v. 102, n. 8, p. 5048-5059, 2011.

ZHANG, C.; LEE, Y.; JAHNG, D. **Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system**. Bioresource Technology, v. 145, p. 10-16, 2013.

ZHU, H., STANDY, A.; BÉLAND, M.; SETO, P. **Co-production of hydrogen and methane from potato waste using a two-stage anaerobic digestion process**. Bioresour Technol, 2008.

ZHU, B.; ZHANG, R.; GIKAS, P.; RAPPORT, J.; JENKINS, B. M.; LI, X. **Biogas production from municipal solid wastes using an integrated rotary drum and anaerobic-phased solids digester system.** Bioresource Technology, v. 101, n.16, 2010

ZONER, T. A.; BONGIOVANNI, S. **Gestão de resíduos sólidos do município de Tibagi/PR: Desempenho da coleta seletiva.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 8, n. 8, p. 1591-1601, 2012.