

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA - FAEN
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

GABRIEL ALVES FANALI

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFGD**

Dourados – MS

2023

GABRIEL ALVES FANALI

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFGD**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federal da Grande Dourados, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia. Sob a orientação do Prof. Me. Antônio Carlos Caetano de Souza.

Dourados – MS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

F199a Fanali, Gabriel Alves

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS
A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA
UFGD [recurso eletrônico] / Gabriel Alves Fanali. -- 2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Antônio Carlos Caetano de Souza.

TCC (Graduação em Engenharia de Energia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Resíduos orgânicos. 2. Biogás. 3. Restaurante Universitário. 4. Viabilidade econômica. I.
Souza, Antônio Carlos Caetano De. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

ANEXO G – ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 15:30 horas do dia 08 de MAIO de 2023, realizou-se no(a) GOOGLE MEET (apresentação virtual) (local) a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia, intitulado (vide título abaixo)*

de autoria do(a) discente GABRIEL ALVES FANALI, como requisito para a aprovação no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II. Após a defesa e posterior arguição, a banca examinadora concluiu que o Trabalho apresentado deve ser:

Aprovado

Reprovado

O(A) discente declara ciência de que a sua aprovação está condicionada à entrega da versão final (encadernada, corrigida e assinada) do Trabalho de Conclusão de Curso, nos termos em que especifica o regulamento do componente curricular, em anexo ao Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Energia da UFGD. O(A) orientador(a) se responsabilizará pela verificação e aprovação das correções do manuscrito feitas pelo(a) discente para a elaboração da versão final.

OBSERVAÇÕES ADICIONAIS

FAZER AS CORREÇÕES SOLICITADAS PELA BANCA

DISCENTE

Nome: GABRIEL ALVES FANALI Assinatura: Gabriel Alves Fandi

BANCA EXAMINADORA

Orientador: ANTONIO C.C. SOUZA Assinatura: Antonio C.C. Souza

Membro: IZABELLE M. LOPES Assinatura: Izabelle L

Membro: OMAR SEVE Assinatura: Omar Seve

* - análise de viabilidade econômica do potencial de geração de biogás a partir de resíduos alimentares do restaurante universitário da UFGD.

Dedico esta monografia a meu querido avô Maurilo Alves (in memoriam), cuja presença foi essencial na minha vida e ausência é profundamente sentida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Alline e Anderson, pela minha criação, sempre me incentivando a estudar e a correr atrás dos meus objetivos, além de todo o suporte fornecido para que eu pudesse realizar o sonho de cursar uma universidade.

Aos meus irmãos, Aislan e Pedro, que mesmo longe sempre estiveram presentes no meu dia a dia de alguma forma.

À Júlia, minha companheira, por todo o suporte emocional e incentivo durante a realização deste trabalho.

À Beatriz e Dante, por toda a diversão que passamos juntos enquanto estive em Primavera.

Aos meus amigos de Dourados e Primavera que sempre me apoiaram.

À minha avó Iracema por todo o incentivo.

À Universidade Federal da Grande Dourados, nela obtive conhecimentos que me agregaram a ter um novo olhar sobre a vida, a sociedade e me tornar um ser humano melhor.

Ao Prof. Me. Antônio Carlos Caetano de Souza pela orientação e por todo o suporte durante a realização deste trabalho.

Aos professores que tive contato e sempre me despertaram a vontade de aprender.

Aos funcionários do restaurante universitário que contribuíram para que essa monografia pudesse ser realizada.

“Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas transformam o mundo.”

(Paulo Freire)

RESUMO

Aproximadamente 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos são descartadas anualmente pelo mundo, cerca de 81 milhões de toneladas somente no Brasil, sendo 46,5% de resíduos orgânicos. O processo de biodigestão anaeróbia oferece, como um dos produtos finais, uma mistura de gases, denominado biogás, composta basicamente de metano CH_4 e dióxido de carbono CO_2 , podendo apresentar quantidades menores de gás sulfúrico H_2S , nitrogênio N_2 e hidrogênio H_2 , entre outros, estando o seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa. O biogás pode ser empregado na geração para energia térmica, energia elétrica ou biocombustível. Analisou-se a viabilidade econômica do potencial de geração de biogás a partir dos resíduos alimentares do restaurante universitário da Universidade Federal da Grande Dourados, com a utilização de cenário 1 que utiliza o biogás gerado para a substituição do GLP e de cenário 2 que utiliza o biogás gerado para a geração de energia elétrica. Para a análise econômica foi-se utilizado parâmetros para análise de viabilidade de projetos como: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e *Payback*. No cenário 1 obteve-se uma capacidade de produção de biogás equivalente em GLP de 374,55 kg/mês, com um investimento inicial de R\$258.720,00 para a aquisição de 16 unidades do biodigestor Homebiogás 7.0. Em relação à análise de viabilidade econômica o *Payback* se deu em 8 anos sem incluir o lucro gerado pelo biofertilizante, resultando em um cenário rentável financeiramente. Quanto ao cenário 2, observou-se uma capacidade de geração de energia de 1.258,40 kWh/mês, com um investimento inicial de R\$161.994,52 para a construção de um biodigestor modelo indiano e a aquisição de um grupo moto gerador Enermac ENGGB 30kVA. No que diz respeito à análise de viabilidade econômica o *Payback* foi menor que o observado no cenário 1, tendo o investimento retornado em 6 anos, mostrando um cenário rentável financeiramente. A implantação de um dos dois cenários seria responsável por diminuir a emissão de dióxido de carbono em aproximadamente 59 toneladas/ano. Por fim, conclui-se que digestão anaeróbica de resíduos orgânicos possui potencial para aplicação em diversos contextos, inclusive para uso doméstico, onde o Brasil possui capacidade de se tornar referência mundial na questão do tratamento de resíduos sólidos urbanos e possivelmente de desenvolver tecnologias que reduzam os custos para aplicação deste projeto.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos; Biogás; Restaurante Universitário; Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Approximately 2 billion tons of urban solid waste are disposed annually worldwide, 81.81 million tons only in Brazil, 46.5% of which are organic waste. Anaerobic digestion of organic waste is the process without the presence of oxygen that enables the production of biogas, whose composition is mainly by methane, carbon dioxide and other gases in lower percentages. Biogas can be used in conversion to thermal energy, electric energy or biofuel. In this context, the research analyses the economic viability of the potential for biogas generation from food residues of the university restaurant of the Federal University of Grande Dourados using scenario 1 that uses biogas generated for the replacement of LPG, and scenario 2 that uses the biogas generated for the generation of electrical energy. For the economic analysis was used parameters for feasibility analysis of projects such as: Net Present Value, Internal Rate of Return and Payback. In scenario 1, an equivalent LPG biogas production capacity of 374.55 kg/month was obtained, with an initial investment of R\$258,720.00 for the acquisition of 16 units of the HomeBiogas 7.0 biodigester. Regarding the economic feasibility analysis, Payback occurred in 8 years without including the profit generated by the biofertilizer, resulting in a financially profitable scenario. As for scenario 2, a power generation capacity of 1,258.40 kWh/month was observed, with an initial investment of R\$161,994.52 for the construction of an Indian model biodigester and the acquisition of an Enermac ENGGB 30kVA motor generator set. Regarding the economic viability analysis, Payback was lower than that observed in scenario 1, and the investment returned in 6 years, showing a financially profitable scenario. The implementation of one of the two scenarios would be responsible for reducing carbon dioxide emissions by approximately 59 tons/year. Finally, it is concluded that anaerobic digestion of organic residues has a potential for application in various contexts, including for domestic use, where Brazil has the capacity to become a world reference in the treatment of urban solid waste and possibly develop technologies that reduce costs for the application of this project.

Keywords: Organic waste; Biogas; University restaurant; Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gravimetria dos RSU no Brasil em 2020.	20
Figura 2 - Processo de fabricação do biogás e suas utilidades.	22
Figura 3 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia.	25
Figura 4 - Biodigestor chinês.....	28
Figura 5 - Biodigestor indiano.....	29
Figura 6 - Foto Biodigestor Indiano	29
Figura 7 - Biodigestor canadense.	30
Figura 8 - Biodigestor canadense projeto	31
Figura 9 – Diagrama esquemático Biodigestor UASB.....	32
Figura 10 - Biodigestor UASB	33
Figura 11 - HomeBiogás 7.0.	34
Figura 12 - Partes do biodigestor HomeBiogás 7.0.....	35
Figura 13 - Vista superior Restaurante Universitário UFGD.....	39
Figura 14 - Refeições no RU da UFGD durante o período letivo.	43
Figura 15 - Geração de resíduos no RU de universidades públicas.	44
Figura 16 – Moto gerador da Marca Enermac.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração de energia elétrica através do biogás em 2020.....	16
Tabela 2- Aparições de termos relativos ao aproveitamento ou recuperação energética.....	21
Tabela 3 - Composição média do biogás de diferentes resíduos orgânicos.	23
Tabela 4 - Comparação energética entre biogás e outros combustíveis.....	24
Tabela 5 - Composição de SV característica dos resíduos alimentares.....	40
Tabela 6 - Recargas de GLP durante o mês de fevereiro e março.....	45
Tabela 7 - Parâmetros levantados para a elaboração do cenário 1.	45
Tabela 8 - Parâmetros resultantes do cenário 1.	46
Tabela 9 - Parâmetros resultantes do cenário 2.	49
Tabela 10 - Previsão de aumento do preço do GLP e da energia na ponta.	50
Tabela 11 - Previsão de economia anual.	51
Tabela 12 - VPL e TIR para ambos os cenários.....	52

LISTA DE SIGLAS

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

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

COP - Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas

COV - Carga orgânica volumétrica

DQO – Demanda Química de Oxigênio

GLP - Gás liquefeito de petróleo

ISWA - Associação Internacional de Resíduos Sólidos

MOS – Matéria Orgânica Seca

ONU - Organização das Nações Unidas

PLANARES - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVC - Policloreto de vinila

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

RU - Restaurante Universitário

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa

SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia

SV - Sólidos Voláteis

TIR - Taxa interna de retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TRH - Tempo de retenção hidráulica

UFGD - Universidade Federal da Grande Dourados

UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

VPL - Valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo geral	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
1.2. Estrutura do trabalho	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Resíduos sólidos urbanos	19
2.1.1. Resíduos orgânicos	20
2.1.2. Política nacional de resíduos sólidos	21
2.2. Biogás	21
2.3. Digestão anaeróbia	25
2.3.1. Hidrólise	26
2.3.2. Acidogênese	26
2.3.3. Acetogênese	26
2.3.4. Metanogênese	26
2.4. Biodigestores	27
2.4.1. Modelo chinês	27
2.4.2. Modelo indiano	28
2.4.3. Modelo canadense	30
2.4.4. Modelo UASB	31
2.4.5. Modelo Homebiogás 7.0	33
2.5. Parâmetros operacionais dos biodigestores	36
2.5.1. Carga Orgânica Volumétrica	36
2.5.2. Tempo de retenção hidráulica (TRH)	36
2.5.3. Produtividade, rendimento e taxa de degradação	37
3. METODOLOGIA	39
3.1. Local do estudo	39
3.2. Resíduos a serem utilizados na análise	39
3.3. Avaliação do potencial de geração de biogás dos resíduos alimentares do RU	40
3.4. Métricas econômicas para análise de viabilidade de projetos	41

3.4.1. Valor Presente Líquido (VPL)	41
3.4.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)	42
3.4.3. Payback	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1. Geração de resíduos alimentares no Restaurante Universitário (RU)	43
4.2. Cenário 1: Utilização do biogás como gás de cozinha	45
4.3. Cenário 2: Utilização do biogás para geração de eletricidade	46
4.4. Análise de viabilidade econômica e ambiental	49
5. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

As políticas energéticas globais têm como desafio acelerar o crescimento no uso de fontes de energias renováveis, os efeitos múltiplos desencadeados pela Covid-19 e a problemática envolvendo a Guerra Russo-Ucraniana fizeram os preços da energia alcançarem altas recordes. Ao mesmo tempo, desastres climáticos sem precedentes causam abalos devastadores e generalizados. Níveis históricos de chuvas, calor, secas, incêndios e tempestades vêm atingindo praticamente todas as partes do mundo (WRI, 2022).

Na Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP) 26 em Glasgow, Escócia, mais de cem países assinaram o Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*¹), e se comprometeram a reduzir as emissões de metano em 30% até 2030, (com base nos níveis de 2020). Segundo relatório de 2022 do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) o Brasil tem potencial para reduzir suas emissões de metano em 36% neste mesmo período, por meio da ampliação de políticas e medidas já existentes na agropecuária, no setor de energia, no saneamento e no controle do desmatamento. Entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), a meta 7.2 prevê aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global até 2030.

A matriz energética representa todo o conjunto de fontes de energia disponíveis em um país. O Brasil possui uma das maiores parcelas renováveis do mundo, 48,3% em 2020 (EPE, 2021), contra 13,8% mundialmente, em 2018 (IEA, 2021), mas com participação irrisória do biogás que soma 7,7% em conjunto com outras fontes renováveis. A matriz elétrica abrange somente as fontes de energia responsáveis pela geração de eletricidade, em que mesmo com maior participação renovável de 84,8% da oferta interna, o território brasileiro não apresenta resultados expressivos para o biogás, com uma participação de aproximadamente 0,16% do total (COELHO, 2021). A tabela 1 resume a situação do uso do biogás no Brasil em relação a outros países no ano de 2020.

¹ CCAC Climate & Clean Air Coalition. Fast action on methane to keep a 1.5°C future within reach, 2021. Disponível em: <https://www.globalmethanepledge.org/> Acesso em 09 mai. 2023.

Tabela 1 - Geração de energia elétrica através do biogás em 2020.

País	Energia produzida (GWh)
Brasil	1.956
França	2.806
Reino Unido	7.571
EUA	12.070
Alemanha	33.041

Fonte: IEA (2021).

