

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Lucas Lutz

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ALIMENTÍCIOS GERADOS NO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA, CAMPUS ARARANGUÁ

Araranguá

2023

Lucas Lutz

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ALIMENTÍCIOS GERADOS NO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA, CAMPUS ARARANGUÁ

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia, do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Kátia Cilene Rodrigues Madruga

Coorientador: Prof. Dr. Reginaldo Geremias

Araranguá

2023

Lucas Lutz

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ALIMENTÍCIOS GERADOS NO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA, CAMPUS ARARANGUÁ

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Elaine Virmond, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Geovana Savi, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Sabrina da Silva Ugioni da Rocha, B.Sc.
Universidade do Extremo Sul Catarinense

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Profa. Carla de Abreu D'Aquino, Dra
Coordenadora do Curso

Profa. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra
Orientadora

Lucas Lutz
Autor

Araranguá, 28 de novembro de 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lutz, Lucas

Aproveitamento energético de resíduos alimentícios gerados no restaurante universitário da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Araranguá / Lucas Lutz ; orientadora, Kátia Cilene Rodrigues Madruga, coorientador, Reginaldo Geremias, 2023.

93 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Biogás. 3. Energia. 4. Resíduos alimentícios. I. Cilene Rodrigues Madruga, Kátia. II. Geremias, Reginaldo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão a Deus e ao nosso Senhor Jesus Cristo por serem a fonte de toda graça e por me abençoarem ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço por terem me concedido tudo o que tenho e, especialmente, por guiarem meus passos até este momento. Sua misericórdia e provisão proporcionaram-me saúde e força para superar as dificuldades encontradas no caminho. Sem Sua direção e bondade, este percurso não seria possível.

Em especial, dedico este agradecimento aos meus pais (*in memoriam*), cujo legado e apoio foram alicerces para a conquista desta experiência única. Eles não apenas me deram a oportunidade, mas também me guiaram e ensinaram valiosas lições que moldaram o caminho que percorri.

Aos meus queridos irmãos, Ani, Beto, e Edivan, agradeço por compartilharem comigo este percurso, pelo apoio contínuo, compreensão e pela crença de que a realização deste sonho era possível. Agradeço por destacarem o valor de ter pessoas que amam, mesmo à distância, e por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim.

Quero expressar meus agradecimentos à professora orientadora Kátia Cilene Rodrigues Madruga, cuja experiência e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço também ao meu coorientador, Reginaldo Geremias, pela prontidão em oferecer sugestões e ideias que contribuíram significativamente para aprimorar a qualidade deste estudo.

Meu sincero agradecimento à Nutricionista do Restaurante Universitário do campus, Sabrina Ugioni, cuja colaboração foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por fornecer todas as informações necessárias e por estar sempre pronta para auxiliar em todas as etapas.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela oportunidade de ter uma formação de qualidade e aos dedicados professores que compartilharam suas vivências e contribuíram ao longo de toda a graduação.

RESUMO

Os serviços de alimentação universitária diariamente geram uma considerável quantidade de resíduos alimentares, o que suscita preocupações sobre a sustentabilidade ao longo de todas as etapas do ciclo de vida dos alimentos. A análise do potencial de reaproveitamento dos resíduos nos sistemas alimentares possibilita a utilização desses materiais para fins energéticos, reduzindo o impacto ambiental e promovendo uma abordagem mais sustentável. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo geral estimar a produção de biogás e eletricidade a partir de resíduos alimentícios gerados no Restaurante Universitário (RU), da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá. As principais etapas da investigação compreenderam: i) revisão da literatura; ii) caracterização do local de estudo; iii) quantificação dos resíduos alimentícios provenientes do RU; iv) determinação da série de sólidos dos resíduos; v) cálculo das dimensões do biodigestor; vi) avaliação da produção estimada de biogás; vii) estimativa da produção de energia elétrica a partir do biogás; viii) Análise de indicadores de sustentabilidade energética. Os resultados indicaram que no RU são gerados em média 22,66 kg de resíduos por dia. Os resíduos apresentaram 24,15 % de sólidos totais, 92,17 % de sólidos voláteis e 7,83 % de sólidos fixos. Constatou-se um potencial diário médio de produção de biogás de 4.66 m³.d⁻¹ e 263,97 kwh de energia elétrica por mês a partir dos resíduos, utilizando-se diferentes modelos. Esses resultados demonstraram que 27,4 % da demanda térmica e 11 % da demanda de energia elétrica do restaurante poderia ser suprida pelo aproveitamento energético dos resíduos. Concluiu-se que o aproveitamento energético dos resíduos alimentícios gerados no Restaurante Universitário contribuiria para a sua valoração e fomento ao uso de fontes renováveis de energia.

Palavras-chave: biogás, energia elétrica, resíduos alimentícios, Restaurante Universitário.

ABSTRACT

University food services generate a considerable amount of food waste every day, which raises concerns about sustainability throughout all stages of the food life cycle. Analyzing the potential for reusing waste in food systems makes it possible to use these materials for energy purposes, reducing environmental impact and promoting a more sustainable approach. In this context, the general aim of this study was to estimate the production of biogas and electricity from food waste generated at the University Restaurant (UR) of the Federal University of Santa Catarina, Araranguá Campus. The main stages of the research comprised: i) a literature review; ii) characterization of the study site; iii) quantification of the food waste from the UR; iv) determination of the solid series of the waste; v) calculation of the dimensions of the biodigester; vi) evaluation of the estimated production of biogas; vii) estimation of the production of electricity from biogas; viii) analysis of energy sustainability indicators. The results indicated that an average of 22.66 kg of waste is generated per day. The waste had 24.15 % total solids, 92.17 % volatile solids and 7.83 % fixed solids. An average daily biogas production potential of 4.66 m³.d⁻¹ and 263.97 kwh of electricity per month was found from the waste, using different models. These results showed that 27.4 % of the restaurant's thermal demand and 11 % of its electricity demand could be met by using the waste for energy. It was concluded that using the food waste generated at the University Restaurant for energy would contribute to its recovery and encourage the use of renewable energy sources.

Keywords: anaerobic biodigestion, biogas, electricity, food waste, university restaurant

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta interna de energia no Brasil.....	19
Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.....	20
Figura 3 – Múltiplas fontes de biomassa.....	21
Figura 4 – Etapas de produção de biogás por digestão anaeróbia.....	23
Figura 5 – Biodigestor de lagoa coberta (modelo canadense)	27
Figura 6 – Biodigestor UASB.....	28
Figura 7 – Biodigestor CSTR.....	30
Figura 8 – Local do estudo.....	36
Figura 9 – Planta baixa dos setores do Restaurante Universitário.....	38
Figura 10 – Área externa e principais setores do Restaurante Universitário.....	39
Figura 11 – Recipientes de coleta de resíduos. (A) usuários; (B) Preparação.....	42
Figura 12 – Pesagem de resíduos alimentares.....	44
Figura 13 – Preparação das amostras de resíduos.....	46
Figura 14 – Principais etapas da análise da série de sólidos.....	48
Figura 15 – Eficiência de conversão em energia elétrica (rendimento), para faixas de potência diferentes (modo contínuo)	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de investimento entre os principais modelos de biodigestores.....	31
Tabela 2 – Principais parâmetros para a escolha do biodigestor.....	32
Tabela 3 – Composição típica do biogás.....	33
Tabela 4 – Principais tecnologias para geração de energia a partir do biogás.....	34
Tabela 5 – Valores médios da composição dos alimentos do RU.....	42
Tabela 6 – Estimativa da máxima produção teórica de metano e percentagem da composição do biogás.....	52
Tabela 7 – PCI e PCS do biogás baseado no conteúdo de metano.....	56
Tabela 8 – Consumo mensal de energia elétrica no RU em 2022.....	60
Tabela 9 – Consumo mensal de GLP no RU em 2022.....	61
Tabela 10 – Quantidade de resíduos gerados no RU no período de 24/04 a 30/04/2023.....	62
Tabela 11 – Quantidade de resíduos gerados no RU no período de 19/06 a 25/06/2023.....	63
Tabela 12 – Quantidade de resíduos gerados no RU no período de 22/08 a 28/08/2023.....	64
Tabela 13 – Média mensal e anual de resíduos gerados no RU.....	65
Tabela 14 – Valores dos sólidos nos resíduos alimentícios coletados no RU.....	65
Tabela 15 – Parâmetros de dimensionamento do biodigestor modelo CSTR.....	66
Tabela 16 – Parâmetros considerados nos cálculos da produção de biogás.....	68
Tabela 17 – Estimativa de produção de biogás pelos 3 modelos avaliados.....	68
Tabela 18 – Valores operacionais relatados na literatura para condições semelhantes a este estudo.....	70
Tabela 19 – Estimativa de equivalência energética do biogás e consumo médio do restaurante.....	72
Tabela 20 – Estimativa de produção de energia elétrica a partir do biogás.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pontos importantes para escolha do sistema de biodigestão.....	26
Quadro 2 – Principais setores do Restaurante Universitário.....	37
Quadro 3 – Quantidade e valores das refeições e horário de atendimento do RU.....	40
Quadro 4 – Cardápio do RU no período de 24/04 a 30/04/2023.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Anaerobic digestion (Digestão anaeróbia)
AEPC	Alternative Energy Promotion Center (Centro de promoção de energia alternativa)
AGVs	Ácidos graxos voláteis
BEN	Balanco Energético Nacional
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BLC	Biodigestor de lagoa coberta
CHP	Combined Heat & Power (Sistema combinado de geração de calor e energia)
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor (Biodigestor com tanque agitado continuamente)
Cwa	Center Weather Advisory (Alerta Meteorológico Central)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETP	Energy Technology Perspectives (Perspectivas de Tecnologia Energética)
GEF	Global Environment Facility (Fundo Ambiental Global)
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energia)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
IWA	International Water Association (Associação Internacional da Água)
Ltda	Limitada
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI	Poder calorífico inferior
PEAD	Polietileno de alta densidade
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Policloreto de vinila
RU	Restaurante Universitário
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SETIC	Setor de Tecnologia da Informação
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica

UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Biodigestor de manta de lodo)

UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

VOCs Volatile Organic Compounds (Compostos Orgânicos Voláteis)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 Matriz energética e biomassa	19
3.2 Digestão anaeróbia e produção de biogás	22
3.3 Biodigestores	25
3.4. Biogás e suas aplicações	32
METODOLOGIA	35
4.1 Caracterização do local de estudo	35
4.2 Consumo de energia elétrica e de gás no RU	42
4.3 Coleta e determinação da quantidade de resíduos do RU	43
4.4 Determinação de série de sólidos nos resíduos	45
4.5 Dimensionamento do biodigestor	48
4.6 Estimativa de produção de biogás	51
4.6.1 Modelo Chen-Hashimoto	52
4.6.2 Modelo Deng modificado	54
4.6.3 Modelo Mashad e Zhang	55
4.7 Estimativa da produção de energia elétrica a partir do biogás	55
4.8 Indicadores de sustentabilidade energética	58
4.8.1 Independência Energética Térmica (IET)	58
4.8.2 Independência Energética Elétrica (IEE)	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 Consumo de energia elétrica e de gás no RU	60
5.2 Determinação da quantidade de resíduos do RU	61
5.3 Análise dos sólidos nos resíduos	65
5.4 Dimensionamento e escolha do sistema de biodigestão	66
5.5 Potencial de produção de biogás	67
5.6 Potencial de produção de energia térmica e elétrica	71
6. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos impulsionaram um rápido desenvolvimento econômico e social intensificando a demanda global por energia. . Estima-se que entre 2020 e 2050 o consumo de energia mundial aumentará cerca de 50 %. No Brasil, o cenário de crescimento econômico para o período até 2050 ainda resulta em relevante aumento da demanda de energia. Como consequência, o setor energético deverá realizar um esforço crescente para a produção de um volume cada vez maior de energia, que também vem acompanhado de aumento do seu auto-consumo. (Sagastume et al., 2020; IEA, 2022; EPE, 2022).