Segundo o relatório *What a Waste 2.0* do Banco Mundial (2021), aproximadamente 2 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são geradas anualmente pelo mundo, e espera-se que em 2050 esse número chegue a 3,40 bilhões de toneladas, um aumento de quase 70%. O não desenvolvimento ou estágios iniciais de ferramentas e metodologias para tratamento dos resíduos sólidos urbanos contribuem para a poluição de florestas, do solo, de corpos hídricos e proliferação de doenças, além de que a fração orgânica do lixo passa espontaneamente pelo processo de digestão anaeróbica, através do qual são gerados CO_2 e CH_4 .

É possível observar que o biogás possui espaço para se desenvolver, com capacidade de impulsionar o crescimento da geração distribuída no Brasil, definida pela EPE (2014) como “uma alternativa de uso mais eficiente de recursos energéticos, econômico-financeiros e ambientais” (EPE, 2014). Existem várias aplicações possíveis para o biogás, dentre as quais se destacam a combustão direta em queimadores, fogões e caldeiras para geração de energia térmica; a conversão em energia elétrica através de grupos moto geradores; e o uso como combustível veicular na forma de biometano. (KONRAD et al., 2016).

De acordo com o estudo desenvolvido pela Associação Brasileira de Biogás e Biometano, o Brasil é um dos países com o maior potencial de produção de biogás do planeta, cerca de 167.550 GWh/ano (CIBIOGÁS, 2020). O uso do biogás para gerar energia elétrica, energia térmica e biometano cresce ano após ano no Brasil e no mundo. Neste cenário, o país possui em torno de 548 plantas de biogás, onde 511 estão em operação para fins energéticos (CIBIOGÁS, 2019).

Apesar de boas condições para a implantação de projetos que aproveitem todo potencial do biogás como fonte energética, existem desafios para que o biocombustível ganhe representatividade no cenário nacional. Alguns exemplos são os elevados custos de implantação e manutenção de projetos de biogás; a falta de regularização e a inexistência de políticas específicas; bem como a dificuldade no acesso a informações técnicas, comerciais e legais. Ademais, existe carência em quantidade significativa de projetos de referência bem-sucedidos

em escala comercial, visto que a grande maioria das plantas são de pequeno porte restrito às propriedades rurais (PROBIOGÁS, 2016).

Diante do exposto, o presente estudo surgiu a fim de contribuir na resolução da problemática dos RSU, visto que a análise da viabilidade econômica da produção de biogás na Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) através da biodigestão, ao considerar que a biomassa produzida no restaurante universitário deve ser descartada de maneira sustentável é relevante. Segundo a pesquisadora Dra. Juliana Calábria de Araújo apesar de uma grande possibilidade de uso, a produção de biogás a partir de resíduos ainda é incipiente no Brasil (UCS Play, 2019).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade econômica do potencial de produção de biogás a partir de resíduos gerados no restaurante universitário da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), analisando dois cenários: um que utiliza o biogás para energia térmica e outro para geração de energia elétrica.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica relacionada à produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos descartados;
- Estimar a capacidade de produção de biogás aproveitando os Resíduos Alimentares do Restaurante Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados;
- Efetuar uma análise visando o uso de biogás como energia térmica para substituição de botijões de gás liquefeito de petróleo (GLP);
- Efetuar uma análise onde será levantado o uso do grupo moto gerador que irá operar com biogás para a geração de energia elétrica;
- Avaliar a viabilidade econômica de dois cenários, utilizando como parâmetros o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o *Payback* e os fluxos de caixa acumulados.

1.2. Estrutura do trabalho

No capítulo 2 será abordado conceitos teóricos e dados da literatura que serão utilizados na realização deste trabalho, os quais estão inclusos: Resíduos sólidos urbanos descartados, a composição do biogás, etapas da digestão anaeróbia, tipos de biodigestores e parâmetros operacionais.

No capítulo 3 será conceituado detalhadamente quais foram as metodologias adotadas para a obtenção dos dados dos resíduos utilizados na análise, a avaliação do potencial de geração de biogás dos resíduos alimentares do restaurante universitário e as métricas econômicas para análise da viabilidade do projeto.

No capítulo 4 será apresentado os resultados obtidos, assim como a discussão e análise destes resultados por meio de gráficos e tabelas para uma visualização mais didática do que está apresentado.

No capítulo 5 será feito as principais conclusões encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa, além de apresentar sugestões para futuros trabalhos. Na sequência encontra-se as referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos sólidos urbanos

Segundo a Lei nº12.305/10, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos são definidos conforme o capítulo II, artigo 3º:

XVI - Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2010).

O último panorama realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022) apresenta números referentes à geração de RSU no país e revela um total de 81,81 milhões de toneladas por ano, o que indica uma queda de 1,03% em relação a 2021. Com relação à coleta, em 2022 o país registrou um total de 76,11 milhões de toneladas coletadas, levando a uma cobertura de coleta de 93,04%.

A maior parte dos RSU coletados (61%) são encaminhados para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada em 2022. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada. Os dados registrados nas edições do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, continuam a demonstrar o déficit ainda existente no país no tocante à universalização dos serviços de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos. Um dos pontos reside na destinação final dos RSU, apesar das determinações legais vigentes (ABRELPE, 2022).

De acordo com estimativas da Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA)², o custo da inércia na gestão de resíduos é de três a cinco vezes maior do montante necessário para investimento e custeio das soluções adequadas. Os impactos causados pela destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos, depositados em lixões e aterros controlados,

² ABRELPE. Saúde desperdiçada: O caso dos lixões (2015). Disponível em: <https://abrelpe.org.br/saude-desperdicada-o-caso-dos-lixoes/>. Acesso em 09 mai. 2023.

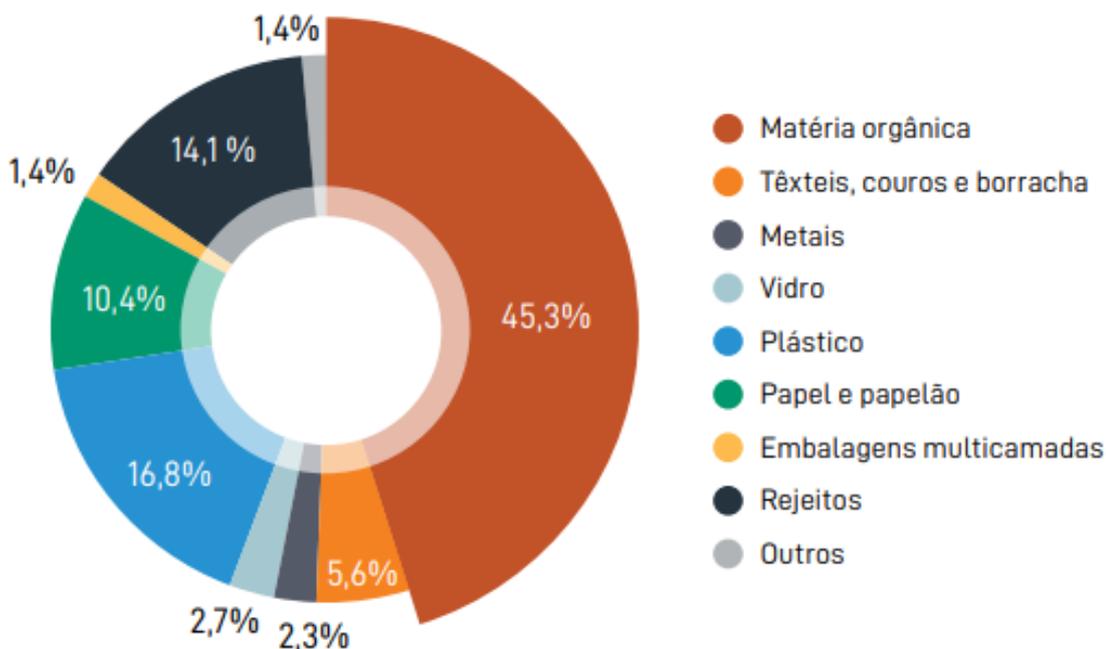
influenciam diretamente nas condições ambientais, vez que são fontes contínuas de poluição da água, solo, flora, fauna e de emissões de CO_2 (ABRELPE, 2022).

O desafio para superar as adversidades do cenário vigente na gestão dos resíduos sólidos urbanos descartados está na implementação de infraestruturas e em sistemas e tecnologias que permitam a destinação adequada dos resíduos sólidos no Brasil. Desse modo, o Decreto Federal nº 11.043 instituiu em 2022 o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares).

2.1.1. Resíduos orgânicos

Os resíduos orgânicos possuem a capacidade de degradação espontânea em ambiente natural equilibrado e são exemplos materiais como: Restos de alimentos, esterco de animais, aparas de grama, resíduos de agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos e lodos de estações de tratamento de esgotos. Em 2020 constituíram à fração de 45,3% da quantidade total de RSU, resultando em 35,8 milhões de toneladas, conforme a figura 1.

Figura 1 - Gravimetria dos RSU no Brasil em 2020.



Fonte: ABRELPE (2020).

2.1.2. Política nacional de resíduos sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº12.305/10, estabelece o conjunto de ações que norteiam a gestão dos resíduos sólidos gerados no Brasil. O propósito é adequar o gerenciamento de resíduos às legislações e normativas existentes, e da preservação ambiental com a redução do uso de aterros e a logística reversa de resíduos pós consumo (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2010).

A tabela 2 reúne os vários indicativos disponíveis na descrição da lei, referente a recuperação ou aproveitamento energético dos resíduos sólidos.

Tabela 2- Aparições de termos relativos ao aproveitamento ou recuperação energética

Referência	Descrição na Lei nº 12.305/10
Art. 3º, inciso VII	...destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ...
Art. 6º, inciso XIV	...incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético ;
Art. 9º, § 1º	Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.
Art. 15, inciso IV	...metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos;

Fonte: Elaboração do autor com dados de PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2010).

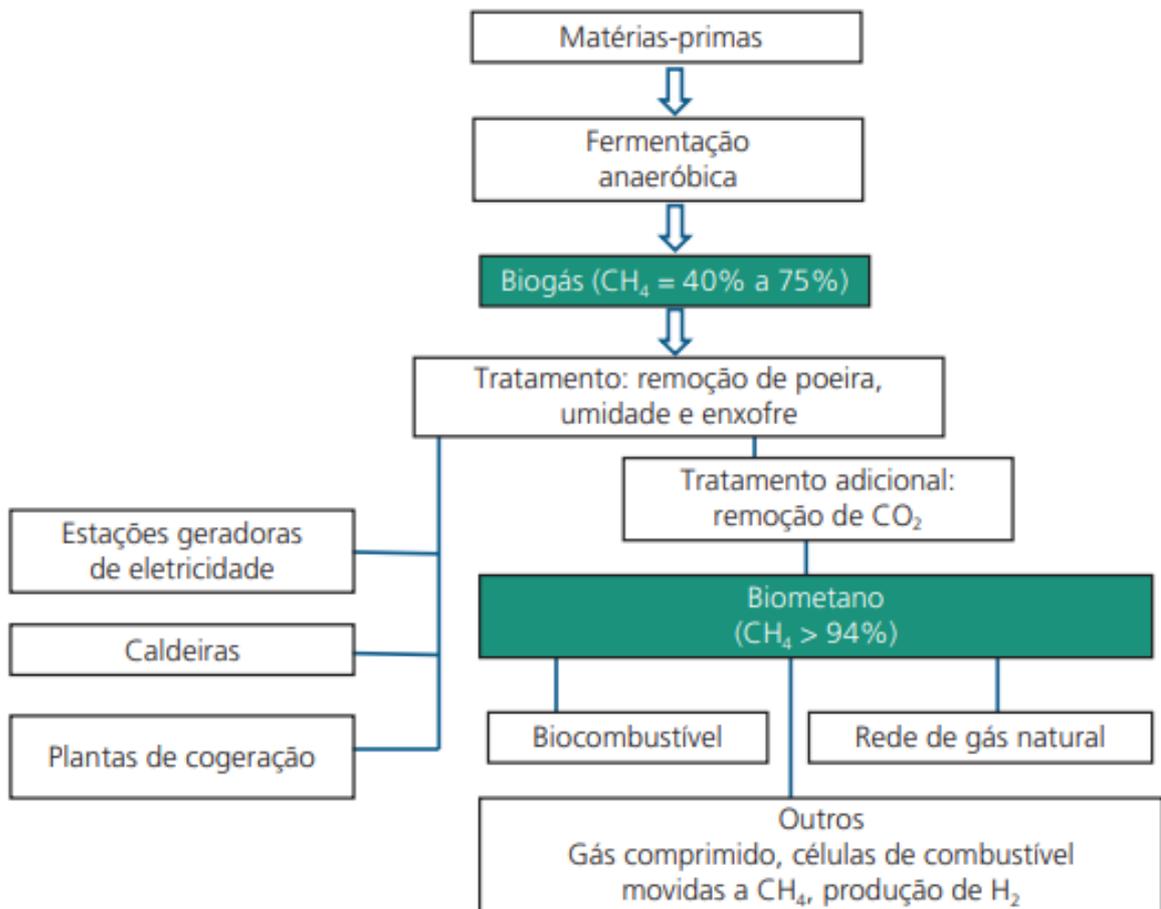
2.2. Biogás

O biogás é um tipo de combustível originado por uma mistura de gases que são produzidos através de uma decomposição biológica de matéria orgânica em um meio

anaeróbico (quando não há a presença de oxigênio). A produção de biogás pode ocorrer naturalmente em alguns locais como pântanos, fundo de lagos, intestino de animais, ou de forma antrópica como em aterros sanitários ou usinas de biogás (ZANETTE, 2009).

A figura 2 mostra o processo de fabricação do biogás e suas utilidades.

Figura 2 - Processo de fabricação do biogás e suas utilidades.



Fonte: MILANEZ (2018).

O combustível adquirido pelo processo é renovável e é constituído principalmente por metano. A composição do biogás é variada conforme o tipo de matéria orgânica utilizada na decomposição, no entanto a tabela 3 contém a composição média do biogás de diferentes resíduos orgânicos.