Paralelamente ao aumento do consumo, surgem as preocupações com as questões ambientais. Isso impacta na forma de utilização dessa energia, atualmente suportada por combustíveis fósseis, que geram degradação ambiental e riscos em seu procedimento de transformação, e impossibilitam a sustentabilidade a longo prazo. O Brasil ainda possui cerca de 54 % da sua matriz energética proveniente de combustíveis fósseis, mesmo sendo considerado referência mundial em fontes renováveis de energia (Rebouças et al., 2022; MME, 2022).

Nesse contexto, a busca por fontes alternativas de energia está se intensificando. Isso ocorre por causa de discussões acerca da possível escassez de fontes fósseis, como o petróleo, e dos elevados preços desse recurso. Além disso, há uma crescente preocupação com a segurança energética, que é agravada pelas mudanças climáticas atuais (Bizerra et al., 2018).

Em resposta a esses desafios, a busca por fontes de energia limpa e renovável tem ganhado força em todo o mundo. Esse movimento impulsiona investimentos em tecnologias inovadoras e políticas públicas que promovam a transição para uma matriz energética mais sustentável (MME, 2022).

Nos últimos 48 anos, as matrizes de Oferta Interna de Energia Elétrica do Brasil, da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e de outros países, apresentam tendências de redução das participações de petróleo e derivados e hidráulica, e de aumento das demais fontes. Muitos países estão adotando incentivos para incrementar o uso de fontes renováveis de energia, incluindo a bioenergia, isto é, a energia derivada de fontes biológicas como os produtos da cana (bagaço e etanol), lenha e outras bioenergias (lixívia, biogás, resíduos de madeira, resíduos da agroindústria e óleos vegetais) (MME, 2022).

Nessa premissa, pode-se citar como alternativa, os alimentos provenientes do descarte dos resíduos urbanos. De fato, os brasileiros descartam cerca de 35 % dos alimentos que preparam, o equivalente a 37 milhões de toneladas anuais, o que compreende quase 50 % do fluxo dos resíduos recolhidos no país. Uma das vantagens do uso de alimentos para a produção de biocombustível é que os resíduos alimentares são independentes do cultivo de culturas específicas – como no caso de outros biocombustíveis. Com isso, a energia do biocombustível é capturada da matéria orgânica desperdiçada pela sociedade e pode ser reaproveitada, usando técnicas conhecidas (ONU, 2022; EPA, 2022).

A tecnologia utilizada para converter resíduos alimentares em bioenergia é a biodigestão. Esse processo ocorre, naturalmente, em qualquer material orgânico sob condições anaeróbias e envolve a decomposição bioquímica da matéria orgânica por microrganismos específicos. Durante a biodigestão, os nutrientes contidos nos resíduos garantem a sobrevivência e reprodução desses microrganismos. Esse processo permite a degradação da fração orgânica não estável e poluente até a forma estável (Mafaciolli, 2012).

A decomposição anaeróbia por meio de biodigestores tem empregado, com sucesso, as tecnologias modernas de tratamento de biomassa, sendo que a principal distinção pode ser feita entre sistemas úmidos e secos com base na respectiva concentração de sólidos totais usada no processo de digestão. As tecnologias de biodigestores mais eficazes para a produção em pequena escala são: planta de domo fixo, onde o gás é acumulado no topo do digestor, sob o domo; planta de tambor flutuante, onde a água e as matérias-primas são misturadas em um tanque de mistura e acumuladas para produzir biogás e um digestor de tanque coberto revestido de material inflável. (Moura, 2017; Alam et al., 2022).

O tratamento por digestão anaeróbia gera subprodutos, dentre os quais, se destaca o biogás, que pode ser aproveitado como fonte de energia e o digestato, que pode ser utilizado como fertilizante ou condicionador do solo na agricultura por conter níveis elevados de macro e micronutrientes. O biogás é constituído, principalmente, por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), juntamente com vestígios de outros gases, como sulfeto de hidrogênio, vapor d'água e amônia. Sua composição está, intimamente, ligada ao tipo de matéria-prima utilizada (Deena et al., 2022; Simon; Castilhos Junior, 2020).

O biogás pode ser utilizado para diferentes fins energéticos: combustão direta (queimadores abertos e fechados); uso direto para geração de calor (ex. combustível para

caldeiras e aquecedores); Calor e energia combinados (Combined Heat & Power, CHP), também chamado de cogeração; substituição de combustíveis fósseis convencionais em veículos; e injeção em redes de distribuição de gás natural. Entretanto, para seus diversos usos, é necessário que o biogás seja purificado, sendo que o tipo de tratamento depende das suas características e das exigências tecnológicas de aproveitamento energético (Probiogás, 2017; Coelho et al., 2018).

Vários fatores influenciam a produção de biogás em biodigestores anaeróbios, sendo o mais contribuinte o tempo de retenção hidráulica. Para obter uma estimativa de produção teórica de biogás, vários modelos matemáticos foram propostos. Atualmente, o modelo IWA No. 1, desenvolvido pelo *IWA Task Group* é o que engloba a maior parte das reações envolvidas em digestores anaeróbios. No entanto, a limitação da compreensão mecanicista insuficiente dos processos bioquímicos e físico-químicos torna difícil prever com precisão a produção de biogás (Li et al., 2022).

Estudos recentes demonstram que algoritmos de aprendizado de máquina têm sido usados para construir modelos para prever a produção cumulativa de biogás em substratos específicos em experimentos em batelada. Além disso, modelos mais simples e robustos podem fornecer uma estimativa inicial da produção de biogás a partir das composições de lipídios, carboidratos e proteínas presentes no substrato (Li et al., 2022; Medeiros, 2020).

Resíduos alimentares são importantes matérias-primas para a produção de biogás. Os serviços de alimentação são atividades que geram grande quantidade de resíduos orgânicos, desde a manipulação e preparo dos alimentos, até o descarte das sobras contidas nos pratos após a refeição (Forner; De Conto, 2020).

Na literatura, verificam-se estudos que indicam a importância do aproveitamento desses resíduos associado à geração de energia. Dentre esses estudos, pode-se destacar o realizado por Moura (2017), no qual investigou o aproveitamento dos resíduos alimentares gerados no Restaurante Universitário Central Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) para produção de biogás e seu aproveitamento energético. Foi constatado que, com uma disponibilidade de biomassa de 780 kg de resíduos por dia, seria possível gerar em torno de 17 % do volume de biogás consumido pelo RU, o que promoveria a economia de custos com consumo de gás pela Universidade, além da valorização desses resíduos.

Além dos aspectos mencionados anteriormente, é crucial abordar alguns problemas ambientais adicionais associados à não recuperação energética dos resíduos.

Primeiramente, a decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos gera odores desagradáveis devido aos gases liberados durante o metabolismo dos microrganismos. Esses odores não apenas afetam a qualidade do ar na região, mas também podem causar desconforto e impactar negativamente a qualidade de vida das comunidades vizinhas (Ayiliara et al., 2020).

Outro ponto crítico é a contaminação das águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado, um líquido resultante da decomposição anaeróbica dos resíduos, conhecido como chorume. Esse líquido possui uma alta carga poluidora, contendo uma variedade de substâncias tóxicas que podem comprometer a qualidade da água. A contaminação resultante pode ter impactos significativos nos ecossistemas aquáticos, afetando a fauna e flora locais, além de representar uma ameaça à saúde humana caso a água contaminada seja utilizada para consumo (Abdel-Shafy et al., 2024).

Adicionalmente, a não recuperação energética dos resíduos contribui para a diminuição da vida útil dos aterros sanitários. O aumento constante na geração de resíduos, sem uma gestão eficiente e a aplicação de práticas sustentáveis, acelera o preenchimento dos aterros, tornando necessário o constante desenvolvimento de novas áreas para disposição de resíduos. Esse fenômeno não apenas exige a alocação de mais espaço, muitas vezes em áreas ambientalmente sensíveis, mas também intensifica os impactos ambientais associados à gestão inadequada de resíduos sólidos (Lino et al., 2023).

Assim, a não recuperação energética desses resíduos acarreta uma perda econômica e ambiental significativa, já que a sua decomposição produz gases de efeito estufa. Dessa forma, a adoção de medidas para a valorização energética desses resíduos pode promover a sustentabilidade da Universidade e representar uma oportunidade de aprendizado e pesquisa para estudantes e profissionais envolvidos (Costa; Dias, 2020; Santana et al., 2020).

O restaurante universitário da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em seu Campus de Araranguá gera resíduos alimentícios que, atualmente, não são recuperados energeticamente. Nesse cenário, o presente trabalho de Conclusão de Curso propõe realizar estudos de aproveitamento energético de resíduos gerados no RU do referido Campus, o que pode contribuir para a sua valoração e fomento ao uso de fontes renováveis de energia.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente investigação consistiu em estimar a produção de biogás e eletricidade a partir dos resíduos alimentícios gerados no Restaurante Universitário da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, com vistas à valoração desses resíduos e ao fomento do uso de fontes renováveis de energia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Obter um melhor conhecimento dos fundamentos teóricos relacionados ao objeto de estudo da pesquisa;
- ii) Determinar os valores quantitativos de resíduos alimentícios gerados no Restaurante Universitário (RU) da UFSC-Araranguá;
- iii) Selecionar a tecnologia mais adequada de biodigestão anaeróbia dos resíduos alimentícios do RU, com vistas ao seu aproveitamento energético;
- iv) Realizar cálculos de estimativa de produção biogás e eletricidade, a partir dos resíduos alimentícios do RU, utilizando diferentes modelos matemáticos;
- vi) Gerar subsídios para futuro aproveitamento energético dos resíduos alimentícios gerados no RU, com potencial de replicação em outras instituições.

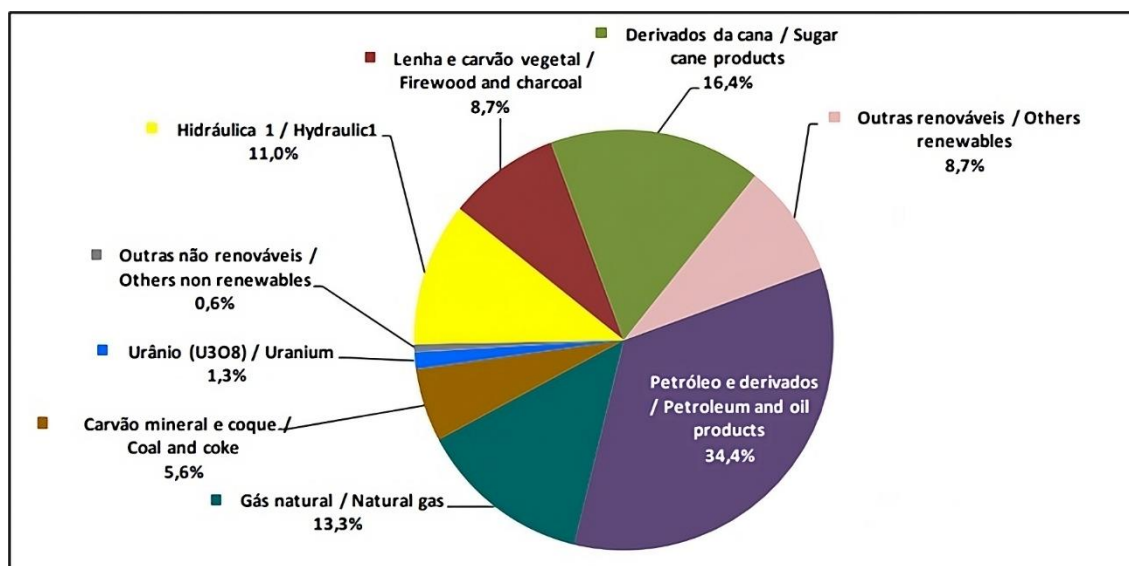
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MATRIZ ENERGÉTICA E BIOMASSA

Nos últimos 60 anos, o Brasil reduziu a dependência de importações de petróleo e mudou sua matriz energética, através de políticas que incentivaram a exploração de petróleo, o aumento da geração hidráulica e nuclear, a substituição do óleo combustível por óleos vegetais e o uso do álcool hidratado para reduzir o consumo de gasolina. Essas políticas sustentam a arquitetura institucional de energia atual do país (Lampis et al., 2022; Perdigão, 2020).

Conforme consta no Balanço Energético Nacional (BEN) do ano de 2022, divulgado pela Empresa de Pesquisa energética (EPE), a matriz energética brasileira no ano de 2021 (Figura 1) foi composta por uma grande porcentagem de fontes renováveis (cerca de 44,8 %). Entretanto, quando comparado com o restante do mundo, mais de 55 % de sua matriz energética ainda provém de fontes não renováveis, principalmente, de petróleo e gás natural, que correspondem respectivamente, a 34,4 % e 13,3 % (BEN, 2022).

Figura 1 – Oferta interna de energia no Brasil



Fonte: BEN (2022).

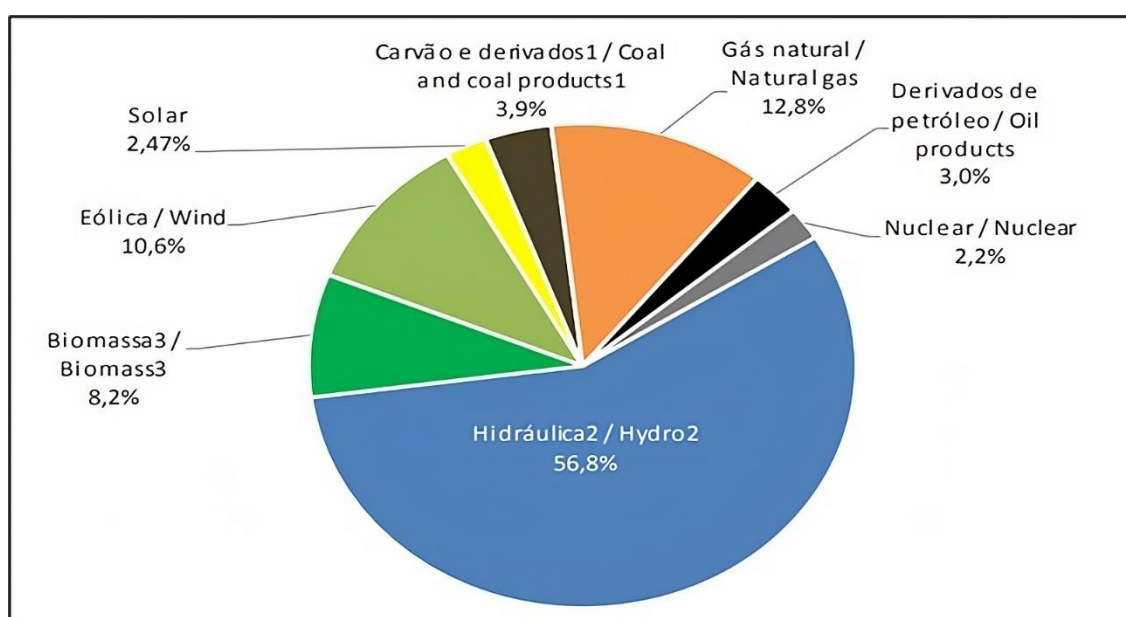
Para que ocorra uma mudança efetiva em relação à sustentabilidade energética, é necessário evoluir a matriz energética, abandonando fontes não renováveis e que causam

grande impacto ambiental, em favor de fontes mais limpas e renováveis. A transição para a produção e o consumo de energia renovável é um dos principais elementos dessa migração e é fundamental para que se possa alcançar uma postura mais sustentável em relação às fontes energéticas (Perdigão, 2020).

O Brasil possui uma matriz elétrica, principalmente, de origem renovável, correspondendo a 78,1 % da oferta interna de eletricidade (Figura 2) no ano de 2021, uma realidade pouco comum se comparada ao resto do mundo, onde o total de fontes renováveis é cerca de 28,0 %. A geração elétrica a partir de não renováveis correspondeu a 22,6 % do total nacional, representando um aumento em relação ao ano de 2020. Isso se deve, principalmente, à expansão da geração de energia elétrica a gás natural, que cresceu 62 %, e ao consumo industrial, que teve uma alta de 21 % (Oliveira et al., 2022; BEN, 2022).

O país depende em grande parte da energia hidrelétrica para geração de eletricidade, sendo que, em 2021, essa energia forneceu 57 % de sua demanda total. A geração eólica e solar cresceram, rapidamente, nos últimos anos e somaram 13 % da geração de eletricidade do país. A biomassa respondeu por 8,2 % e as usinas movidas a combustíveis fósseis representaram outros 19,7 % da geração de eletricidade, enquanto a energia nuclear representou 2,2 % (EPE, 2020; IEA, 2022; BEN, 2022).

Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil



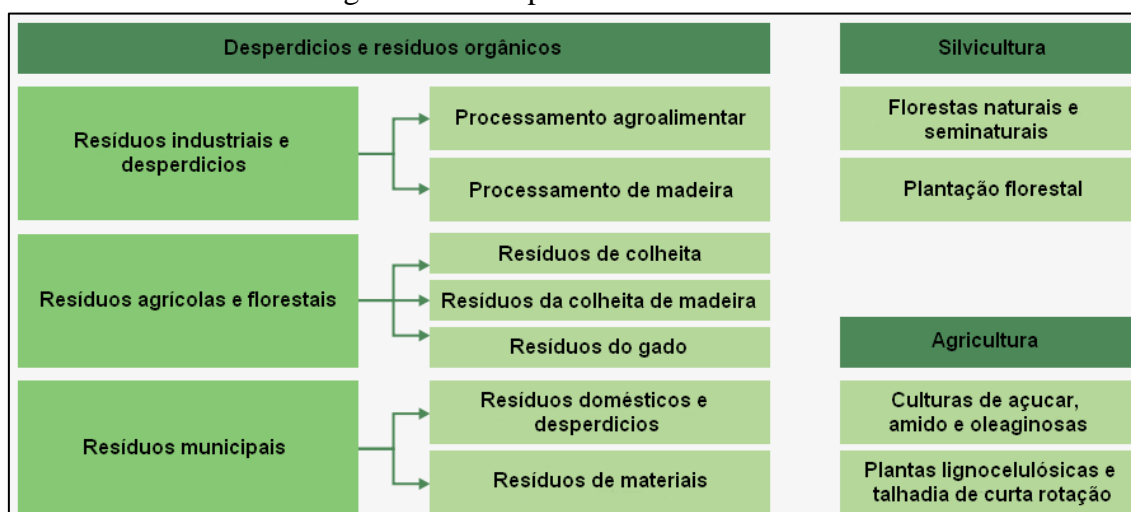
Fonte: BEN (2022).

O Brasil enfrenta o desafio de manter uma alta proporção de energia renovável e diversificar por outras fontes, em um contexto de crescente consumo de energia, seguindo a maioria das tendências mundiais na evolução da oferta e do consumo energético. Apesar disso, o país também valoriza suas potencialidades e vantagens comparativas, como é o caso da utilização da biomassa, que coloca o Brasil como referência mundial nesse setor, embora ainda tenha uma participação pequena, mas crescente na sua matriz energética (Losekann, 2020).

A biomassa refere-se a todos os tipos de materiais orgânicos renováveis derivados de organismos vivos, incluindo produtos e subprodutos agrícolas. Essa matéria contém a energia química acumulada através da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida, através de diferentes processos, em produtos energéticos de natureza distinta, tais como carvão vegetal, etanol, gases combustíveis e de síntese, óleos vegetais combustíveis e outros (Fertahi et al., 2023).

A biomassa energética apresenta rotas significativamente diversificadas, com extensa variedade de fontes (Figura 3) que vão desde os resíduos florestais, seus produtos e subprodutos ou resíduos, biomassa energética da agropecuária, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal e rejeitos urbanos (BEN, 2022).

Figura 3 – Múltiplas fontes de biomassa



Fonte: Adaptado de IEA ETP (2017).

Além disso, várias novas fontes potenciais estão sendo exploradas. Diferentes

tipos de resíduos agrícolas e também pastagens ou aquicultura (por exemplo, algas colhidas de corpos d'água de alta eutrofização) exibem potenciais sustentáveis inexplorados (IEA, 2023).

Resíduos alimentares representam uma significativa fonte de biomassa com potencial para a produção de biocombustíveis, especialmente o biogás, através do processo de digestão anaeróbica, permitindo assim a sua subsequente utilização como fonte de energia.

3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A digestão anaeróbia é um processo biológico economicamente viável e eficiente de recuperar o carbono para a geração de produtos de valor agregado, como biogás, ácidos graxos voláteis, biohidrogênio, álcoois e biofertilizantes. Nesse processo, os microrganismos presentes na matéria-prima convertem a matéria orgânica em uma saída de combustível útil e um efluente rico em nutrientes (Achinas et al., 2020; Arelli et al., 2022).

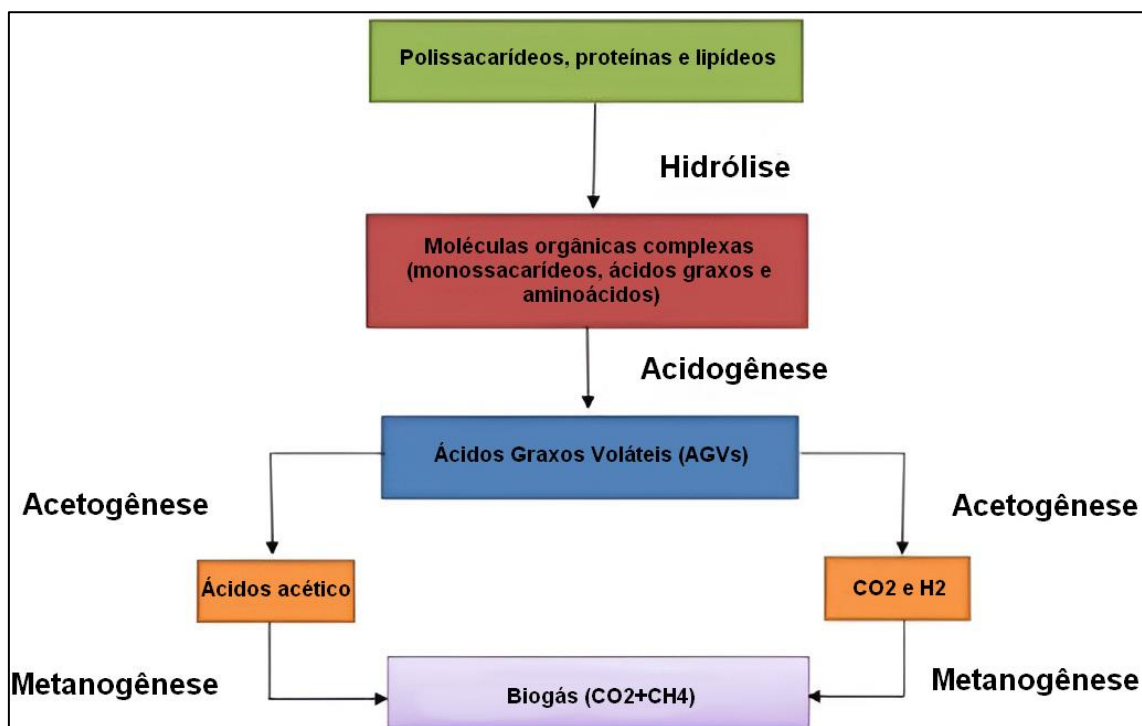
O processo de digestão anaeróbica é comumente encontrado em muitos ambientes naturais, como pântanos, e também está presente no estômago de ruminantes. Os processos levam cerca de três a seis semanas, dependendo da facilidade e grau de conversão do material de entrada e da tecnologia utilizada (Zupančič et al., 2022).