Tabela 3 - Composição média do biogás de diferentes resíduos orgânicos.

Componente	Concentração (em % vol.)
Metano (CH_4)	40 a 75
Dióxido de carbono (CO_2)	25 a 40
Nitrogênio (N)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O_2)	0,1 a 1
Sulfureto de Hidrogênio (H_2S)	0,1 a 0,5
Amoníaco (NH_3)	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1
Hidrogênio (H_2)	1 a 3

Fonte: SALOMON e LORA (2009).

O metano desempenha um papel significativo para o efeito estufa no planeta Terra. Durante um período de 20 anos é considerado 80 vezes mais potente para o aquecimento global do que o dióxido de carbono (UNEP; CCAC, 2021). Todavia, o gás metano, presente no biogás que pode ser convertido em energia térmica, apresenta um elevado potencial energético comparado com combustíveis fósseis. O biogás proporciona a redução de emissões de agentes contaminantes, pois não haverá a emissão direta do CH_4 à atmosfera e se desempenha como uma fonte sustentável e renovável.

A tabela 4 apresenta a comparação do volume de $1m^3$ de biogás com outros tipos de fontes energéticas, levando em consideração os seus poderes caloríficos.

Tabela 4 - Comparação energética entre biogás e outros combustíveis.

Combustíveis	Equivalência à 1m³ de biogás
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,579 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás de cozinha (GLP)	0,454 kg
Lenha	1,536 kg
Álcool hidratado	0,790 litros
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: BARREIRA (2011).

O uso do biogás é comum como método para uma melhoria no saneamento ambiental, como uma forma eficiente para o tratamento de resíduos orgânicos de origem doméstica, rural ou industrial (DESCLAUX, 2019). Existem diversas matérias primas capazes de gerar o biogás ao serem submetidas ao processo de digestão anaeróbia, entre elas estão: fezes de suínos, papéis e jornais, sobras de comida, fezes de aves, soro de queijo, resíduos de grãos, capins, resíduos de cervejaria, fezes de bovinos, resíduos de abatedouros, lixo urbano e esgotos. (GRYSCHEK; BELO, 1983).

O biogás, assim como outras fontes de energia possui vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens pode-se citar: alternativa ao gás de cozinha; substituição da lenha, que elimina trabalho braçal para sua retirada; baixa emissão de fuligem; alto poder calorífico; direcionamento de uma finalidade útil aos aterros sanitários; geração de fertilizantes. Desse modo, através de moto geradores, o biogás pode ser utilizado para a geração de energia elétrica (BARREIRA, 2011).

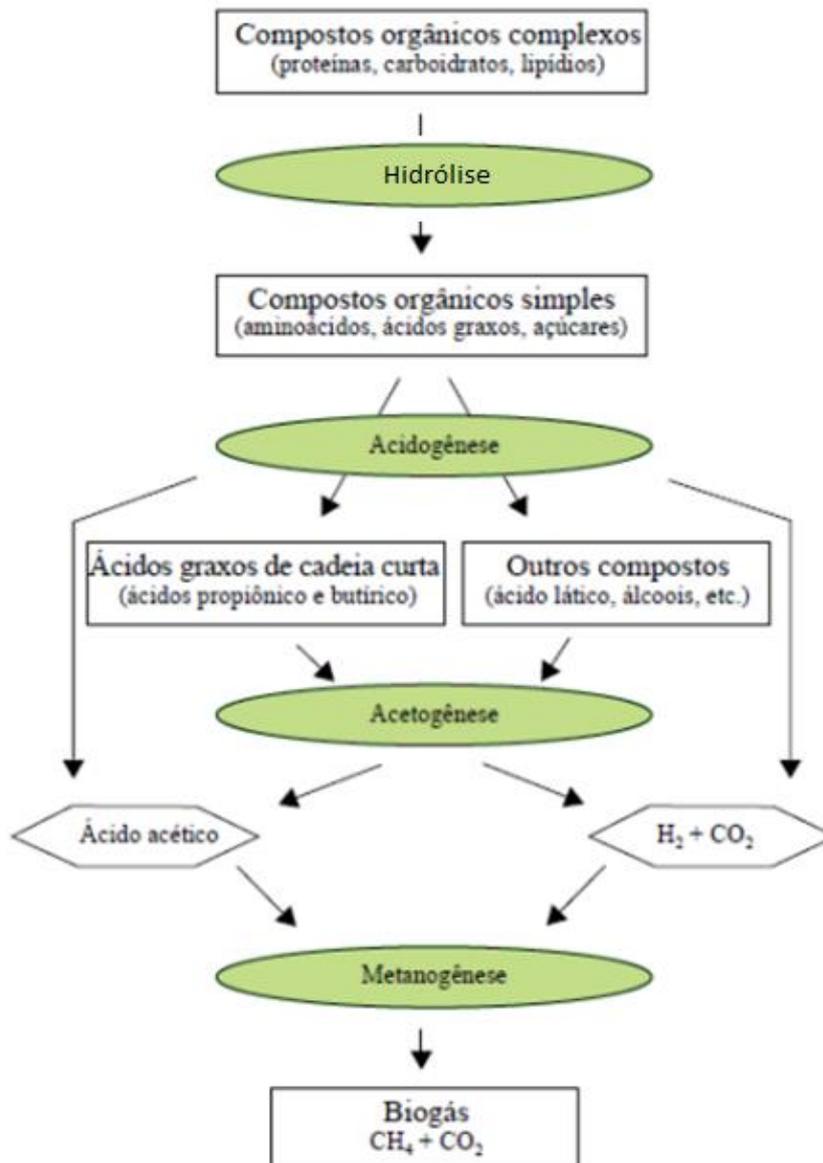
No entanto, a quantidade de energia gerada pelo biogás pode variar, pois a composição não é constante. Ademais, pode conter impurezas mesmo depois dos processos de purificação; o processo de fermentação anaeróbica é lento e gera um tempo longo de retenção dos sólidos; o gasto de mão de obra para manutenção do sistema é alto.

O biogás, resumidamente, é uma mistura de gases obtida a partir da conversão microbiológica anaeróbica de resíduos orgânicos (biomassas) biodegradáveis, que tem como seu constituinte principal o metano.

2.3. Digestão anaeróbia

De acordo com KUNZ et al. (2019), a digestão anaeróbia é um processo em que algumas espécies de bactérias, em ambiente sem oxigênio, produzem compostos simples como metano e dióxido de carbono a partir da decomposição de materiais orgânicos complexos. Neste processo também são gerados subprodutos como amônia, sulfetos e fosfatos. Para que aconteça a digestão anaeróbica e desta forma toda matéria orgânica seja transformada em biogás, são necessárias quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e por fim metanogênese, como ilustra a figura 3.

Figura 3 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia.



Fonte: (TCHOBANOGLOUS, G; BURTON, F.L; STENSEL, H.D, 2003).

2.3.1. Hidrólise

A hidrólise é essencial para dar início ao processo de produção de biogás. Nesta fase as enzimas extracelulares que são excretadas por bactérias hidrolíticas que fazem fermentação e provocam hidrólise de polímeros (materiais particulados complexos) em materiais dissolvidos simples (CHERNICHARO, 2007). É nesta etapa que as proteínas são transformadas em aminoácidos, assim como os carboidratos em açúcares solúveis e os lipídeos em ácidos graxos de cadeia longa e glicerina. A duração desse processo está diretamente relacionada com as características do substrato, varia de poucas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídios. (KUNZ et al., 2019).

2.3.2. Acidogênese

Nesta etapa aminoácidos, açúcares e alguns ácidos graxos são metabolizados de forma anaeróbia no interior celular dos microrganismos acidogênicos e tem como principais produtos acetato, hidrogênio, CO_2 e propionato e butirato. Há também a participação de fungos e protozoários (CHERNICHARO, 2007). Nessa fase é importante o controle do pH da mistura, pois caso apresente alta concentração de hidrogênio o pH diminui, e todo processo é afetado.

2.3.3. Acetogênese

Na acetogênese ocorre a produção de ácido acético (acetato) e hidrogênio através das bactérias acetogênicas que, através da relação de sintrofia com as arqueias metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas oxidam os produtos gerados na fase acidogênica são oxidados em substratos apropriados para a fase metanogênica (KUNZ et al., 2019).

2.3.4. Metanogênese

Por fim, a metanogênese é o processo final da conversão anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, e é realizada por microrganismos metanogênicos. Nessa etapa, há dois grupos de organismos metanogênicos envolvidos na produção do metano. Um é chamado de metanógenos acetoclásticos, que são responsáveis por converter o acetato

em metano e dióxido de carbono. Já o segundo é conhecido como metanógenos utilizadores de hidrogênio, pois utilizam o hidrogênio para doar elétrons e o CO_2 como aceptor de elétrons para produzir metano (KUNZ et al., 2019).

As bactérias metanogênicas possuem uma grande sensibilidade às variações do ambiente, em especial temperatura. por isso é preciso levar em consideração alguns cuidados com o abastecimento e estrutura dos biodigestores, para que o biogás tenha a maior quantidade possível de metano, já que é o componente responsável pela obtenção de energia (CHERNICHARO, 2007).

2.4. Biodigestores

O biodigestor é um compartimento fechado (reator), onde acontece sob condições controladas, os processos de digestão anaeróbia para a produção do biogás e em alguns casos, a produção de biofertilizantes. O nível de controle e tecnologia utilizada corrobora com o aumento da eficiência do sistema. (BLEY JÚNIOR, 2010).

A tecnologia usada nos biodigestores é considerada simples, a principal preocupação para seu manejo é a manutenção dos dejetos utilizados na digestão. A escolha do modelo depende de diversos fatores que devem ser levados em consideração, como as condições locais, o tipo do substrato utilizado, e a relação custo e benefício. No entanto, independente do modelo escolhido, todos levam o mesmo produto final (ROHSTOFFE, 2010).

Existem dois tipos de biodigestores, os de fluxo hidráulico descontínuo, e o de fluxo hidráulico contínuo. Os de tipo descontínuo são antagônicos, tem um único abastecimento e é descarregado ao concluir o processo de biodigestão enquanto o de fluxo contínuo deve manter uma alimentação regular de resíduos (CARREAS, 2013).

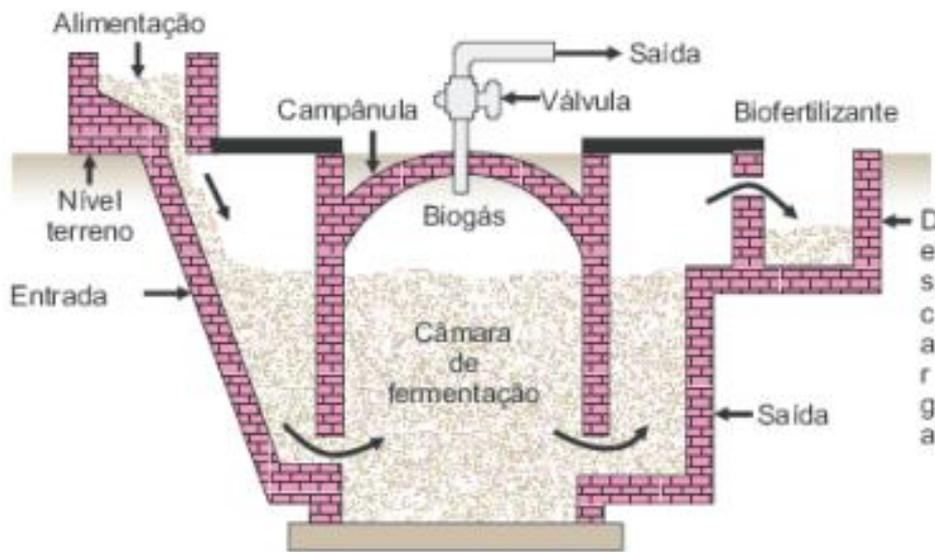
2.4.1. Modelo chinês

O biodigestor de modelo chinês é composto por uma câmara cilíndrica em alvenaria (em tijolos) para fermentação, com teto selado em formato abobadado, destinado ao armazenamento do biogás gerado. Esta configuração funciona com base no princípio de prensa hidráulica, ou seja, promove o aumento de pressão do gás em geração em seu interior. Desse modo, em decorrência do acúmulo de biogás resultará o deslocamento de efluentes dentro da câmara de

fermentação para o sistema de caixa de saída, ocorre a descompressão do efluente, conforme BARREIRA (1993).

A Figura 4 ilustra a configuração física de um biodigestor de modelo chinês.

Figura 4 - Biodigestor chinês.



Fonte: JUNQUEIRA (2014).

A configuração chinesa de biodigestor é parcialmente construída em alvenaria. Deste modo, não necessita o uso de sistemas de gasômetro e chapa de aço e promove a redução de custo. Todavia, pode haver ocorrências de vazamentos de biogás à atmosfera (DEGANUTTI, 2006). Por este motivo, tal modelo não são considerados para projetos e instalações de grande porte.

No modelo chinês é necessário que seja fornecido matéria orgânica constantemente, com a concentração de sólidos totais em torno de 8 a 10%.

2.4.2. Modelo indiano

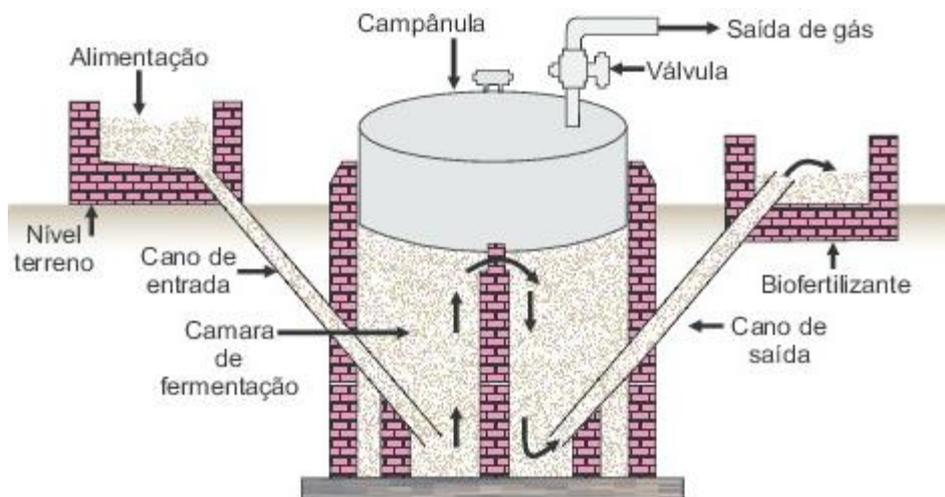
No biodigestor de modelo indiano, existe uma câmara de digestão subterrânea, onde a alimentação entra por um lado horizontal e sai pelo lado oposto com a capacidade de produzir biofertilizantes. Possui uma campânula como gasômetro, que é disposto sobre o produto

orgânico e pode estar também submerso sobre um selo d'água. Há uma parede central que divide o tanque e faz com que o material circule por todo seu interior.

A pressão de operação no modelo indiano é constante, ou seja, o volume de gás que é produzido não é consumido de imediato. O gasômetro tende a se deslocar verticalmente, e aumenta o volume deste, portanto, mantém a pressão em seu interior constante (DEGANUTTI, 2006).

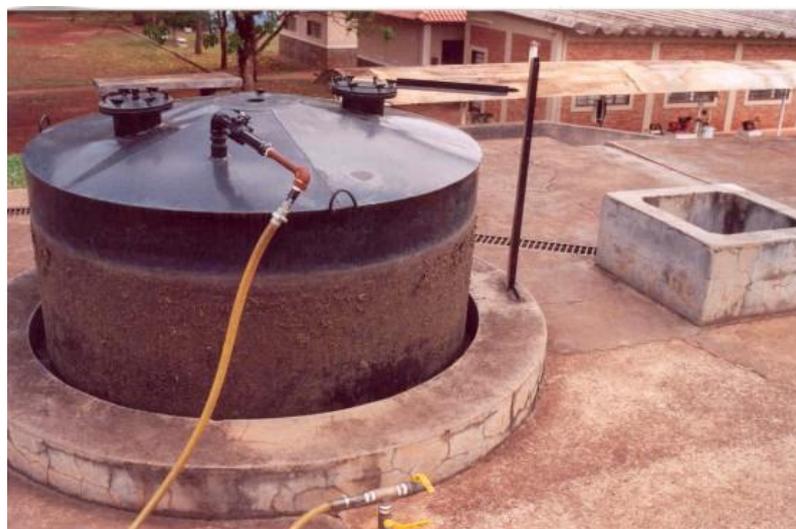
A Figura 5 ilustra a configuração física de um biodigestor de modelo indiano e a figura 6 sua construção real.

Figura 5 - Biodigestor indiano.



Fonte: JUNQUEIRA (2014).

Figura 6 - Foto Biodigestor Indiano



Fonte: CPT (2022).

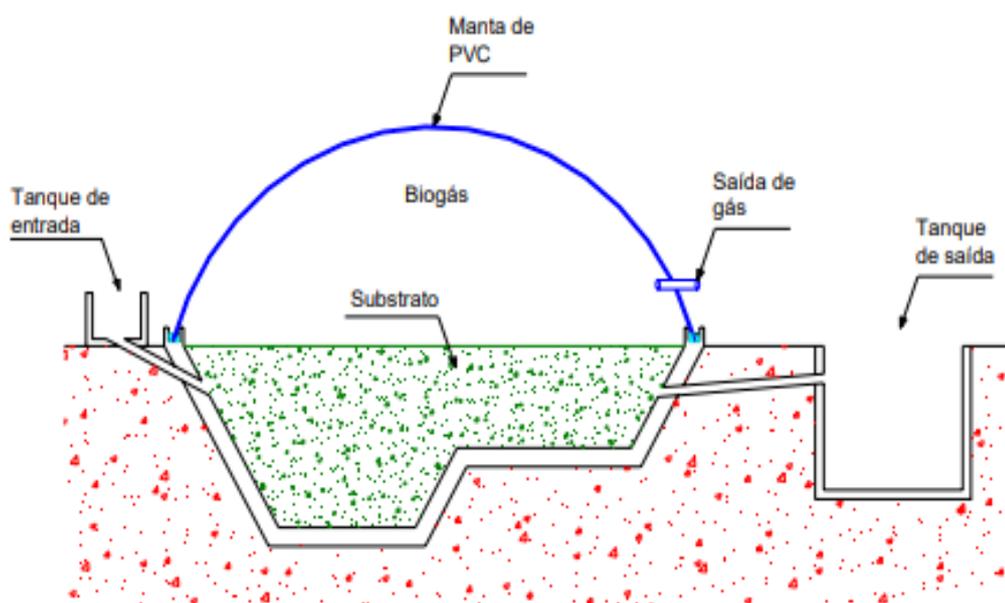
A configuração indiana de biodigestor apresenta fácil construção, porém o gasômetro de metal pode encarecer o custo final e inviabilizar o projeto de instalação do mesmo. Desse modo, é necessário fazer uma análise de viabilidade e de comparação com outros modelos. O resíduo utilizado para alimentar este modelo deve apresentar uma concentração de sólidos totais não superior a 8%, pois facilitará a circulação do resíduo pelo interior da câmara, além de evitar rompimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI, 2006).

2.4.3. Modelo canadense

O modelo canadense de biodigestor é do tipo horizontal e possui um sistema simples e de pequena exigência operacional, é descontínuo e adapta-se melhor com uma disponibilidade de biomassa em períodos mais longos, diferente dos modelos indiano e chinês. Possui uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável de plástico ou similar. Este tipo de biodigestor possui um custo reduzido e uma instalação fácil comparada a outros modelos, devido a manta impermeável confeccionada em policloreto de vinila (PVC). Durante a produção a cúpula de PVC infla e acumula o biogás (OLIVEIRA, 2012).

A figura 7 mostra a configuração de um biodigestor canadense, enquanto a figura 8 ilustra sua construção prática.

Figura 7 - Biodigestor canadense.



Fonte: NISHIMURA (2009).

Figura 8 - Biodigestor canadense projeto



Fonte: THOMAS (2021).

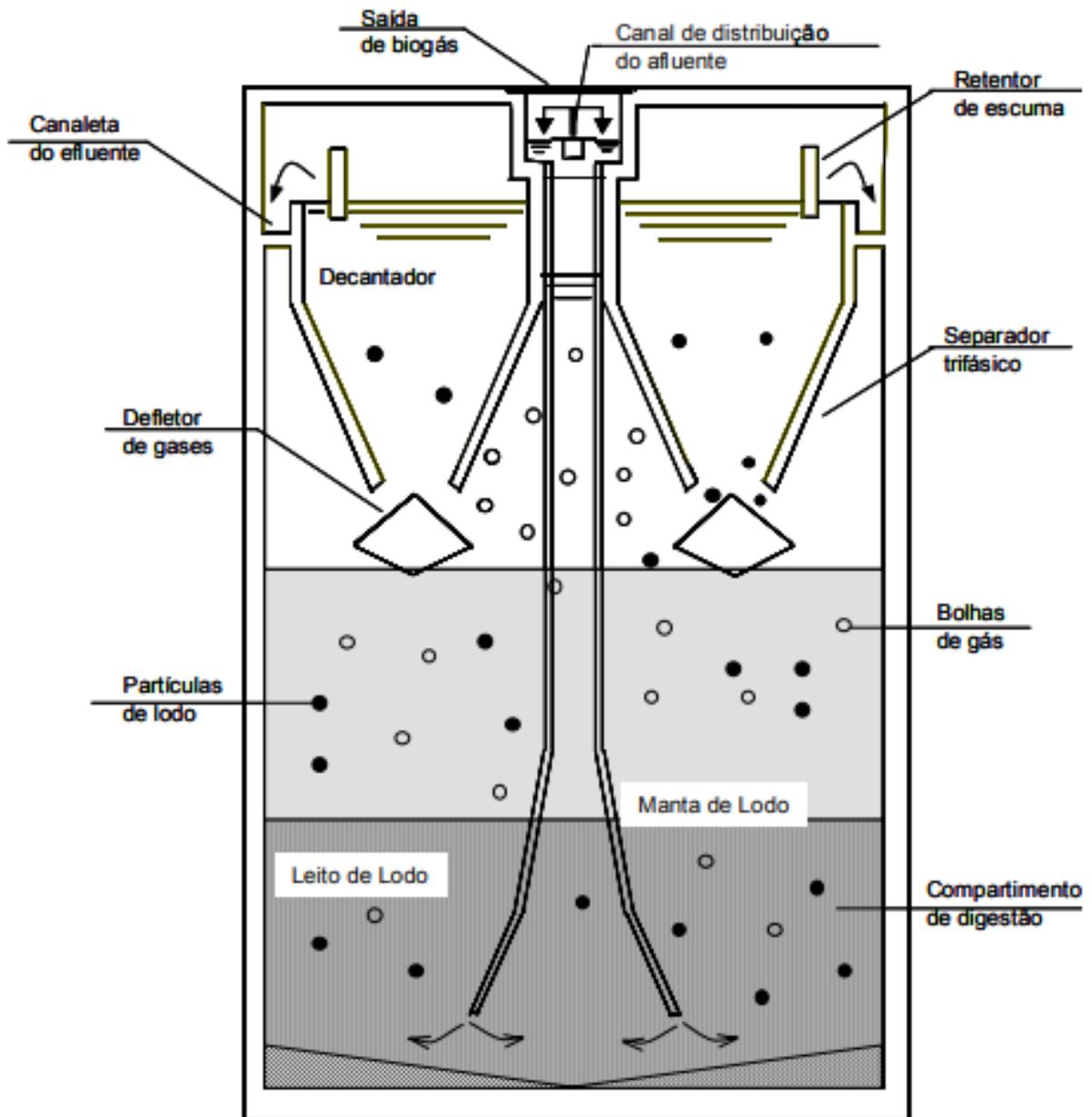
2.4.4. Modelo UASB

O modelo “*Upflow Anaerobic Swdge Blanket*” (UASB) – Reator anaeróbico de fluxo ascendente - de biodigestor é conhecido por ter um alto desempenho na produção de biogás e conta com um fluxo ascendente. Ele é constituído por um separador de fases, que divide o biodigestor em duas partes, a inferior que está presente o compartimento de digestão através de uma manta de lodo denso com alto nível microbiano que realiza a digestão anaeróbia e a superior onde se encontra um compartimento de decantação (KUNZ et al., 2019).

O afluente a ser tratado é bombeado pelo fundo do reator e conta com um perfil de sólidos muito denso, com partículas granulares de alta capacidade de sedimentação, que ficam próximas ao fundo (leito de lodo), até um lodo mais disperso e leve, próximos ao topo do reator (manta de lodo). O efluente tratado é coletado na parte superior do reator, em vertedores ou tubulações perfuradas (VON SPERLING, 2005). O gás produzido no compartimento de reação na forma de bolhas é coletado no separador trifásico.

A figura 9 ilustra um diagrama esquemático do funcionamento do reator, já a figura 10 mostra sua configuração no mundo real.

Figura 9 – Diagrama esquemático Biodigestor UASB.



Fonte: TUNES, 2017.

Figura 10 - Biodigestor UASB



Fonte: UFRJ (2023).

Antes do *startup* do reator, é necessário proceder a correta inoculação deste. O modelo UASB é inicialmente semeado com inóculo, tal como lodo de esgoto digerido, granular floculante ou lodos ativados. Após inoculado, o substrato a ser tratado é introduzido uniformemente no fundo e ao percorrer o leito de lodo ativo, conhecido como zona de digestão, entra em contato com as bactérias anaeróbicas, que estabilizam a matéria orgânica disponível e produzem o biogás (CHONG et al., 2012).

Depois de chegar ao separador trifásico, o biogás é direcionado para o sistema de coleta e armazenamento de gases por meio das placas defletoras. Enquanto isso, o líquido oriundo do leito de lodo que contém partículas em suspensão e, às vezes, lodo disperso, flui pelo separador trifásico através das aberturas entre as placas defletoras. Essas placas são inclinadas para permitir a decantação dos sólidos em suspensão, que são então devolvidos ao leito de lodo, enriquecendo-o e aumentando o tempo de retenção celular no reator (RIZZO; LEITE, 2004).

2.4.5. Modelo Homebiogás 7.0

O biodigestor HomeBiogás 7.0 teve seu lançamento em 2011 em Israel, e tem distribuição exclusiva no Brasil através do fornecedor BioMovement. Opera como um sistema

de fluxo contínuo, onde os resíduos orgânicos são inseridos em uma extremidade à medida que biogás e biofertilizantes são emitidos constantemente do outro lado enquanto o sistema estiver ativo e sendo alimentado. É destacado principalmente pela sua simplicidade de montagem, facilidade na operação e alta eficiência, estando presente em mais de 100 países pelo mundo (HOME BIOGAS BRASIL, 2021).

A sua construção pode ser observada na figura 11.

Figura 11 - HomeBiogás 7.0.