Por meio de diferentes mecanismos de reação, a digestão anaeróbia decompõe compostos bioquímicos maiores em compostos menores. Os microrganismos usados nesse processo regulam a secreção de enzimas adequadas para auxiliar o processo de digestão. O ritmo e a eficácia do processo também são mantidos pela proporção adequada de carbono-nitrogênio dos materiais residuais usados (Mustansar et al., 2022).

A digestão anaeróbia depende, fundamentalmente, da dinâmica das populações microbianas, assim como o teor de sólidos totais, que normalmente para matéria seca está entre 20 e 40 %, enquanto para úmido é >15 %. O crescimento populacional dessas comunidades depende das condições ambientais e também são afetadas pelas condições do ambiente circundante (Muthudineshkumar; Anand, 2019; Uddin et al., 2021).

O principal componente energético derivado do processo de digestão anaeróbia é o biogás. O processo de formação de biogás envolve uma complexa interação de vários microrganismos e ocorre basicamente em quatro fases distintas (Figura 4).

Figura 4 – Etapas de produção de biogás por digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Kalakech e colaboradores (2022).

De acordo com Kalakech e colaboradores (2022), as quatro etapas da digestão aeróbica são:

1. **Hidrólise:** Os materiais orgânicos complexos (por exemplo, proteínas, lipídios e carboidratos) são decompostos em compostos de baixa massa molecular, como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares simples.
2. **Acidogênese:** As bactérias ácidas promovem um processo de fermentação, produzindo ácidos graxos voláteis (AGVs), álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono.
3. **Acetogênese:** Ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio são formados, a partir dos ácidos graxos voláteis, por bactérias formadoras de ácido ou acetogênicas.
4. **Metanogênese:** Bactérias metanogênicas continuam a consumir os ácidos graxos voláteis e produzem gás metano. CO_2 e H_2 .

A estabilidade das reações depende de um equilíbrio delicado entre a acidogênese e a metanogênese, sendo que esta última é mais suscetível às mudanças no ambiente. Os microrganismos metanogênicos crescem lentamente e são altamente sensíveis às variações ambientais. Quando ocorre a falha na conversão do ácido acético e dos AGVs em metano pelo metanogênio acetoclástico, os AGVs se acumulam no reator, inibindo ainda mais a produção de metano, podendo levar ao colapso do sistema de digestão

anaeróbica (Yang et al., 2023).

A produção de biogás é influenciada por diversos fatores que afetam a digestão anaeróbia. Entre eles estão a temperatura, pH, alcalinidade total, presença de nutrientes, tipo de resíduo e relação carbono-nitrogênio. Contudo, é essencial destacar a necessidade de um manejo adequado do sistema de digestão. Isso envolve o tempo de residência ideal e a prevenção de problemas como a formação de crostas e rotas preferenciais para o resíduo, excesso de água, contaminação por detergentes ou desinfetantes usados em criadouros e presença de substâncias tóxicas, como metais pesados (Pereira; Ribeiro, 2020).

A seleção do substrato é crucial para o processo de produção de biogás, pois tem um impacto significativo, tanto na qualidade, quanto na quantidade do produto final gerado. Os critérios principais a serem avaliados, sendo comuns em todas as matérias-primas utilizadas nas plantas, são a composição, toxicidade, granulometria e solubilidade (Almeida, 2021).

Estudos relatam que matérias-primas com alto teor de nutrientes aumentam a geração de metano. Os resíduos alimentícios, por exemplo, possuem um alto valor nutritivo, sendo ricos em nutrientes como proteínas, vitaminas, minerais, fibras, etc. Esse tipo de resíduo é suficiente para o crescimento microbiano e, assim, a geração de metano pode ser aumentada (Ajay et al., 2021).

Os três principais grupos de orgânicos biodegradáveis dos alimentos são: carboidratos, lipídios e proteínas. Os carboidratos são compostos por monossacarídeos (açúcares simples) e polissacarídeos. Os lipídios apresentam estrutura bastante variadas, sendo os ácidos graxos e triglicerídeos seus principais representantes. As proteínas são polímeros formados por aminoácidos. Todos os três compostos orgânicos contêm proporções variadas de carbono, hidrogênio e oxigênio e as proteínas apresentam nitrogênio em sua estrutura (Mullins, 2021).

Cada grupo afeta o processo de digestão de maneira diferente, devido às suas características de biodegradabilidade ou taxa de hidrólise. Alimentos ricos em proteínas, geralmente, inibem a produção de biogás, devido às altas concentrações de amônia que alteram o pH e suprimem os metanogênicos. As proteínas também geram uma capacidade tampão e fornecem muitos nutrientes benignos para o processo de digestão anaeróbia. Da mesma forma, uma alta concentração de lipídios e carboidratos pode causar instabilidade do processo através da floculação do lodo (lavagem da biomassa), inibição direta, sobrecarga de VFAs e incrustação física do equipamento (Xue et al., 2020; Awe et al.,

2018; Ohemeng-Ntiamoah; Datta, 2018).

O processo de digestão anaeróbia também fornece um produto secundário, que é um sólido úmido ou uma suspensão líquida de matéria orgânica não degradável, micróbios, resíduos microbianos e subprodutos da digestão. Essa mistura úmida parcialmente estabilizada é conhecida como digestato, que pode ser posteriormente separada em frações sólidas e líquidas (Zupančič et al., 2022).

A composição do digestato depende da composição do substrato, fontes de inóculo, condições e configurações da digestão anaeróbia. Além disso, o digestato pode conter micronutrientes essenciais para a germinação, crescimento e desenvolvimento das plantas. No entanto, uma concentração excessiva de metais pesados ou salinidade pode dificultar o uso do digerido como fertilizante ou corretivo (Fertahi et al., 2023).

Em geral, o desenvolvimento do biogás para uma bioeconomia circular centralizada indica que quase todo o digestato deve ser usado como fertilizante para reciclar os nutrientes dos resíduos agrícolas (Feng et al., 2023).

3.3 BIODIGESTORES

Os sistemas de geração de biomassa, que realizam a conversão de energia por meio da biodigestão anaeróbia, são compostos por um biodigestor, que converte biomassa para biocombustíveis (Oliveira et al., 2022).

Os biodigestores são uma das abordagens de biotecnologia mais bem-sucedidas, viáveis e flexíveis para o tratamento de resíduos orgânicos para formação de produtos gasosos e a recuperação de nutrientes. Um biodigestor é um recipiente hermeticamente fechado, onde ocorrem reações bioquímicas na presença de microrganismos em condições anaeróbias. Esse digestor converte materiais orgânicos, incluindo resíduos alimentícios, em materiais orgânicos mais simples e vários produtos finais gasosos (Ajay et al., 2021; Skariyachan et al., 2022).

A escolha do tipo de biodigestor pode se dar em função de diferentes pontos/parâmetros (Quadro 1), dentre eles: sistema de alimentação, temperatura do reator, número de fases, sistema de agitação e, principalmente, tipo de substrato disponível.

Quadro 1 – Pontos importantes para escolha do sistema de biodigestão

Tecnologia	Pontos-chave	Opções
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontínua para biodigestores de batelada Alimentação contínua ou semicontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR Sistema de alimentação sólido ou líquido, dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato
Temperatura do reator	Risco para patógenos*	Temperatura mesofílicas quando não há risco de patógenos Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos (ex.: lixo orgânico doméstico)
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor Sistemas de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor

*Uma alternativa pode ser a utilização do processo de tratamento térmico (ex.: pasteurização).

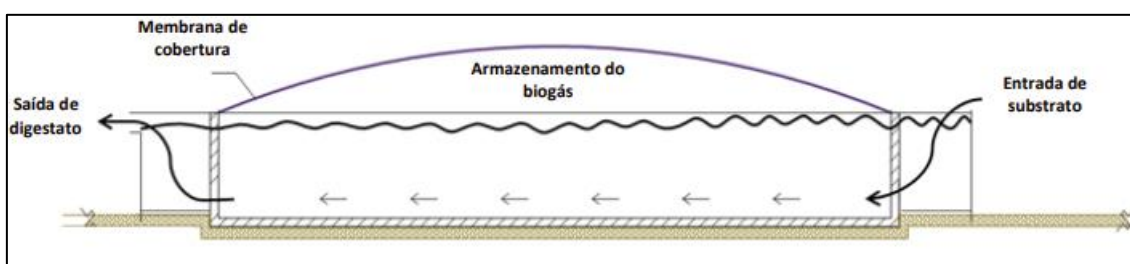
Fonte: Adaptado de Kunz et al. (2022).

A seleção da tecnologia de biodigestão mais apropriada para um projeto é determinada pela análise da quantidade e qualidade da biomassa a ser utilizada, bem como pelas propriedades físico-químicas da matéria-prima. A quantidade de biomassa disponível é um fator importante que influencia, tanto o volume do sistema de biodigestão, quanto a quantidade de biogás que pode ser produzida (GEF, 2022).

Os modelos mais encontrados no Brasil são o biodigestor de lagoa coberta (BLC) (conhecido também por Canadense) e suas variações (lagoa coberta tradicional e lagoa coberta com mistura completa - versão otimizada), reatores de manta de lodo (Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASB), reator com tanque agitado continuamente (Continuous stirred-tank reactor, CSTR) e o biodigestor em fase sólida (*dry digestion*) (Kunz et al., 2022; Pinheiro, 2022).

O BLC (Figura 5) é um reservatório escavado no solo, que passa por um processo de impermeabilização e é recoberto com um material geossintético, como polícloroeto de vinila (PVC) ou polietileno de alta densidade (PEAD). Ele é reconhecido por sua resistência à passagem de fluidos e gases, além de possuir a flexibilidade necessária para armazenar biogás (Kunz et al., 2022).

Figura 5 – Biodigestor de lagoa coberta (modelo canadense)



Fonte: GEF (2021).

Nesse biodigestor, o biogás que é produzido no processo de digestão anaeróbia infla a cúpula, onde permanece armazenado. Posteriormente, o biogás pode ser canalizado e utilizado como fonte energética (Ricci; Vaz, 2022).

Apesar das vantagens desse modelo de biodigestor, existem algumas limitações inerentes que podem comprometer a eficiência do tratamento e a recuperação do biogás. Por exemplo, a ausência de recursos automatizados para controlar e otimizar a temperatura operacional e uma compreensão completa do regime hidráulico, que influencia a distribuição de microrganismos no reator e o acúmulo de metabólitos inibitórios pelos microrganismos (Nascimento et al., 2021).

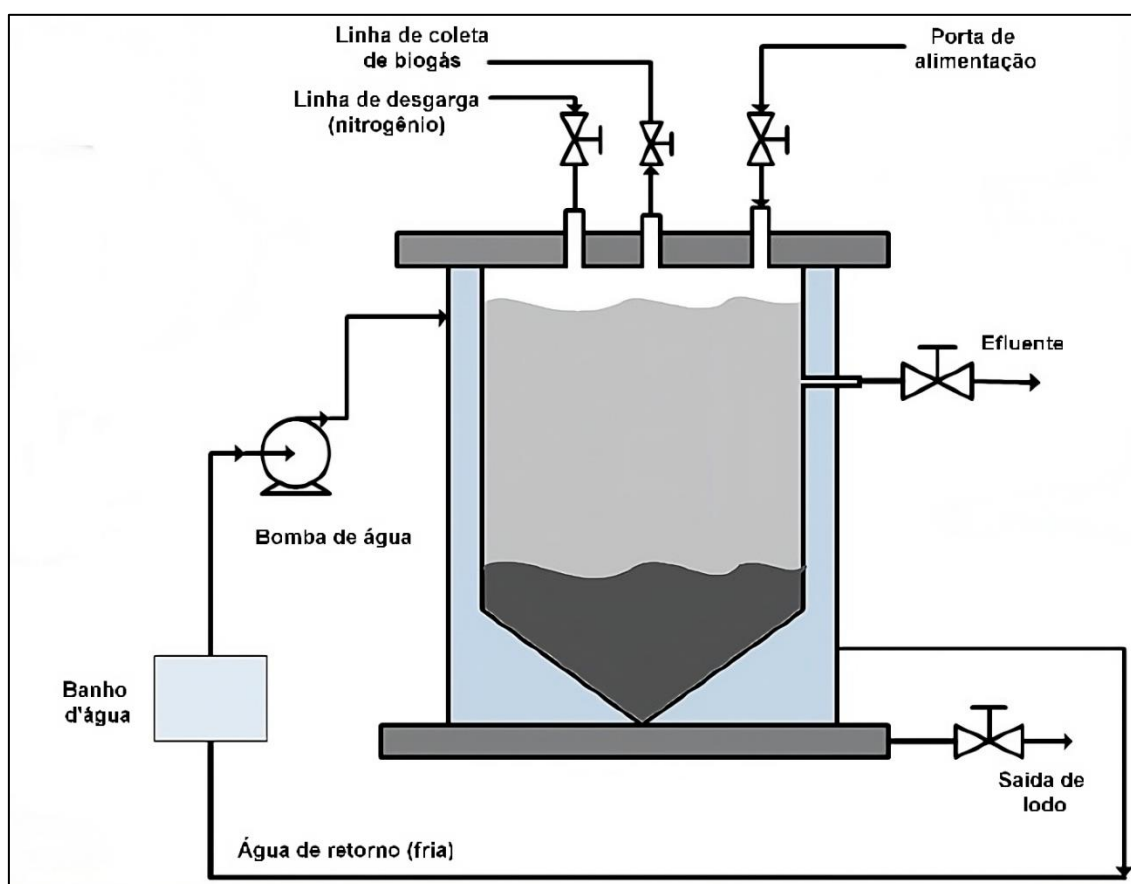
O reator UASB (Figura 6) é um modelo geralmente utilizado para concentrações de biomassa muito altas. É o mais difundido para esgoto e também pode ser utilizado para tratamento de matéria orgânica presente nos resíduos urbanos e rurais. Este tipo de biodigestor é caracterizado pelo fluxo ascendente dos efluentes e pela sua manta de lodo. A manta de lodo permite que a matéria orgânica insolúvel permaneça aprisionada,

reduzindo o tempo de retenção da matéria orgânica no biodigestor (Freitas et al., 2019).

As principais vantagens do sistema UASB são área muito reduzida, boa estabilidade operacional, operação simples e custos de construção e operação baixos, além da baixa produção de lodo em relação a outros tipos de tratamentos biológicos (Van Haandel et al., 2021, Collivignarelli et al., 2021).

Uma das desvantagens mais significativas é representada pela baixa taxa de formação e crescimento de biomassa granular que torna necessários longos períodos de inicialização. Porém, a inoculação de biomassa já granulada mostrou-se um método eficaz para reduzir a fase inicial. Outras desvantagens desta tecnologia incluem a dificuldade associada à operação da separação trifásica, a possível lavagem do lodo e a formação de espuma (Collivignarelli et al., 2021).

Figura 6 – Biodigestor UASB



Fonte: Adaptado de Ngema (2023).

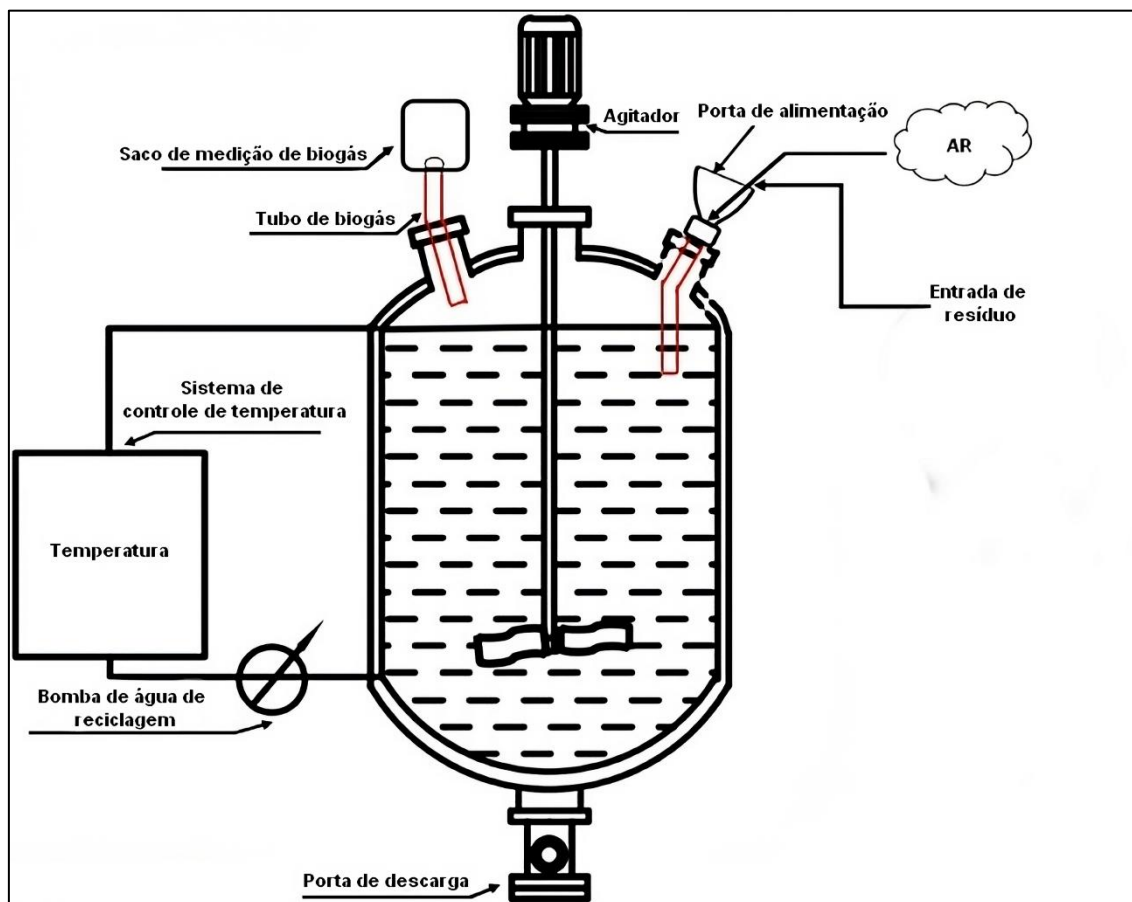
No reator CSTR (Figura 7), os substratos são alimentados de forma contínua ou semicontínua e o conteúdo do reator é misturado por meio de um misturador mecânico e,

em alguns casos, por meio de recirculação de biogás. O conteúdo do TS pode variar de 1 a 10 %. No CSTR o conteúdo do reator é bem misturado e a concentração dos constituintes é idealmente a mesma em todo o reator. Além disso, o tempo de retenção hidráulica (TRH) é igual ao tempo de retenção de sólidos (TRS) e geralmente é mantido em torno de 20 a 50 dias. Devido à rápida diluição do substrato no reator, o CSTR pode suportar cargas de choque mais altas. Ele é mais fácil de construir e operar, e o biogás gerado é frequentemente armazenado no topo do digestor usando uma membrana flexível de armazenamento de monômero de etileno propileno dieno, Biolene, que dá o formato de cúpula característico ao digestor (Khanal et al., 2019).

O reator CSTR destaca-se por sua construção simples, eficiente mistura homogênea, facilidade operacional e a capacidade de manter o sistema em um TRH específico. A otimização do TRH desempenha um papel crucial no controle da taxa de crescimento microbiana desejada. Além disso, este modelo tem sido extensivamente estudado (Gopalakrishnan et al., 2019).

No entanto, o CSTR tem uma grande desvantagem, que é chamada de fenômeno de “curto-circuito”. Isto é causado por estratégias específicas de mistura, alimentação e descarga do biodigestor, diferentes de outros reatores. Após a alimentação, o substrato recém alimentado será completamente misturado com o substrato existente no CSTR. Quando descarregado, o substrato fora do CSTR conterá substrato parcial alimentado nos dias anteriores, como ontem, anteontem e assim por diante, levando à perda de substrato não completamente digerido (Xu et al., 2021).

Figura 7 – Biodigestor CSTR



Fonte: Adaptado de Ruxiang et al. (2022).

Entre os três, o biodigestor do tipo lagoa coberta possui a tecnologia mais simples, demandando menor controle de processos e, conseqüentemente, exigindo um investimento mais baixo. Por outro lado, suas versões aprimoradas, como o biodigestor lagoa coberta com mistura completa, assim como os modelos UASB e CSTR, são mais complexas devido à maior automação e controle de processos, resultando em custos mais elevados (GEF, 2021).

Uma análise comparativa de investimentos, operação e manutenção (O&M), bem como consumo de energia entre os diversos tipos de biodigestores, está demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação de investimento entre os principais modelos de biodigestores

Modelo de biodigestor	Investimento (R\$.m⁻³ de biodigestor)	Custos de O&M (%CAPEX)	Consumo de energia elétrica	Vida útil do reator
Lagoa coberta	99	5,8 %	1 a 2 % da energia gerada	20 anos
Lagoa coberta com mistura completa	890 - 950	Manutenção: 1 a 3 % ¹	4 a 9 % da energia gerada	20 a 25 anos
UASB	Extremamente específico	1 a 5 % ¹	específico 1 a 5 % ¹ Variável Variável	Variável
CSTR	1.000	Manutenção: 1 a 3 % ¹ 2 a 4 % ² 9% -17 % ³	4 a 9 % da energia gerada	20 a 25 anos

¹ Resíduo Agropecuário e/ou Agroindustrial; ² Lodo de ETE; ³ RSU e FORSU; ⁴ Considerando a aplicação para geração de energia elétrica, a planta demandaria o percentual referido para os sistemas de biodigestão elencados no quadro. Caso o biogás seja destinado a outra aplicação, é necessário vincular o consumo elétrico dos equipamentos ao custo de operação da unidade. ⁵ Consumo total planta, em conjunto com o sistema de automação e o laboratório de físico-química. O consumo de energia elétrica, se deve ao funcionamento de equipamentos ligados a operação do biodigestor, como: agitadores, compressores e instrumentos de monitoramento e segurança. Equipamento de pré e pós-tratamento não foram considerados.

Fonte: Adaptado de GEF (2021).