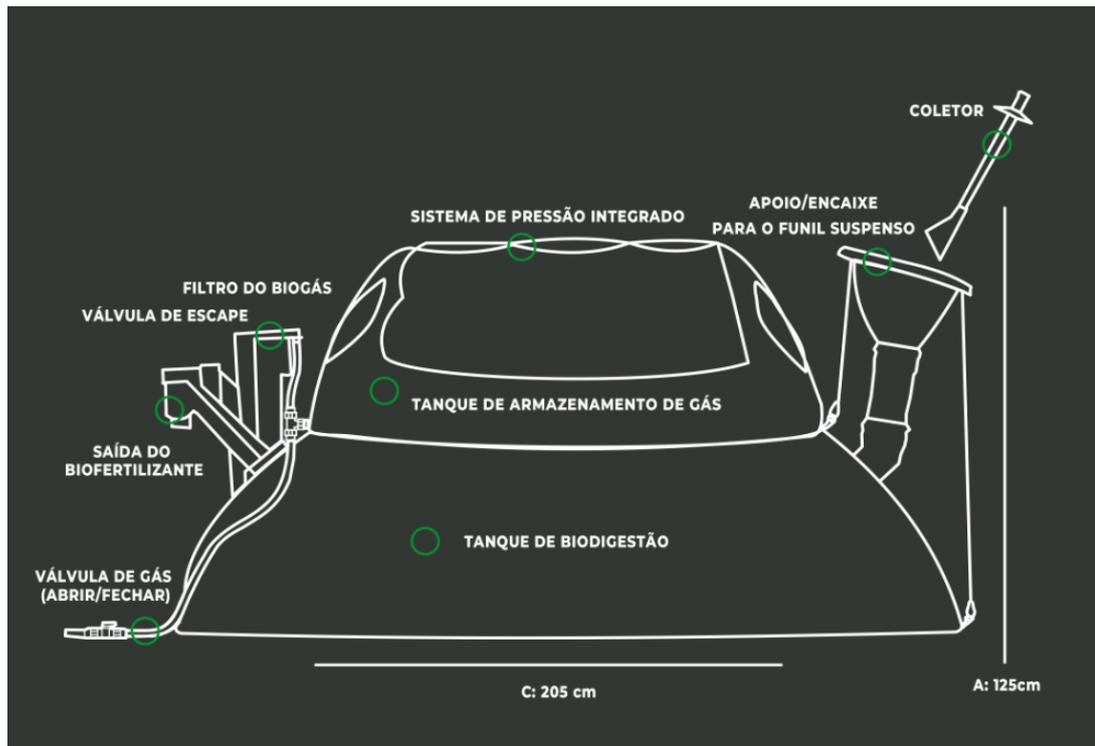


Fonte: HOME BIOGAS BRASIL (2021).

O sistema conta com um tanque de 4500L de digestão flexível e um tanque de gás de 2500L com sistema de pressão integrado e válvula de segurança, tem capacidade para 10 kg de resíduos orgânicos/dia ou 60 kg de esterco animal/dia, gera de 5 a 7 horas diárias de biogás, equivalente a 2,5 m³ de biogás diariamente para cozimento e 10 litros de biofertilizante natural (para hortas e plantações), ocupa um espaço de 10m². O equipamento acompanha um fogareiro de duas bocas (HOME BIOGAS BRASIL, 2021).

A figura 12 ilustra as diferentes partes do biodigestor.

Figura 12 - Partes do biodigestor HomeBiogás 7.0.



Fonte: HOME BIOGAS BRASIL (2021).

Através das avaliações da viabilidade do HomeBiogás (BLEICHER et al., 2017; PERRUCCI; RODRIGUES, 2018) em comparação com outras alternativas de produção de biogás e energia foi constatado que o biodigestor apresenta uma capacidade de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) superior ao biodigestor modelo chinês, indiano, canadense e UASB. De forma geral, o sistema tem um excelente funcionamento e grande produção de biogás.

Silva (2021) avaliou o volume e a qualidade do biogás gerado no HomeBiogás com o uso de resíduos orgânicos oriundos do restaurante universitário da Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES). O sistema demonstrou efetividade na conversão dos resíduos orgânicos em biogás, as taxas de CH_4 na sua composição foram, em média, 64,34%. O autor advertiu também sobre a necessidade de se instalar o equipamento em locais com plena incidência de luz solar e calor para um melhor desempenho.

Gautam (2021) comparou a qualidade e eficiência do Homebiogás em relação a um biodigestor chinês modelo GGC 2047. O sistema Homebiogás produziu em média $0,961 m^3/dia$ de biogás por dia com 33 ± 12 kg/dia de estrume animal, contra $0,452 m^3/dia$ com 40 kg/dia de estrume animal do modelo chinês. A concentração de CH_4 foi em média de 56,10% sendo ele responsável por substituir 13,4 kg de GLP/mês. Além da maior produção, e

melhor qualidade do biogás, o biodigestor se sobressaiu em questões como: mobilidade pós instalação, reciclagem, reparação e manutenção, segurança e custo.

2.5. Parâmetros operacionais dos biodigestores

2.5.1. Carga Orgânica Volumétrica

A carga orgânica volumétrica (COV) de acordo com a Instituição Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V (2010) indica quantos quilos de matéria orgânica seca (MOS) devem ser carregados no biodigestor por m^3 de volume de trabalho, por unidade de tempo. A COV é expressa em $kg\ MOS / (m^3 * dia)$, conforme descrito na equação 1.

$$COV = \frac{\dot{m} * c}{V_R * 100} [kg\ MOS\ m^{-3}\ dia^{-1}] \quad (1)$$

Onde:

COV = Carga orgânica volumétrica;

\dot{m} = Quantidade introduzida de substrato por unidade de tempo [kg/dia];

c = Concentração da matéria orgânica seca [% MOS];

V_R = Volume do reator [m^3].

A medição da carga orgânica volumétrica pode ser realizada em diferentes níveis, como por estágio (em um reservatório impermeável a gases, isolado e aquecido), para o sistema inteiro (incluindo todos os estágios de trabalho) e com ou sem a recirculação de material. No entanto, ao modificar os valores de referência, os valores de COVs podem variar bastante de uma usina para outra. Para garantir uma comparação mais precisa entre as COVs de diferentes usinas, recomenda-se que esse parâmetro seja calculado para o sistema como um todo, sem levar em consideração a recirculação de material, ou seja, apenas para o substrato fresco (FNR, 2010).

2.5.2. Tempo de retenção hidráulica (TRH)

O tempo de retenção hidráulica (TRH) representa o tempo médio calculado que um substrato permanece no biodigestor até a sua saída, conforme a equação 2. A carga orgânica

volumétrica está intimamente relacionada ao tempo de retenção hidráulica. Assumindo que a composição do substrato seja constante, quanto maior for a carga orgânica volumétrica, maior é a quantidade de substrato introduzido no biodigestor, o que reduz o tempo de retenção. Para manter o processo fermentativo, o tempo de retenção hidráulica deve ser ideal para que, na renovação contínua do conteúdo do reator, não seja levada uma quantidade de microrganismos maior que aquela que cresce no mesmo período (FNR, 2010).

$$TRH = \frac{V_R}{\dot{V}} [dia] \quad (2)$$

Onde:

TRH = Tempo de retenção hidráulica [dias];

V_R = Volume do reator [m^3];

\dot{V} = Volume de substrato introduzido [m^3];

2.5.3. Produtividade, rendimento e taxa de degradação

A produtividade, rendimento e taxa de degradação do substrato são parâmetros úteis para descrever o desempenho do reator. A produtividade é calculada como a produção diária de gás dividida pelo volume do biodigestor, representando a produção de gás em relação ao tamanho do reator. O rendimento é a quantidade de biogás produzida em relação à quantidade de matéria orgânica utilizada, porém, como um parâmetro isolado, pode ser pouco aplicável por não agregar a carga efetiva do biodigestor, sendo necessário sempre acompanhá-lo da carga orgânica volumétrica. Por fim, a taxa de degradação é um indicador da eficiência do uso do substrato em termos de massa orgânica seca (MOS) ou demanda bioquímica de oxigênio (DQO) (FNR, 2010).

$$P_{(CH_4)} = \frac{V_{(CH_4)}}{V_R} [Nm^3 m^{-3} dia^{-1}] \quad (3)$$

Onde:

$P_{(CH_4)}$ = Produtividade do metano [$Nm^3 m^{-3} dia^{-1}$];

$V_{(CH_4)}$ = Produção de metano [Nm^3 / dia];

V_R = Volume do reator [m^3].

$$A_{(CH_4)} = \frac{\dot{V}_{(CH_4)}}{\dot{m}_{MOS}} [Nm^3 t^{-1} MOS] \quad (4)$$

Onde:

$A_{(CH_4)}$ = Rendimento de metano [$Nm^3 t^{-1} MOS$];

$\dot{V}_{(CH_4)}$ = Produção de metano [Nm^3 / dia];

\dot{m}_{MOS} = Matéria orgânica seca introduzida [t/dia].

$$\eta_{MOS} = \frac{MOS_{Sub} * m_{in} - (MOS_{sa} * m_{sa})}{MOS_{Sub} * m_{in}} * 100[\%] \quad (5)$$

Onde:

η_{MOS} = Taxa de degradação da biomassa;

MOS_{Sub} = Teor de matéria orgânica seca da matéria fresca introduzida [kg/t MF];

m_{in} = Massa da matéria fresca introduzida [t];

MOS_{sa} = Teor de matéria orgânica seca da saída do biodigestor [kg/t MF];

m_{sa} = Massa dos biofertilizantes [t].

3. METODOLOGIA

3.1. Local do estudo

A Universidade Federal da Grande Dourados surgiu da Lei n. 11.153 em 2005, após o desmembramento do Centro Universitário de Dourados da UFMS, este fundado em 1970. Tem atualmente 32 cursos e mais de 8.000 alunos (UFGD). O campus II da universidade está localizado na Rod. Dourados-Itahum, km 12 - Cidade Universitária, Dourados – MS.

A vista superior do universitário pode ser observada na figura 13.

Figura 13 - Vista superior Restaurante Universitário UFGD.



Fonte: Google Earth (2022).

3.2. Resíduos a serem utilizados na análise

Para a elaboração deste trabalho serão utilizados como matéria prima para a produção de biogás restos alimentícios que têm origem no Restaurante Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em volume diário. Os dados foram obtidos por meio de uma análise quantitativa. Não houve pesagem dos resíduos pelo fato do restaurante ter permanecido fechado do período de 2020 à 2022 devido a pandemia de COVID-19.

Desta forma, para ter a quantidade de resíduos sólidos orgânicos, foi realizada uma coleta de informações no portal da UFGD sobre a quantidade de refeições servidas no restaurante universitário (RU) durante o período letivo de 2019, assim como a quantidade média

de resíduos orgânicos gerados pela UFGD, que posteriormente foram comparados com outras universidades públicas para validar a veracidade dos dados obtidos.

3.3. Avaliação do potencial de geração de biogás dos resíduos alimentares do RU

A metodologia utilizada para avaliar o potencial de geração de biogás teórico através dos resíduos alimentares do RU foi baseada na revisão bibliográfica que sugere que a porcentagem de Sólidos Voláteis (SV) que compõe os resíduos alimentares varia na faixa de 17,1% a 27,6%, conforme representado na tabela 5.

Tabela 5 - Composição de SV característica dos resíduos alimentares.

Autor	Zhang et al (2006)	Li et al (2011)	Zhang et al (2011)	Browne et al (2012)	Zhang, et al (2013)
SV (%)	26,4	22,6	17,1	27,6	21,0

Fonte: Tabela elaborada pelo autor dados de Rocha (2016).

O valor adotado para a porcentagem de SV para a realização desta monografia foi de 23%, uma média dos valores que foram encontrados na literatura. Logo, a quantidade de sólidos voláteis em kg/dia pôde ser calculada através da equação 2:

$$M_{SV} = M_{RO} * 0,23 \quad (6)$$

Onde:

M_{SV} = Massa de sólidos voláteis [kg/dia];

M_{RO} = Massa de resíduos orgânicos [kg/dia].

De acordo Ferreira (2015), uma tonelada de sólidos voláteis de substratos provenientes de resíduos alimentares, produz, em média, um volume de 400 m³ de CH₄. Já Zhang, Lee e Jahng (2011) apresentam que um quilograma de sólidos voláteis produz 0,460 m³ de CH₄, enquanto que, para Lissens et al. (2004), esse valor é de 0,525 m³CH₄.kgSV⁻¹. Portanto, foi adotado um valor médio de 0,462 m³CH₄.kgSV⁻¹.

Através dos dados fornecidos pela tabela 2 do item 2.2 a concentração de CH₄ no biogás varia de 40% a 75%, assumiu-se, então, que a porcentagem de CH₄ na composição do biogás oriundo da biodigestão dos resíduos orgânicos do RU seja equivalente a 60%.

3.4. Métricas econômicas para análise de viabilidade de projetos

3.4.1. Valor Presente Líquido (VPL)

De acordo com Souza (2003), o Valor Presente Líquido (VPL) é a diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa associadas ao projeto e o investimento inicial necessário. Gitman (2001) também afirma que o VPL é uma técnica sofisticada de orçamento, determinada pela subtração do valor presente das entradas líquidas de caixa, descontadas a uma taxa mínima de atratividade, do valor inicial do projeto (LEMES JÚNIOR; RIGO; CHÉROBIM, 2002).

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) foi utilizada como parâmetro de retorno exigido do investimento, sinalizando por optar ou não pelo mesmo. Sendo assim, a TMA deve ser no mínimo, a taxa de juros equivalente a rentabilidade das aplicações correntes de menor risco de investimento. Neste caso foi aplicada a Taxa SELIC³, pois conta com o índice de referência para remuneração em títulos públicos do Governo Federal brasileiro, emitidos pelo Tesouro Nacional e considerados investimentos seguros, com baixo nível de risco.

Deste modo, pode-se afirmar que o VPL e a TMA são inversamente proporcionais, ou seja, à medida que a TMA se eleva, o VPL diminui. É importante ressaltar também que quanto maior o VPL, maior a atratividade do projeto, pois desta forma as entradas são maiores que as saídas de caixa. Considerando que os dois cenários deste projeto serão analisados com base na mesma TMA, a taxa SELIC, a melhor opção será aquela que apresentar o maior VPL.

A equação 7 descreve o modo em que o valor líquido presente é calculado.

$$\text{VPL} = \sum \text{FC}(1 + \text{TMA})^{-n} \quad (7)$$

Onde:

FC = Fluxo de caixa

TMA = Taxa mínima de atratividade (Taxa SELIC, neste caso)

³Taxa SELIC: A Selic é a taxa básica de juros da economia. É o principal instrumento de política monetária utilizado pelo Banco Central (BC) para controlar a inflação. Ela influencia todas as taxas de juros do país, como as taxas de juros dos empréstimos, dos financiamentos e das aplicações financeiras. (BANCO CENTRAL, 2023).

n = Número de períodos, em anos

3.4.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) de um investimento é a taxa exigida de retorno que, quando utilizada como taxa de desconto, resulta em VPL igual a zero (LEMES JÚNIOR; CHÉROBIM; RIGO, 2002) Assim, quando o VPL é zero encontra-se o ponto de equilíbrio econômico do projeto e, deste modo, não haverá criação nem destruição de valor. No processo de tomada de decisão, após o cálculo da TIR, deve ser feita a comparação com a TMA, afim de avaliar a aceitação ou não da alternativa. Os investimentos com TIR maior que a TMA são considerados rentáveis.