Para selecionar a tecnologia de biodigestão mais adequada para o substrato do projeto, é crucial considerar vários fatores essenciais. Entre eles estão a composição da matéria-prima, temperatura ambiente e os requisitos microbianos, além do teor de ST, o teor SV e a COV. É importante destacar que os resíduos alimentares tendem a ter uma maior quantidade de material sólido em comparação com outros resíduos, como o esterco animal e o lodo de esgoto, por exemplo, principalmente devido à presença de matéria orgânica mais pesada e espessa. No caso específico dos resíduos de alimentos de cozinha, o teor de ST geralmente varia entre 20 e 30 %. Por isso, a escolha da tecnologia foi fundamentada nos valores recomendados de sólidos totais, conforme indicado na literatura, apresentados na Tabela 2 (Uddin; Wright, 2022; GEF, 2022; Izhar et al., 2021).

Tabela 2 – Principais parâmetros para a escolha do biodigestor

Tecnologia de biodigestão¹	Concentração de sólidos totais (ST)	Carga orgânica volumétrica (COV)
UASB	ST < 300 mg.L ⁻¹	0,5 a 8,0 kg _{SV adc.} .m ⁻³ .d ⁻¹
BLC	ST < 5 %	0,3 a 0,5 kg _{SV adc.} .m ⁻³ .d ⁻¹
CSTR	ST < 20 %	1 a 4 kg _{SV adc.} .m ⁻³ .d ⁻¹
Dry-digestion (digestão seca)	ST > 20 %	até 15 kg _{SV adc.} .m ⁻³ .d ⁻¹

¹foram consideradas apenas tecnologias de biodigestão com relevância para o Brasil, segundo PROBIOGÁS (2015).

Fonte: Adaptado de Kunz et al. (2019).

Além disso, ao considerar a aplicação da digestão úmida, é necessário que o teor de umidade da matéria-prima de resíduos seja superior a 85 %. No contexto deste estudo, o valor obtido foi de 75,85 %, conforme consta na Seção 5 que trata dos Resultados e Discussão. No entanto, vale destacar que o processo de secagem foi interrompido quando a diferença de massa atingiu 10 %, indicando que o teor de umidade é, na realidade, mais elevado do que o registrado. Outro ponto a ser considerado é que matérias-primas com teor de umidade elevado demandam uma quantidade significativa de energia para reduzir seu conteúdo de água, o que pode resultar em custos potencialmente superiores quando comparados a diluição da matéria-prima (Uddin; Wright, 2022).

Portanto, com base nos pressupostos teóricos anteriormente descritos, o modelo de biodigestor CSTR foi escolhido como potencialmente adequado para este estudo.

3.4. BIOGÁS E SUAS APLICAÇÕES

O biogás, uma fonte de energia renovável e versátil, é predominantemente composto por CH₄ e CO₂, além de diversas impurezas, tais como H₂S, vapor de água, siloxanos, NH₃ e VOCs. A composição do biogás (Tabela 3) varia conforme a composição da matéria-prima empregada e as condições do digestor anaeróbio (Gupta et al., 2022; Werkneh, 2022).

Tabela 3 – Composição típica do biogás

Componentes	Formula química	Concentração		Inflamabilidade	Tipo de componente
		Aterro	AD		
Metano	CH ₄	35-65	53-70	Não inflamável	Impureza
Dióxido de carbono (% vol)	CO ₂	15-50	30-47	Não inflamável	Impureza
Nitrogênio (% vol)	N ₂ e NH ₃	5-40	0-3	Não inflamável	Impureza
Hidrogênio (% vol)	H ₂	0-5	0-2	Inflamável	Impureza
Sulfeto de hidrogênio (ppm _v)	H ₂ S	0-100	0-10	Inflamável	Impureza
Oxigênio (% vol)	O ₂	0-5	0-2	Não inflamável	Impureza
Umidade (% vol)	H ₂ O	0-5	5-10	Não inflamável	Impureza
Amônia (ppm _v)	NH ₃	0-5	0-100	Inflamável	Impureza
Monóxido de carbono (% vol)	CO	0-3	-	Inflamável	Impureza
Siloxanos (mg/m ³)	-	0-50	0-41	Não inflamável	Impureza
COVNM _s (mg/m ³)	-	0-4500	0,5-1543	Inflamável	Impureza
HCS (mg/m ³)	-	-	0-200	Inflamável	Impureza
HCS halogenados (ppm _v)	-	20-200	-	Inflamável	Impureza

Fonte: Adaptado de Gupta, Kurien e Mittal (2022).

O fator mais importante para a manutenção da qualidade do biogás é manter a composição do metano acima de 50 %. Portanto, as estruturas de produção de biogás devem ser projetadas com base nos melhores ambientes para a existência da comunidade microbiana metanogênica (Kalaiselvan et al, 2022).

A tecnologia de biogás oferece uma rota muito atraente para utilizar certas categorias de biomassa para atender às necessidades parciais de energia. Existem muitas opções para a utilização do biogás em diferentes setores de energia (energia, calor, mobilidade) (Benti et al., 2021; Mertins; Wawer, 2022).

O biogás pode ser utilizado, localmente, para aquecimento e geração combinada

de calor e energia. Além disso, sua capacidade de armazenamento é bastante acessível e pode ser realizada de forma econômica, seja por meio de estoque da matéria-prima, ou na forma de gás comprimido. No contexto das atividades agropecuárias, o biogás se torna um importante fator de segurança energética, especialmente em áreas rurais remotas, onde pode reduzir significativamente as dificuldades no atendimento da demanda por energia elétrica (IEA, 2023; Pina; Marlísia, 2021).

A geração de eletricidade é um dos usos mais comuns do biogás. Normalmente, a energia é gerada através de motores combinados de calor e energia (CHP), motores de revestimento recíproco, turbinas a gás, microturbinas e células de combustível (Tabela 4), embora as células de combustível ainda sejam consideradas uma tecnologia emergente (Panesar, 2020; Labatut; Pronto, 2018).

Tabela 4 – Principais tecnologias para geração de energia a partir do biogás

	Turbinas a gás	Microturbinas	Motores recíprocos	Células de combustível
Eficiência elétrica (%)	22-36	25-35	22-45	40-60
Emissões (Nox, Sox, CO ₂ , PM, etc.)	Significativo	Moderado	Significativo	Baixo
Eficiência elétrica (%)	22-36	25-35	22-45	40-60
Flexibilidade de combustível	Razoável	Razoável	Razoável	Alto

Fonte: Adaptado de Labatut e Pronto (2018).

Motores de combustão interna e turbinas a gás, em particular, podem funcionar com gás em várias formas, como biogás bruto, biometano, gás natural e produtor. Estudos têm demonstrado que os motores a diesel são suficientemente eficientes, seja operando no modo bicomcombustível ou no modo diesel puro, desde que o poder calorífico e o suprimento de combustível sejam mantidos dentro de intervalo de valores aceitáveis (Kabeyi; Olanrewaju, 2022).

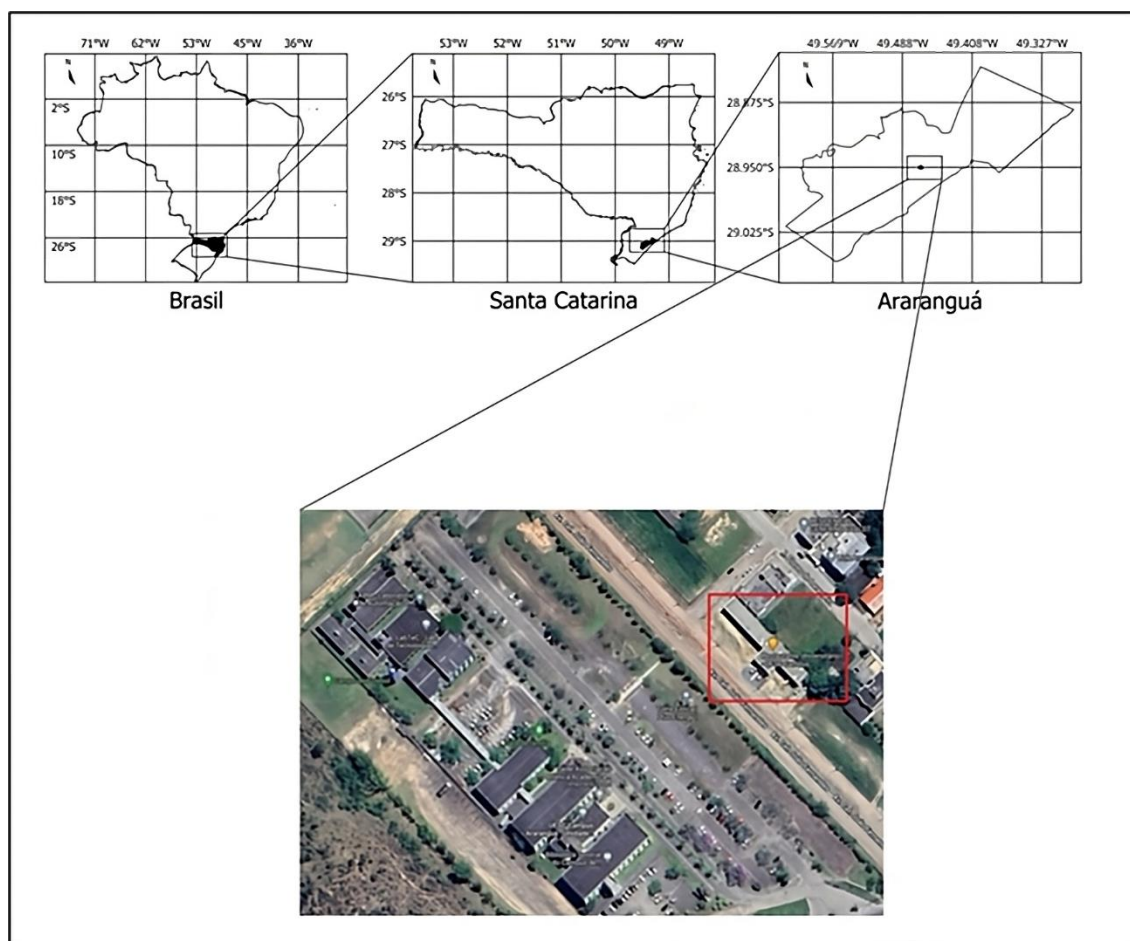
4 METODOLOGIA

A presente investigação foi dividida em 8 etapas principais, a saber: i) caracterização do local de estudo; ii) determinação do consumo de energia elétrica e de gás liquefeito de petróleo pelo RU; iii) quantificação dos resíduos alimentícios provenientes do RU; iv) determinação da série de sólidos dos resíduos; v) cálculo das dimensões adequadas do biodigestor; vi) avaliação da produção estimada de biogás; vii) estimativa da quantidade de energia elétrica gerada a partir do biogás; viii) análise de indicadores de sustentabilidade energética. A seguir, serão descritas as etapas envolvidas na presente pesquisa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi realizado no restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (Figura 8), localizado nas coordenadas geográficas de Latitude $-28^{\circ} 57' 2,268''$ e Longitude $-49^{\circ} 27' 58,68''$, na zona urbana do município de Araranguá, sul do estado de Santa Catarina, Brasil. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a região possui um clima subtropical seco de inverno (Cwa) e apresenta temperatura média anual de $19,3^{\circ}\text{C}$ (Wrege et al., 2012).