A equação 8 descreve o modo em que a taxa interna de retorno é calculada.

$$\text{TIR} = \sum \text{FC}(1 + \text{TMA})^{-n} = 0 \quad (8)$$

Onde:

FC = Fluxo de caixa

TMA = Taxa mínima de atratividade (Taxa SELIC neste caso)

n = Número de períodos, em anos

3.4.3. Payback

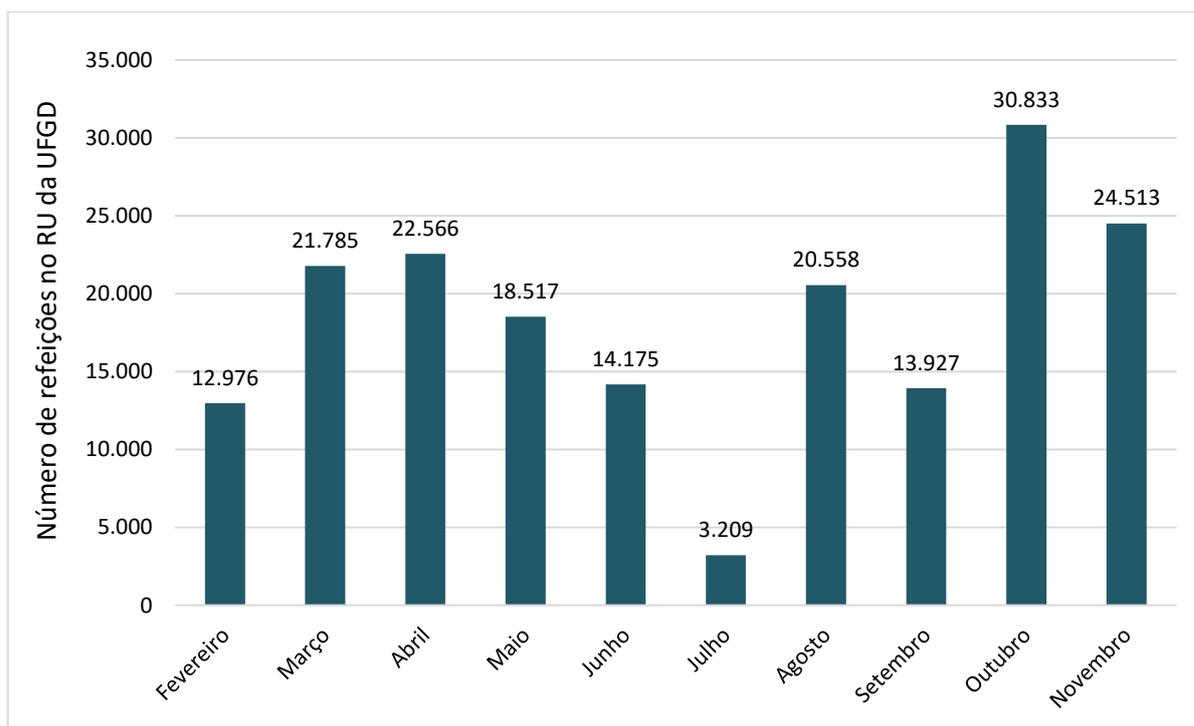
O *Payback* é um indicador que representa o tempo necessário para que o fluxo de caixa acumulado do projeto se torne positivo, ou seja, para que o investimento inicial seja recuperado. A utilização do *Payback* depende do critério estabelecido pelo investidor: se o tempo de *Payback* for superior ao período de interesse, o projeto não é atraente; se for menor, é considerado atraente; e se for igual, o projeto é indiferente. O período de tempo considerado para o *Payback* pode ser em meses, anos, ou outro período determinado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Geração de resíduos alimentares no Restaurante Universitário (RU)

Com dados fornecidos pelo relatório de gestão da universidade (UFGD, 2019) foi obtido o número de refeições em cada mês do ano de 2019, conforme a figura 14 a média de refeições no RU da UFGD foi de 18.306 refeições por mês, ou 832 refeições por dia, considerando 22 dias letivos por mês. A quantidade de resíduos alimentares gerados pelo Restaurante Universitário, em dados do plano de gerenciamento de resíduos sólidos da universidade (UFGD, 2017) forneceram uma estimativa de 3.200 kg/mês, ou 145,5 kg/dia, resultando uma geração de 0,17 kg de resíduos por refeição.

Figura 14 - Refeições no RU da UFGD durante o período letivo.



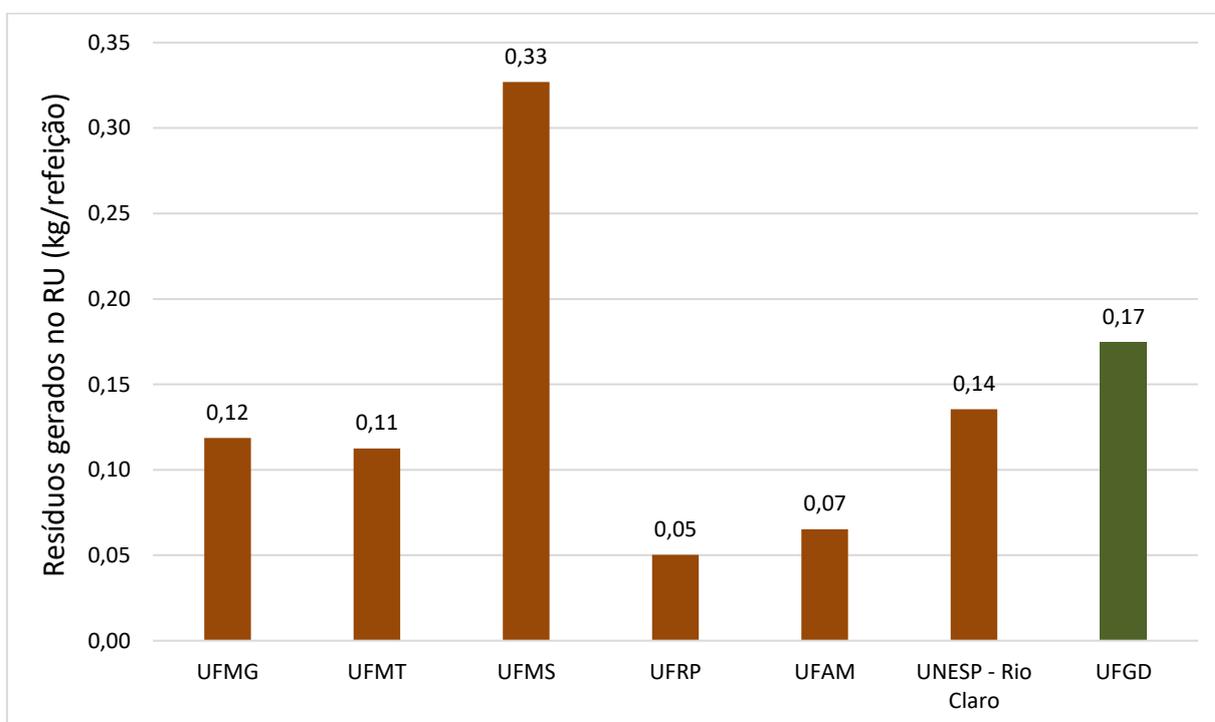
Fonte: Elaborado pelo autor com dados de UFGD, 2019.

Para buscar validar a veracidade dos dados fornecidos pela UFGD realizou-se uma comparação com outras universidades públicas. Para tal, foram analisados outros trabalhos de outras universidades que traziam a quantidade de resíduos geradores em seu RU. Entre essas, a

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (FERREIRA, 2015), a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) (MARTINS, 2016), a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) (SHAVER, 2020), a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) (GONÇALVES E ALBUQUERQUE, 2018), a Universidade Federal de Amazonas (UFAM) (SILVA, et al, 2021) e a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – Campus Rio Claro (PICCIAFUOCO, 2013).

Através da figura 15 observa-se a comparação do valor obtido para a realização deste trabalho com o de outras universidades.

Figura 15 - Geração de resíduos no RU de universidades públicas.



Fonte: Elaborada pelo autor com dados de UFGD, 2019.

Com isso, pode-se concluir que os valores obtidos na UFGD, ao analisar o RU, não estão distantes da média de valores obtidos em outras universidades públicas. A geração de resíduos também aparenta ter um comportamento dependente da região, dando que universidades do Norte/Nordeste atingiram os menores valores, enquanto as situadas no Centro-Oeste/Sudeste possuem os maiores valores.

4.2. Cenário 1: Utilização do biogás como gás de cozinha

Por meio de dados fornecidos pela nutricionista do RU constatou-se que atualmente são feitas duas recargas de GLP mensalmente, cuja a quantidade varia conforme a necessidade do restaurante. A empresa responsável pelo abastecimento é a Copa Energia Distribuidora de Gás SA localizada em Campo Grande MS.

A tabela 6 descreve os dados obtidos através das notas fiscais das recargas para o mês de fevereiro e março.

Tabela 6 - Recargas de GLP durante o mês de fevereiro e março.

Data de recarga	Quantidade (kg)	Valor Unitário (R\$ por kg)	Total (R\$)
09/02/2023	503,9	7,5960	3827,62
23/02/2023	347,2	7,5960	2637,33
09/03/2023	447,2	7,5989	3398,23
23/03/2023	443,8	7,5989	3372,39

Fonte: Elaborada pelo autor com dados de UFGD, 2023.

Através da tabela 6 é possível estimar que a média de GLP utilizado pelo RU é de 871,05 Kg por mês, com um valor unitário médio de R\$7,5975/kg e um total médio de R\$6617,76/mês. Considerando que a densidade do GLP é de 2,5 kg/m³ em um mês o RU utiliza em média 348,42 m³ de GLP para o preparo das refeições.

Para a substituição do GLP por biogás, considerando a equivalência de 1 m³ de biogás para 0,454kg de GLP conforme a tabela 3, seria necessário 1918,61 m³ de biogás. O biodigestor utilizado para a proposta deste cenário será o Homebiogás 7.0 por conta da facilidade de aquisição, manutenção de baixo custo e baixa complexidade, boa qualidade na composição do biogás gerado, efetividade na conversão dos resíduos orgânicos em biogás.

A tabela 7 resume todos os parâmetros levantados para a elaboração do cenário 1.

Tabela 7 - Parâmetros levantados para a elaboração do cenário 1.

Parâmetro	Valor
Média de GLP utilizado mensalmente no RU	871,05 kg
Média de GLP utilizado mensalmente no RU	348,42 m ³
Valor unitário do GLP médio	R\$7,5975/kg
Total médio de GLP	R\$6.617,76/mês
Quantidade necessária de biogás por mês para substituir o GLP	1.918,61 m ³
Modelo de biodigestor utilizado no cenário 1	Homebiogás 7.0

Fonte: Autor.

Tendo em vista que no RU são gerados 145,5 kg de resíduos alimentares diariamente e que cada biodigestor tem capacidade para até 10 kg de resíduos orgânicos/dia, considerando um excedente de 10% para possíveis picos de resíduos serão necessárias 16 unidades do HomeBiogás 7.0 para suprir a demanda de 160 kg/dia. Cada unidade apresenta um valor de investimento de R\$15.400,00, mais 5% para cobrir a instalação do equipamento, equivalente a R\$770,00. Portanto, para a aquisição das 16 unidades o investimento inicial é de R\$258.720,00.

Através de dados fornecidos no site do fabricante, é informado que cada unidade do HomeBiogás 7.0 é responsável pela produção de 2,5 m³ de biogás diariamente ou 55 m³ por mês (HOME BIOGÁS, 2021), no total serão gerados 37,50 m³ de biogás diariamente, equivalente a 825 m³ de biogás mensalmente nos 22 dias letivos. Considerando que 1 m³ de biogás corresponde 0,454kg de GLP conforme a tabela 3 será possível suprir 43% da demanda de GLP, ou seja, 374,55 kg/mês.

A tabela 8 reúne os parâmetros resultantes do cenário 1.

Tabela 8 - Parâmetros resultantes do cenário 1.

Parâmetro	Valor
Investimento para aquisição de 16 unidades do HomeBiogás 7.0	R\$258.720,00
Produção mensal de biogás	825 m ³
Produção mensal de biogás equivalente em GLP	374,55 kg

Fonte: Autor.

Destaca-se que o sistema gera 10 litros de biofertilizante natural diariamente, produto de excelente valor agregado que não está contabilizado no valor economizado mensalmente para a análise de viabilidade econômica. O biofertilizante poderia ser utilizado para manter a manutenção dos arbustos da universidade e até para servir como fonte de estudos nas diversas hortas, gerando também um excelente valor para futuros trabalhos acadêmicos.

4.3. Cenário 2: Utilização do biogás para geração de eletricidade

Para o dimensionamento do cenário 2 será utilizado o biodigestor de modelo indiano para realizar a digestão anaeróbia. De acordo com Santos (2017) o custo de materiais e mão de

obra para construir um biodigestor desse modelo que comporte 58,1 kg de resíduos alimentares provenientes do Hospital Geral do Estado de Alagoas (HGE) foi de R\$15.698,00 em 2017. Através da calculadora do cidadão (BANCO CENTRAL, 2023) o valor corrigido para 2023 é de R\$23.006,70.

Tendo em vista que no RU são gerados 145,5 kg de resíduos alimentares diariamente será acrescentado um excedente de 10% para possíveis picos de resíduos, resultando em 160 kg/dia. Por fim, resultou-se que para comportar os 160 kg diariamente será necessário desembolsar aproximadamente R\$63.357,52 na construção do biodigestor. Diferente do modelo HomeBiogás 7.0 neste caso não há um fabricante para informar a estimativa de geração diária de biogás, portanto, será avaliado o potencial energético teórico dos resíduos alimentares do RU.

Através da equação 1 exposta no item 3.3 e considerando uma média de 23% para a porcentagem de SV e a quantidade diária de 145,5 kg de resíduos alimentares gerados pelo RU, obteve-se o valor de sólidos voláteis igual a:

33,46 kg SV/dia

Utilizando a média dos valores de potencial metanogênico dos resíduos alimentares, apresentados por diversos autores, obteve-se o valor de $0,462 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \text{kgSV}^{-1}$. Portanto, a produção diária de metano gerada pelos resíduos alimentares do RU é igual a:

15,46 m³ CH₄/dia

O que equivale a **340,12 m³** de CH_4 por mês ou **4081,44 m³** de CH_4 por ano.

Assumindo que a porcentagem de CH_4 na composição do biogás oriundo da biodigestão dos resíduos orgânicos do RU seja equivalente a 60% obteve-se que o volume de biogás gerado é igual a:

25,77 m³ biogás/dia

O que equivale a **566,94 m³** de biogás por mês ou **6803,28 m³** de biogás por ano.

Empresas como a Enermac comercializam grupos moto geradores que operam com biogás, a fim da geração de energia elétrica. O modelo ENGGB de 30 kVA - 60Hz, tensão 220/127 com fator de potência 0,8, pode ser usado em operação contínua (sem limites de horas de operação por ano), gerando uma potência de 20 kW para a rede. (ENERMAC, 2021).

Para essa operação, o motogerador necessita de um fluxo de 9 m³ de biogás por hora, o que permite que o sistema opere durante 2,86 horas/dia. Visando o máximo aproveitamento de energia elétrica e sabendo que o Art. 7 da Resolução 482/2012 da ANEEL leva em conta o posto tarifário em que foi gerado a energia, o moto gerador pode ser ligado conectado à rede, sendo seu funcionamento durante o horário de ponta.

XI - em cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica, a compensação deve se dar primeiramente no posto tarifário em que ocorreu a geração e, posteriormente, nos demais postos tarifários, devendo ser observada a relação dos valores das tarifas de energia – TE (R\$/MWh), publicadas nas Resoluções Homologatórias que aprovam os processos tarifários, se houver (ANEEL, 2010).

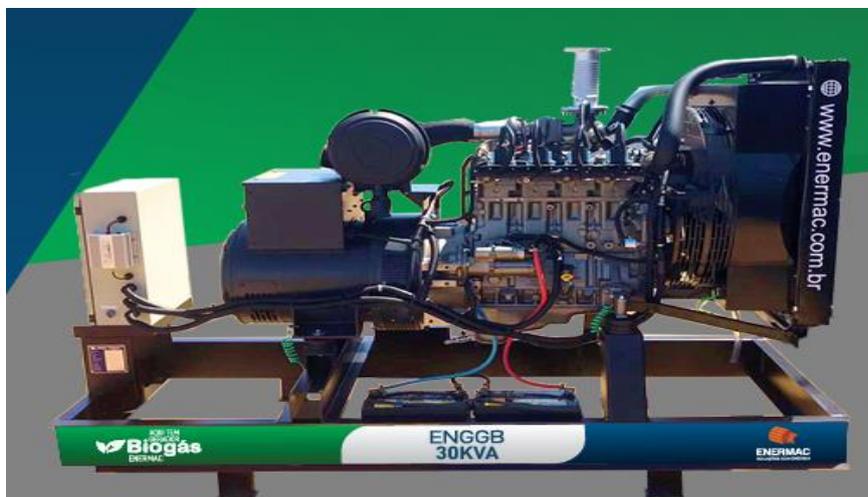
Com uma potência de 20 kW, seria possível alimentar laboratórios menores, onde geralmente no horário de ponta não há ninguém trabalhando, apenas equipamentos que necessitam estar continuamente ligados a rede, como freezers, geladeiras e iluminação. Outra opção viável também seria alimentar parte da demanda gerada pelo restaurante universitário durante o horário de ponta, que contempla o jantar. A energia gerada mensalmente pelo grupo motogerador seria de:

$$E_G = 20 \times 2,86 \times 22 = 1258,40 \text{ kWh/mês}$$

O modelo de referência da Enermac tem um custo de R\$98.637,00, informado via orçamento diretamente com a empresa. As dimensões e massa deste grupo motogerador será de 1.350x850x1.850 mm (CxLxH), com massa de 570 kg.

A figura 16 ilustra o modelo do motogerador da Enermac.

Figura 16 – Moto gerador da Marca Enermac.



Fonte: ENERMAC, 2021.

Dessa forma, a tabela 9 reúne os parâmetros resultantes do cenário 2.

Tabela 9 - Parâmetros resultantes do cenário 2.

Parâmetro	Valor
Investimento para construção de um biodigestor modelo indiano	R\$63.357,52
Investimento para aquisição do grupo moto gerador Enermac	R\$98.637,00
Investimento total	R\$161.994,52
Produção mensal de biogás	566,94 m ³
Energia gerada mensalmente	1.258,40 kWh

Fonte: Autor.

4.4. Análise de viabilidade econômica e ambiental

Através dos dois cenários estabelecidos na elaboração do trabalho, mostrou-se a necessidade de calcular a viabilidade econômica para realizar uma comparação do melhor retorno financeiro. Assim, levou-se em consideração uma Taxa SELIC de 13,8% conforme Banco Central do Brasil (2023) como Taxa Mínima de Atratividade. Para o cenário 1 foi-se necessário estimar o reajuste anual do preço por kg de GLP, conforme SINDIGÁS (2023) a taxa de reajuste anual nos últimos 5 anos foi de 12,53% a.a.

Em contrapartida, para o cenário 2 a tarifa de consumo no horário de ponta para consumidores da modalidade verde é de 2,19789 R\$/kWh para 2023, segundo Energisa (2023), além disso, observa-se que conforme Solfus (2023) houve uma taxa média de reajuste no preço da energia elétrica anual de 8,75% a.a. nos últimos 8 anos. Desta forma, a tabela 10 apresenta o valor estimado para o aumento anual do GLP e da energia no horário de ponta.

Tabela 10 - Previsão de aumento do preço do GLP e da energia na ponta.

Ano	Preço do GLP (R\$/kg)	Preço da energia na ponta (R\$/kWh)
0 (2023)	7,598	2,198
1	8,549	2,390
2	9,621	2,599
3	10,826	2,827
4	12,183	3,074
5	13,709	3,343
6	15,427	3,636
7	17,360	3,954
8	19,535	4,300
9	21,983	4,676
10	24,737	5,085
11	27,837	5,530
12	31,325	6,014
13	35,250	6,540
14	39,667	7,112
15	44,637	7,735

Fonte: Autor.

Com esses dados foi possível estimar a economia em R\$/ano, em cada um dos cenários, levando em consideração que no cenário 1 será produzido 4.494,60 kg de biogás equivalente em GLP/ano e no cenário 2 será gerado 15.100,80 kWh de energia na ponta/ano, conforme a tabela 11.

Tabela 11 - Previsão de economia anual.

Ano	Cenário 1 (R\$/ano)	Cenário 2 (R\$/ano)
0 (2023)	34.147,72	33.189,90
1	38.426,43	36.094,01
2	43.241,27	39.252,24
3	48.659,40	42.686,81
4	54.756,42	46.421,91
5	61.617,40	50.483,82
6	69.338,06	54.901,16
7	78.026,12	59.705,01
8	87.802,79	64.929,20
9	98.804,48	70.610,50
10	111.184,68	76.788,92
11	125.116,12	83.507,95
12	140.793,17	90.814,90
13	158.434,55	98.761,20
14	178.286,40	107.402,81
15	200.625,69	116.800,55

Fonte: Autor.

Por fim, conforme ilustrado pela tabela 12, para o cenário 1 o *Payback* se deu no oitavo ano após o investimento, enquanto para o cenário 2 a partir do sexto ano o investimento já se pagou. Conclui-se então que para ambos os cenários o investimento nos biodigestores e no grupo moto gerador para a geração de biogás se mostrou rentável, visto que a vida útil dos equipamentos é de no mínimo 15 anos, podendo durar mais dependendo da forma em que eles forem manuseados no decorrer do tempo.

Tabela 12 - VPL e TIR para ambos os cenários.

Ano	Cenário 1 (GLP)			Cenário 2 (Energia na ponta)		
	Fluxo de caixa (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)	Fluxo de caixa (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)
0 (2023)	-258.720,00	-258.720,00	-	-161.994,52	-161.994,52	-
1	38.426,43	-224.953,36	-85,15	36.094,01	-130.277,46	-77,72
2	43.241,27	-191.563,56	-51,02	39.252,24	-99.967,88	-38,39
3	48.659,40	-158.546,38	-26,98	42.686,81	-71.003,32	-13,96
4	54.756,42	-125.897,68	-11,58	46.421,91	-43.324,10	0,58
5	61.617,40	-93.613,33	-1,45	50.483,82	-16.873,17	9,63
6	69.338,06	-61.689,27	5,46	54.901,16	8.403,97	15,53
7	78.026,12	-30.121,48	10,35	59.705,01	32.559,41	19,54
8	87.802,79	1.094,01	13,91	64.929,20	55.642,93	22,35
9	98.804,48	31.961,15	16,57	70.610,50	77.702,08	24,38
10	111.184,68	62.483,80	18,60	76.788,92	98.782,34	25,86
11	125.116,12	92.665,83	20,17	83.507,95	118.927,14	26,98
12	140.793,17	122.511,02	21,42	90.814,90	138.177,99	27,83
13	158.434,55	152.023,15	22,41	98.761,20	156.574,57	28,48
14	178.286,40	181.205,92	23,21	107.402,81	174.154,77	28,99
15	200.625,69	210.063,02	23,86	116.800,55	190.954,84	29,39

Fonte: Autor.

A inferioridade do cenário 1 em relação ao retorno de investimento se explica principalmente pelo custo mais elevado da compra dos biodigestores Homebiogás 7.0. No entanto, na questão de praticidade, quando comparado com a construção do biodigestor indiano, apresenta vantagem, visto que são biodigestores de fácil instalação e podem ser facilmente movidos de lugar caso seja necessário. O fato do biofertilizante gerado não ter um valor estimado para ser incluído na previsão de economia anual prejudicou a análise do VPL.

Ressalta-se que, apesar dos 2 anos a mais para se pagar, o cenário 1 encerra os 15 anos de estimativa com um fluxo de caixa 71,72% maior que o cenário 2, visto que a taxa de reajuste anual do GLP é maior do que para a energia no horário de ponta. Além do positivo retorno financeiro que ambas as opções trariam para a universidade, destaca-se também a importância dos sistemas de biodigestores e grupo moto geradores para pesquisas e projetos de discentes da universidade, e contribuir para o incentivo de práticas que visam o desenvolvimento sustentável.

Segundo relatório da ABRELPE (2022) para cada tonelada de resíduo tratado na recuperação energética, deixa-se de emitir cerca de 1.550 kg de CO_2 . Conforme apresentado

neste estudo, o RU da UFGD gera cerca de 38,4 toneladas de resíduos alimentares por ano, logo:

$$CO_2 \text{ recuperado} = 1.550 * 38.400 = 59.520,00 \text{ kg de } CO_2/\text{ano}$$

Desta forma seria deixado de emitir aproximadamente 59.520,00 kg de CO_2/ano caso um dos dois cenários fossem implementados na universidade, contribuindo diretamente para a redução proposta no Compromisso Global do Metano.

5. CONCLUSÃO

Através dos resultados apresentados neste trabalho foi possível levantar a capacidade de produção de biogás através dos resíduos alimentares descartados no restaurante universitário da UFGD. A proposta de utilização dessa biomassa baseou-se em dois cenários distintos: O primeiro para a utilização como energia térmica pela substituição de botijões de gás GLP, e a segunda que priorizou a utilização como energia elétrica, podendo alimentar energeticamente laboratórios menores durante o horário de ponta ou até mesmo parte da demanda energética do próprio RU.

Diariamente, o restaurante universitário fornece em média 832 refeições e gera 145,5 kg de resíduos alimentares, resultando em 0,17 kg de resíduo por refeição. Comparou-se esses dados com outras universidades públicas e foi evidente um comportamento fortemente dependente da região, visto que campus localizados no Norte/Nordeste do Brasil contam com uma taxa de desperdício menor. Neste sentido, é possível realizar trabalhos relacionados a conscientização dos desperdícios de alimentos, visto que é possível reduzir este valor.

Para o cenário 1, obteve-se que uma capacidade de produção de biogás equivalente em GLP de 374,55 kg/mês, com um investimento inicial de R\$258.720,00 para a aquisição de 16 unidades do biodigestor Homebiogás 7.0, que de acordo com o estudo apresentado se mostrou excelente opção para a conversão do biogás em energética térmica, por ter fácil instalação, baixo custo de manutenção, mobilidade pós instalação e altos indicadores de qualidade no biogás gerado. Em relação a análise de viabilidade econômica o *Payback* se deu em 8 anos e obteve um fluxo de caixa alto ao final dos 15 anos e se mostrou rentável financeiramente.

Em relação ao cenário 2, observou-se uma capacidade de geração de energia de 1.258,40 kWh/mês, com um investimento inicial de R\$161.994,52 para a construção de um biodigestor modelo indiano e a aquisição de um grupo moto gerador Enermac ENGGB 30kVA. No que diz respeito a análise de viabilidade econômica o *Payback* foi menor que o observado no cenário 1, tendo o investimento retornado em 6 anos, no entanto gerou um fluxo de caixa 71,72% menor após 15 anos. A opção também se mostrou ser rentável financeiramente.