Figura 8 – Local do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

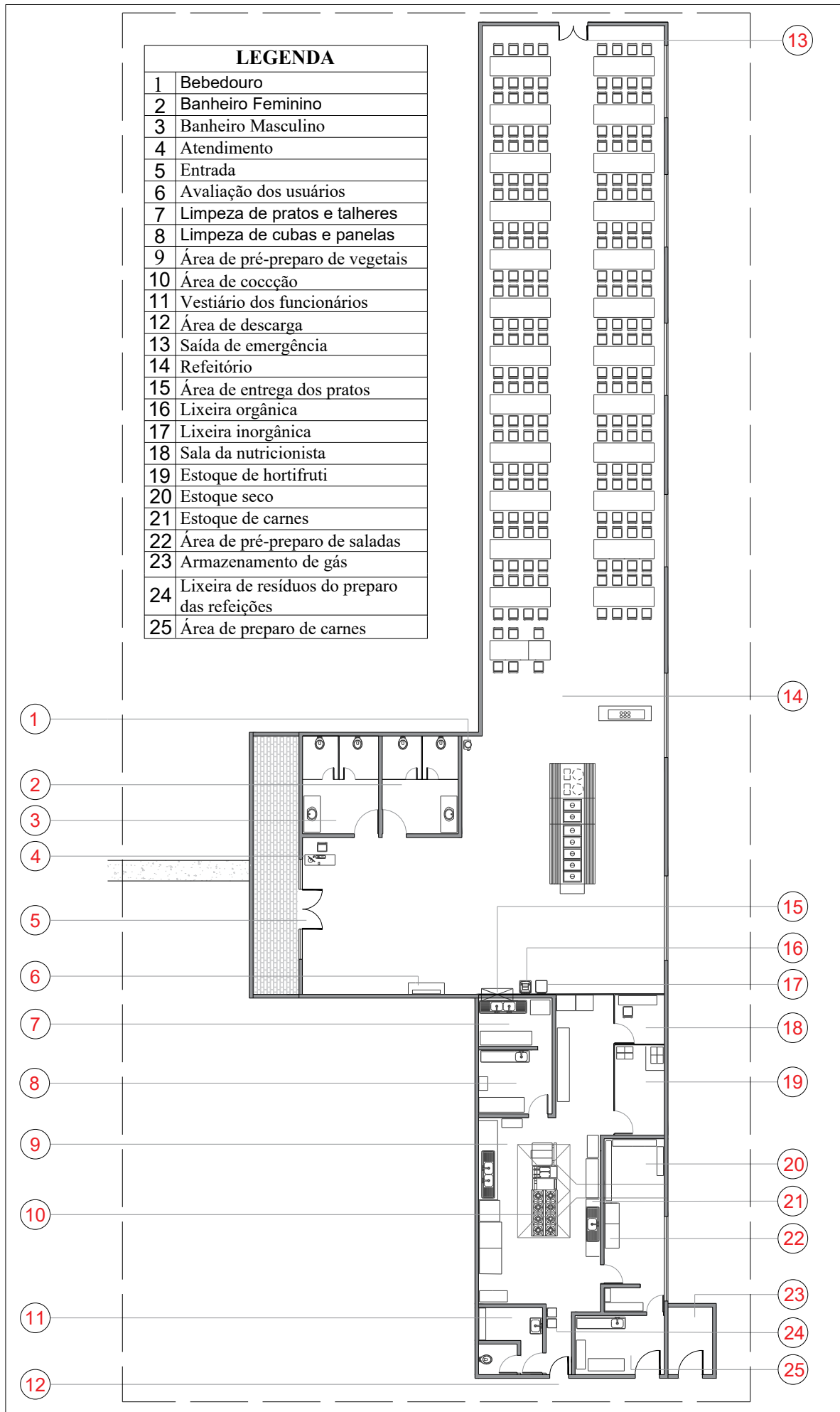
O Restaurante Universitário do campus Araranguá possui, aproximadamente, 612,5 m² de área construída. O Quadro 2 apresenta os principais setores do RU e sua descrição.

Quadro 2 – Principais setores do restaurante universitário

Setor	Descrição
Hall de entrada	Área de recepção dos usuários e avaliação do cardápio do dia
Sanitário	Área composta pelo banheiro masculino destinada aos usuários
Sanitário	Área composta pelo banheiro feminino destinada aos usuários
Refeitório	Local onde são servidas as refeições
Área do buffet	Local destinado às refeições
Área de limpeza de pratos e talheres	Local onde são lavados os pratos e talheres dos usuários do restaurante
Área de limpeza de cubas e panelas	Local onde são lavados todos os vasilhames e utensílios utilizados na preparação das refeições
Setor de produção das refeições	Cozinha composta pela área central de produção com ilha de cocção. Esta área é destinada à preparação das refeições, onde estão as panelas industriais, fogões industriais, fritadeiras, multifritas, etc...
Área de pré-preparo de vegetais	Destinada à retirada de cascas dos vegetais a serem utilizados na preparação das refeições
Área de pré-preparo de saladas	Local onde são picadas, fatiadas e temperadas as saladas
Vestiário dos funcionários	Local com armários, gabinetes sanitários e chuveiros para os funcionários
Sala da nutricionista	Local onde é feita a supervisão das operações de processamento das refeições
Estoque de hortifruti	Sala destinada à conservação de legumes, verduras e frutas frescas
Estoque seco	Sala onde ficam os produtos utilizados diariamente, como arroz, feijão e farinhas e outros materiais de reposição
Estoque de carnes	Freezer destinado à conservação dos gêneros perecíveis
Área de preparo de carnes	Sala que contém os utensílios usados para o corte das carnes
Área de descarga	Destinada ao recebimento de controle de qualidade de mercadorias.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9 exibe a planta baixa dos setores do Restaurante Universitário, juntamente com a respectiva localização de cada um.



A Figura 10 apresenta o registro fotográfico da área externa do Restaurante Universitário e de seus principais setores.

Figura 10 – Área externa e principais setores do RU



Setores: (A) Área externa; (B) Hall de entrada; (C) Sanitários; (D) Sistema de controle de satisfação do cliente; (E) Refeitório; (F) Sala da Nutricionista; (G) Setor de produção das refeições; (H) Área de limpeza de pratos e talheres; (I) Área de limpeza de cubas e panela; (J) Sala de pré-preparo de carnes; (K) Estoque seco; (L) Estoque de carnes; (M) Estoque de hortifruti.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A UFSC, Campus Araranguá, tem um total de 1299 alunos matriculados na graduação, 313 na pós-graduação e 209 servidores que possuem acesso aos Serviços de Alimentação da Universidade. A empresa prestadora do serviço de produção e distribuição de refeições no RU, atualmente, é a Mãos Peruanas Restaurante, Lanchonete e Eventos Ltda (SETIC-UFSC, 2023).

O restaurante disponibiliza 02 (duas) refeições diárias (almoço e jantar), com valores distintos para estudantes e servidores, além de público externo. As refeições são servidas de segunda-feira a domingo, incluindo dias não letivos e feriados.

O Quadro 3 apresenta as principais informações relativas à quantidade média de refeições servidas, horários de atendimento e valores das refeições.

Quadro 3 – Quantidade e valores das refeições e horário de atendimento do RU

Refeição	Quantidade de refeições		Horário de atendimento		Valores		
	Seg-sex	Finais de semana e feriados	Seg-sex	Finais de semana e feriados	Alunos	Servidores	Público externo
Almoço (média diária)	560	182	11:00h às 13:35 h	11:00 h às 13:35 h	R\$ 1,50	R\$ 2,90	R\$ 15,00
Jantar (média diária)	335	89	17:00h às 19:05 h	17:00h às 19:05h			

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cardápio das refeições é preparado pelos nutricionistas do próprio estabelecimento e é modificado, mensalmente, levando em consideração a

disponibilidade de ingredientes e a preferência dos usuários. O cardápio é disponibilizado, semanalmente, na *webpage* oficial da Universidade. O Quadro 4 apresenta, como exemplo, cardápio servido pelo Restaurante Universitário no período de 24/04 a 30/04/2023.

Quadro 4 – Cardápio do RU no período de 24/04/2023 a 30/04/2023

Cardápio	24/04/23	25/04/23	26/04/23	27/04/23	28/04/23	29/04/23	30/04/23
Fixo	Arroz branco Arroz integral Feijão preto Ervilha partida	Arroz branco Arroz integral Feijão carioca Proteína de soja	Arroz branco Arroz integral Feijão vermelho Lentilha	Arroz branco Arroz integral Feijão preto Grão de bico	Arroz branco Arroz integral Feijão preto Ervilha partida	Arroz branco Arroz integral Feijão vermelho Proteína de soja	Arroz branco Arroz integral Feijão preto Grão de trigo
Carne	Frango acebolado	Mignon suíno ao molho de laranja	Carne com legumes	Frango ao molho de mostarda	Cubos de pernil ao molho	Frango a parmegiana	Escondidinho de carne
Guarnição	Batata rústica	Macarrão com ervas	Farofa de couve	Purê de cenoura	Torta de legumes	Macarrão ao alho e óleo	Abóbora cozida
Saladas	2 opções	2 opções	2 opções	2 opções	2 opções	2 opções	2 opções
Sobremesa	Fruta	Fruta	Bolo de mandioca	Fruta	Sobremesa	Fruta	Sobremesa

Fonte: Adaptado de SETIC-UFSC (2023).

A Tabela 5 apresenta os valores médios da composição macromolecular dos alimentos que são considerados no preparo das refeições do Restaurante Universitário.

Tabela 5 – Valores médios da composição dos alimentos do RU

Composição Macromolecular	Carboidratos	Proteínas	Gorduras saturadas	Gorduras totais
Valores (%)	55-75	10-15	<10	15-30

Fonte: SETIC-UFSC (2023).

No cenário atual, os resíduos alimentares orgânicos gerados pelos usuários do RU são separados dos inorgânicos (Figura 11A). Por sua vez, os resíduos orgânicos gerados na preparação dos alimentos e na “sobra suja” são dispostos em recipientes específicos (Figura 11B). Todos os resíduos orgânicos são coletados por um produtor da área rural de Araranguá e utilizados como alimento pelos animais da sua propriedade. Os resíduos inorgânicos são coletados pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) e dispostos no Aterro Sanitário de Içara/SC (SNIS, 2021).