Para um melhor aproveitamento dos biodigestores é possível utilizar outros resíduos orgânicos no funcionamento do sistema, como os restos de varrição, podas e folhas, que segundo a UFGD (2017) representa 2400 kg/mês. Essa biomassa adicional poderia ser inserida nos biodigestores fora dos dias úteis, visto que neste trabalho os biodigestores foram

dimensionados para serem alimentados durante 22 dias do mês. Desta forma, a viabilidade econômica poderia se mostrar ainda mais vantajosa do que a observada no estudo.

A digestão anaeróbica de resíduos orgânicos possui um excelente potencial para aplicação em diversos contextos, inclusive para uso doméstico, com a aquisição do Homebiogás 7.0. soluções para desperdícios de alimentos devem ser colocadas em práticas para além do ganho de recuperação energética, mas contribuir também para a redução do efeito estufa. O Brasil possui capacidade de se tornar referência mundial na questão do tratamento de resíduos sólidos urbanos e possivelmente desenvolver tecnologias que reduzam os custos para aplicação deste projeto.

Como sugestão para futuros trabalhos, propõe-se a inserção de ganhos com a comercialização dos biofertilizantes no cenário 1, assim como os gastos de manutenção dos equipamentos em ambos os cenários. Outra possibilidade é que o projeto seja instalado parcialmente ou em sua totalidade para realizar uma análise comparativa da eficiência real em relação a eficiência teórica dos biodigestores, além da avaliação da qualidade do biogás e biofertilizante gerado.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2022**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 25 mar. 2023.

ABRELPE. **Saúde desperdiçada: O caso dos lixões, 2015**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/saude-desperdicada-o-caso-dos-lixoes/>. Acesso em: 25 mar. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa N°414, de 9 de setembro de 2010**, Brasília - DF, 9 set. 2010. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>. Acesso em: 3 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 26 mar. 2023.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Correção monetária por índices**. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>. Acesso em: 28 abr. 2023.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic. 2023** Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 24 abr. 2023.

BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 3. ed. São Paulo - SP: Ícone, 2011.

BLEICHER, K.; GRAY, C.; HOUSTON, K. **Assessing Renewable Technologies at Wild Mountain Cooperative**. Community Engaged Research Reports, 56p., 2017.

BLEY JÚNIOR, C. **Geração elétrica a partir do biogás com saneamento ambiental: a experiência da Itaipu Binacional.** In: I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais. Florianópolis - SC, 11 a 13 de mar de 2009.

CARREAS, N. **O biogás.** 2013. Disponível em: <http://www.renenergyobservatory.org/br/programa-de-capacitacao/o-biogas.html> Acesso em: 25 nov. 2021.

CPT. **Biodigestor: utilidades, instalação e precauções.** 2022. Disponível em: <https://www.cpt.com.br/cursos-agroindustria/artigos/biodigestor-utilidades-instalacao-e-precaucoes> Acesso em: 09 mai. 2023.

UNEP-CCAC. United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition (2021). **Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions.** Nairobi - Quênia: United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-3854-4.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios.** 2.ed. Belo Horizonte - MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 379p. 2007.

CIBIOGÁS (Foz do Iguaçu), NT002/2020. **Panorama do Biogás no Brasil em 2019,** Foz do Iguaçu - PR, p. 5, abr 2020.

CIBIOGÁS, **Panorama do Biogás no Brasil em 2019,** Nota Técnica, 2019. Disponível em: <https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nota-tecnica-panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.-1.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.

COELHO, J.M, **VIII FÓRUM DO BIOGÁS, BIOGÁS NO BRASIL: VISÃO ATUAL,** 2020. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd2186e981661bb69111_painel-02-rafael-barros.pdf. Acesso em: 20 nov. 2021.

DEGANUTTI, R; PALHACI, M.C J.P; ROSSI, M; TAVARES, R; SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. Universitário**, 14 fev. 2006.

DESCLAUX, L. **Desafios para o desenvolvimento do biogás no Brasil: a importância da coordenação na formulação de políticas públicas e na regulação**. 2019. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ONU - Nações Unidas, **Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs> Acesso em: 25 nov. 2021.

ENERGISA. **Tipos de tarifas**. 2023 Disponível em: <https://www.energisa.com.br/empresa/Paginas/grandes-empresas/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ENERMAC. **Ficha Técnica Grupo Gerador Biogás ENERMAC ENGGB 30KVA - 60Hz**. [S. 1.], 2021. Disponível em: https://enermac.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Datasheet_30kva.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética], **Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020, 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021> Acesso em: 20 nov. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética], **Eficiência Energética e Geração Distribuída**, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2026%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa%20para%20os%20pr%C3%B3ximos%2010%20anos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. [FNR]. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV). [S.l.], p. 234. 2010.

FERREIRA, B.O. **Avaliação de um Sistema de Metanização de Resíduos Alimentares com Vistas ao Aproveitamento Energético do Biogás**. 2015. 124 p. Dissertação (Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte - MG, 2015. Disponível em: <https://smarhteste.eng.ufmg.br/defesas/1132M.PDF>. Acesso em: 26 nov. 2021.

GAUTAM, B. **Produção de gás de HomeBiogas7.0 na província 1 (região de Terai) do Nepal e modelo HomeBiogas7.0 vs GGC-2047**. Pesquisa em Engenharia e Ciências Aplicadas, [S. l.], v. 49, n. 2, 2021. Disponível em: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/243700>. Acesso em: 6 abr. 2023.

GITMAN, L.J. **Princípios de Administração Financeira – Essencial**. 2. ed. Porto Alegre - RS: Bookman, 2001.

GONÇALVES, M.M.; ALBUQUERQUE, J.L. **Gestão de Resíduos Sólidos: Um Estudo no Restaurante Universitário da UFRPE à Luz da Agenda Ambiental na Administração Pública. XX ENGEMA, Pernambuco - PE**, p. 1-17, 13 dez. 2018. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/20/anais/arquivos/198.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2021.

CCAC - Climate & Clean Air Coalition. **Fast action on methane to keep a 1.5°C future within reach**, 2021. Disponível em: <https://www.globalmethanepledge.org/> Acesso em 09 mai. 2023.

GRYSCHER, J. M.; BELO, F. R. **Produção e uso do gás metano na agricultura e agroindústria**. Piracicaba - SP, 1983.

HOME BIOGAS BRASIL. **HomeBiogas: A solução sustentável para sua casa**. HomeBiogas Brasil, 2021. Disponível em: <https://homebiogas.com.br/>. Acesso em: 03 abr. 2023.

CHONG, S.; SEN, T. K.; KAYAALP, A.; ANG, H. M. **The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A State-of-the-art review**. Water Research, v. 46, n. 11, p. 3434–3470, 2012.

IEA, **Electricity generation from biofuels and waste by source**, 2021, IEA, Paris - França. Disponível em <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 20 nov. 2021.

IEA, **Renewable share in final energy consumption**, 2021, IEA, Paris - França. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 20 nov. 2021.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de Energia através de Biogás Proveniente de Esterco Bovino: Estudo de Caso na Fazenda Aterrado**. 2014. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

KONRAD, O.; AKWA, J. V.; KOCH, F. F.; LUMI, M.; TONETTO, J. F. **Quantification and characterization of the production of biogas from blends of agro-industrial wastes in a largescale demonstration plant**. *Acta Scientiarum Technology* (Online), v. 38, 2016.

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

LEMES JÚNIOR, A.B; RIGO, C.M; CHEROBIM, A.P.M. **Administração Financeira: Princípios, Fundamentos e Práticas Brasileiras**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005. ISBN 85-352-0904-2.

MARTINS, R.F. Q.; GAMBATI, J.F.; BATTAINI, B; STRINGHINI, V.A.; BUENO, L.O.; OLIVEIRA, K.A.; ALMEIDA, M.B.; OLIVEIRA, M.G.S. **Estudo dos Resíduos Sólidos Gerados no Restaurante Universitário da UFMT - Campus Cuiabá**. XIV ENEEAmb, Brasília - DF, v. 3, n. 2, p. 1-7, 18 out. 2016. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/estudo-dos-resduos-slidos-gerados-no-restaurante-universitrio-da-ufmt-campus-cuiab-24037>. Acesso em: 26 nov. 2021.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th Edition, MCGRAW – HILL EDUCATION, NEW YORK – EUA, 2003.

MILANEZ, A.Y.; GUIMARÃES, D.D; MAIA, G.B.S; SOUZA, J.A.P.; LEMOS, M.L.F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. mar. 2018.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES - MCTI. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil: 6ª edição**. Brasília – DF, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

NISHIMURA, R. **Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande - MS, 2009.

OLIVEIRA, M. M. **Estudo da Inclusão de Compartimentos em Biodigestores Modelo Canadense**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Santa Maria - RS, 2012.

PERRUCCI, G. G. S.; RODRIGUES, G. O. **Resíduos Orgânicos e a Aplicação Doméstica do Biogás Gerado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2018.

PICCIAFUOCO, B.D.F. **Avaliação dos Resíduos Sólidos Gerados no Restaurante Universitário da UNESP de Rio Claro: Uma Análise do Potencial de Compostagem**. 2013. 58 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Geociência e Ciência Exatas, Rio Claro - SP, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/120561>. Acesso em: 20 nov. 2021.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 11 mar. 2023.

PROBIOGÁS, **Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil**, 2016. Disponível em: https://www.giz.de/en/downloads/giz_barreiras_digital_simple.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

ROCHA, C. M. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares**. Monografia (Graduação em Engenheiro Ambiental e Sanitarista), Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Minas Gerais - MG. 2016.

SOUZA, A.B. **Projetos de investimentos de capital: elaboração, análise, tomada de decisão** – São Paulo - SP: Atlas, 2003.

TUNES, C.R. **PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE EFLUENTES ORGÂNICOS EM REATOR UASB**. Gurupi - TO, 2017. 73f.

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. **Reator UASB**. 2023. Disponível em: <http://www.saneamento.poli.ufrj.br/index.php/br/infraestrutura/reator-usab> Acesso em 09 mai. 2023.

RIZZO, A. D. L.; LEITE, S. **Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados**. Série Tecnologia Ambiental, v. 32, p. 102, 2004.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia Prático do Biogás**. Alemanha: Deutsches Biomasseforschungszentrum (dbfz), 2010. 236 p.

SALOMON, Karina R.; LORA, Electo E. S. **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil**. *Biomass & Bioenergy*, [s. l.],

ano 2009, v. 2, ed. 33, p. 1101-1107, 23 maio 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195340900052X>. Acesso em: 23 nov. 2021.

SANTOS, E.; SOUZA DO NASCIMENTO, K. L.; MALTA FERREIRA MAIA, S. .; JACQUELINE CAVALCANTI DA SILVA, S. . **Geração de energia elétrica e viabilidade técnico-econômica de um biodigestor no setor hospitalar.** *Pubvet*, [S. l.], v. 11, n. 12, 2017. DOI: 10.22256/PUBVET.V11N12.1263-1273. Disponível em: <https://ojs.pubvet.com.br/index.php/revista/article/view/1224>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SHAVER, Vanessa C. O. **Estudo de Caso para Dimensionamento de uma Usina Híbrida Moviada a Biomassa e Incineração no Campus Cidade Universitária da UFMS.** Orientador: Prof. Dr. Luigi Galotto Junior. 2020. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande - MS, 2020. Disponível em: https://engeletrica.ufms.br/files/2021/07/TCC-LGJ-Vanessa_Saher-2020.pdf. Acesso em: 27 nov. 2021.

SILVA, C. E. V. Sustentabilidade: **Avaliação da produção de biogás em um biodigestor de pequena escala.** Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade do Vale do Taquari. Lajeado - RS, 2021.

SILVA, D.R.; ROSAS, L.V.; LIMA, R.A. **Resíduos Gerados no Restaurante Universitário em uma Universidade Pública no Alto Solimões, Amazonas, Brasil: Waste Generated in the University Restaurant in a Public University in Alto Solimões, Amazonas, Brazil.** *Revista EDUCamazônia - Educação Sociedade e Meio Ambiente, Humaitá, Manaus - AM*, ano 2021, v. XIII, n. 1, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/educamazonia/article/view/8415>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SINDIGÁS. **Dados estatísticos.** Disponível em: https://www.sindigas.org.br/?page_id=3020. Acesso em: 02 mai. 2023.

SOLFUS. **Tarifa de energia sobe acima da inflação.** Solfus, 2022. Disponível em: <https://solfus.com.br/tarifa-de-energia-sobe-acima-da-inflacao/#:~:text=Entre%202015%20e%202022%2C%20a,4%2C7%25%20do%20IPCA.> Acesso em: 2 mai. 2023.

THOMAS, S. **Série: Biodigestores | modelo canadense.** 2021. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/s%C3%A9rie-biodigestores-modelo-canadense-thomas-santana/?originalSubdomain=pt> Acesso em 09 mai. 2023.

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. **Biogás: a universidade e o mercado** [arquivo de vídeo]. Caxias do Sul – RS: UCSPLAY, 2019. Disponível em: <https://ucsplay.ucs.br/video/biogas-a-universidade-e-o-mercado/>. Acesso em: 24 abr. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS. **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS).** Dourados - MS: Universidade Federal da Grande Dourados, jan. 2018 - jul. 2019. Disponível em: <https://portal.ufgd.edu.br/divisao/divisao-gestao-ambiental/plano-gerenciamento-residuos-solidos.> Acesso em: 26 nov. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS. **Refeições servidas no Restaurante Universitário 2019: Divulgação da quantidade de refeições servidas em 2019.** Dourados - MS: Universidade Federal da Grande Dourados, 2019. Disponível em: <https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/PRESTACAO-DE-CONTAS/Relat%C3%B3rio%20de%20Gest%C3%A3o%20UFGD%202019.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2021.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte - MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2005.

WORLD BANK GROUP. **What a Waste 2.0 - Trends in Solid Waste Management.** 2021. Disponível em: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html. Acesso em: 25 mai. 2021.

ZANETTE, A.L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil.** 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - RJ, 2009.

ZHANG L, LEE YW, J.D. **Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements.** *Bioresour Technol.* 2011 doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.082.