Figura 11 – Recipientes de coleta de resíduos. (A) Usuários; (B) Preparação das refeições



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E DE GÁS NO RU

Na presente etapa foram obtidas informações e dados sobre a aquisição e consumo de energia elétrica e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) pelo Restaurante Universitário, os quais foram fornecidos pela empresa prestadora dos serviços. Esses dados contribuíram para a realização da etapa de avaliação dos indicadores de sustentabilidade energética do

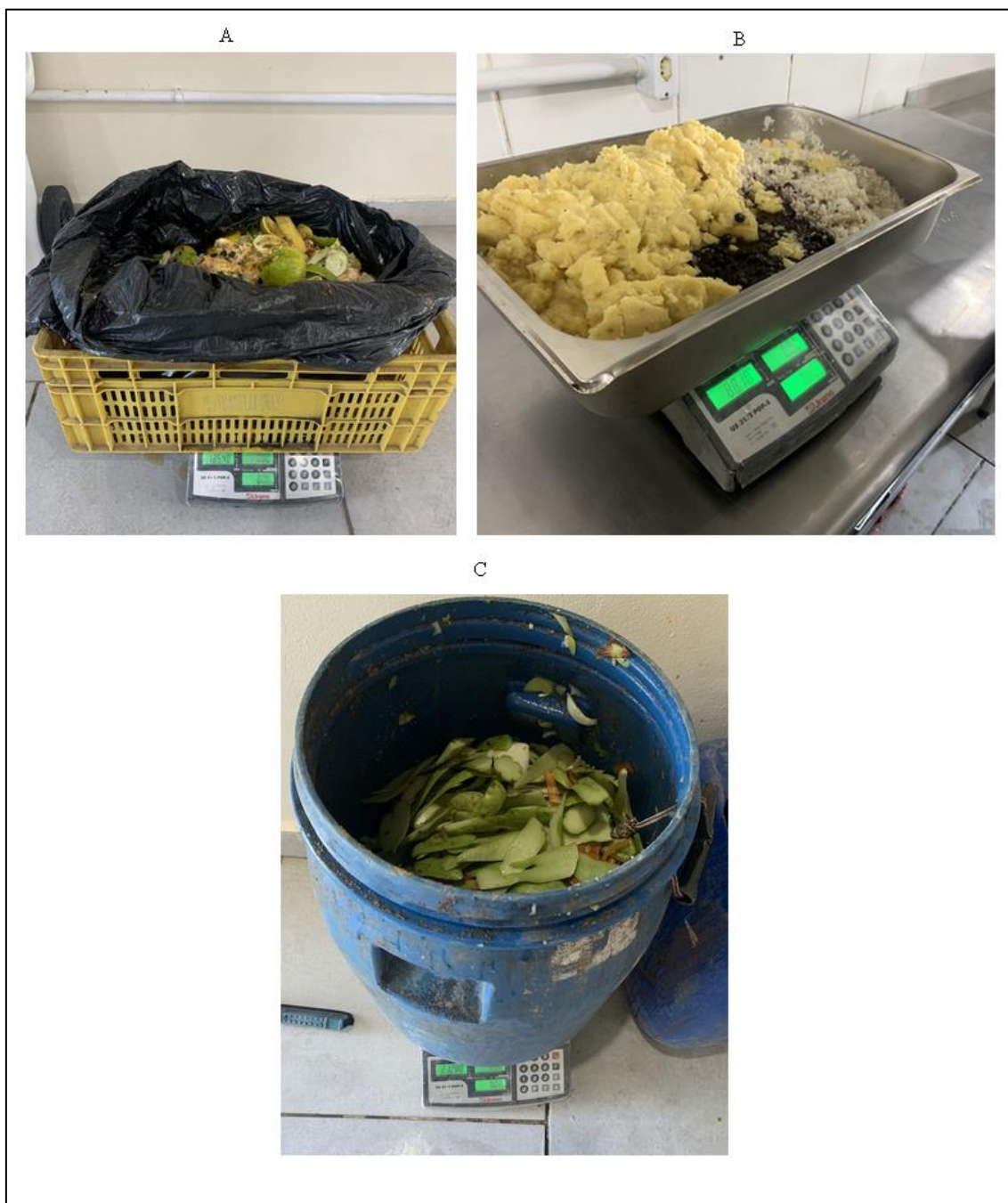
RU presente na metodologia.

As informações de consumo de energia elétrica referem-se ao ano de 2022, abrangendo o período de janeiro a dezembro. Já os dados relacionados ao consumo de GLP foram coletados durante o ano de 2023, compreendendo os meses de janeiro a outubro. As médias mensais foram calculadas para ambas as fontes de energia, proporcionando uma melhor visão dos padrões de consumo ao longo desses períodos específicos.

4.3 COLETA E DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS DO RU

Nesta etapa, foi realizada a determinação da quantidade de resíduos alimentícios provenientes de 03 (três) fontes: i) resíduos descartados pelos usuários (figura 12A); ii) resíduos descartados do restante do buffet (figura 12B); iii) resíduos descartados na preparação dos alimentos (figura 12C). Para tanto, foi efetuada a pesagem dos resíduos por 07 (sete) dias consecutivos, em 03 (três) diferentes períodos, a saber: 24/04/2023 a 30/04/2023; 19/06/2023 a 25/06/2023; 22/08/2023 a 28/08/2023. Todas as coletas e pesagens foram feitas após o fechamento do estabelecimento, considerando as refeições do almoço e do jantar. Para a determinação da quantidade de resíduos, utilizou-se uma balança digital, com capacidade máxima de 30 kg. Se o resíduo ultrapassasse o valor máximo da balança, eram feitas divisões em recipientes menores, que eram somadas no final da pesagem. Por meio dessa etapa, foi possível estimar a quantidade anual de resíduos alimentícios descartados pelo restaurante. A Figura 12 apresenta a pesagem dos resíduos alimentares.

Figura 12 – Pesagem de resíduo alimentares



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 DETERMINAÇÃO DE SÉRIE DE SÓLIDOS NOS RESÍDUOS

A coleta e preparação das amostras foram conduzidas na área do Restaurante Universitário da UFSC, campus Araranguá. Para tanto, foram coletados resíduos orgânicos provenientes das 03 (três) fontes citadas no item 4.3, na quantidade de aproximadamente 1 kg de cada fonte, utilizando-se luvas de proteção e embalagens de acondicionamento para pesagem.

Em uma análise visual preliminar, foram constatados diferentes tipos de resíduos compostos, principalmente, por alimentos básicos (arroz branco, arroz integral, feijão preto e proteína vegetal), carnes (suíno assado ao molho shoyo), guarnição (aipim), fruta, saladas e hortaliças, sobras de alimentos de origem animal e vegetal (cascas de frutas, legumes e verduras).

Em seguida, o resíduo foi misturado manualmente até formar uma mistura homogênea (Figura 13A). Na sequência, foi realizado o quarteamento da mistura por 3 vezes, resultando em uma amostra final de aproximadamente 780 gramas (Figura 13B). A amostra de resíduos foi triturada em um processador de alimentos (Figura 13C) e, posteriormente, devidamente acondicionada e mantida sob refrigeração por um período de 24 horas até o momento da análise para determinação dos teores de sólidos (Figura 13D).

Figura 13 – Preparação das amostras de resíduos



(A) Coleta e mistura da amostra; (B) Quarteamento por 3 vezes; (C) Trituração; (D) Amostra final para determinação dos teores de sólidos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) presentes na amostra dos resíduos foi realizada, seguindo a metodologia proposta pela *Environmental Protection Agency* (EPA, 2001), com ajustes.

Para a determinação de ST, foram realizados os seguintes procedimentos: i) calcinação de 4 cadinhos de porcelana, previamente numerados, a 550 °C, por 2 horas, em forno mufla (SPlabor SP-1200); ii) retirada dos cadinhos da estufa e secagem em dessecador até resfriamento; iii) pesagem dos cadinhos em balança semi-analítica (Marte AD330); iv) pesagem das amostras dos resíduos em cada cadinho, previamente tarados; v) aquecimento dos cadinhos contendo as amostras, a 104,1 °C, por 2 horas, em estufa (Nova Instruments NI 1512D); vi) retirada dos cadinhos da estufa e manutenção em um dessecador até resfriamento; vii) pesagem dos cadinhos com as amostras; viii) repetição das etapas v a vii até atingir a massa constante.

O teor de ST foi calculado usando a Equação 1 proposta por Wilder et al. (1997).

$$ST = \frac{(A-B)}{(C-B)} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

ST = Teor de sólidos totais em porcentagem (%)

A = cadinho + amostra seca em gramas (g)

B = massa do cadinho em gramas (g)

C = amostra úmida em gramas + cadinho (g)

Para a determinação dos teores de SF e SV, os 4 cadinhos contendo as amostras do teste de ST anteriormente realizado, foram submetidas à calcinação no forno mufla (SPlabor SP-1200), à 550 °C, por 2 horas. Após a etapa de calcinação, os cadinhos foram removidos da estufa e transferidos para um dessecador para resfriamento. As massas dos cadinhos foram registradas em uma balança de precisão. O processo de aquecimento a 550 °C foi repetido até que a diferença entre as massas não excedesse 10 %.

O cálculo dos teores de SF e SV foram realizados com base nas diferenças de massas, expressas em porcentagem, e seguiu as Equações 2 e 3 conforme definido por Wilder et al. (1997).

$$SF = \frac{(D-B)}{(A-B)} \times 100 \quad (2)$$

$$SV = \frac{(A-D)}{(A-B)} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

SF = Teor de sólidos fixos em porcentagem (%)

SV = Teor de sólidos voláteis em porcentagem (%)

A = cadinho + amostra seca em gramas (g)

B = massa do cadinho em gramas (g)

D = cadinho + amostra seca em gramas (g) após aquecimento a 550 °C

As principais etapas da análise dos teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) estão ilustradas na Figura 14.

Figura 14 – Principais etapas da análise da série de sólidos



(A) Pré-calção dos cadinhos à 550 °C em mufla; (B) Resfriamento dos cadinhos em dessecador; (C) Pesagem dos cadinhos calcinados em balança; (D) Pesagem cadinhos + amostras dos resíduos; (E) Aquecimento dos cadinhos contendo as amostras, à 104,1 °C em estufa; (F) Resfriamento dos cadinhos + amostras em dessecador; (G) Calção dos cadinhos + amostras à 550 °C em mufla; (H) Resfriamento dos cadinhos + amostras em dessecador; (I) Cadinhos com as amostras calcinadas

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Para a presente investigação, foi considerado o modelo de Biodigestor CSTR. Para que a digestão seja úmida, há a necessidade que se faça a diluição do substrato, de forma que o ele apresente uma concentração de ST adequada, podendo ser realizado a partir da adição de novos líquidos ao sistema.

Para calcular a massa final do substrato com adição de água foi utilizada a Equação 4 (AEPC, 2019).

$$m_{subs,f} = \frac{ST \times QS}{STD} \quad (4)$$

Onde:

$m_{subs,f}$ = Massa final do substrato com adição de água (kg.dia⁻¹)

QS = Quantidade de substrato adicionado no biodigestor (kg.dia⁻¹)

ST = Sólidos totais (%)

STD = Meta de sólidos totais para alimentação do biodigestor (%)

O volume de água necessário para diluição do substrato foi calculado com a Equação 5 (AEPC, 2019).

$$QL = \frac{m_{subs,f} - QS}{\rho_{liq}} \quad (5)$$

Onde:

QL = Quantidade de líquido a ser adicionado para diluição (m³.dia⁻¹)

ρ_{liq} = Densidade do líquido (kg.m⁻³)

$m_{subs,f}$ = Massa final do substrato com adição de água (kg.dia⁻¹)

O volume do biodigestor foi determinado por meio da Equação 6 (AEPC, 2019).

$$V_{CSTR} = \frac{m_{subs,f}}{\rho_{liq}} \times TRH \quad (6)$$

Onde:

ρ_{liq} = Densidade do líquido (kg.m⁻³)

$m_{subs,f}$ = Massa final do substrato com adição de água (kg.dia⁻¹)

TRH = Tempo de Retenção Hidráulica (dias)

O tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias, aliado a uma carga orgânica volumétrica (COV) de 2,25, foi determinado com base em dados da literatura. Esses valores têm sido associados a condições ideais para a produção de biogás e metano, garantindo a eficiência na degradação dos resíduos orgânicos (Liu et al., 2018).

A densidade do metano e do dióxido de carbono foram calculadas utilizando as Equações de estado dos gases ideais 7 e 8 (Petrucci, 2011).

$$\rho_{CH_4} = \frac{P_{amb}}{R_{CH_4} \times T_{amb}} \quad (7)$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{P_{amb}}{R_{CO_2} \times T_{amb}} \quad (8)$$

Onde:

P_{amb} = Pressão atmosférica local (kPa)

T_{amb} = Temperatura ambiente (19,3 °C) (Wrege et al., 2012)

R_{CH_4} = Constante do gás metano (0,5182 kJ CH₄.kg⁻¹.K⁻¹) (Çengel; Boles, 2013)

R_{CO_2} = Constante do gás dióxido de carbono (0,1889 kJ CO₂.kg⁻¹.K⁻¹) (Çengel; Boles, 2013)

A pressão atmosférica local calculada por meio da Equação 9 (Giassi, 2022).

$$P_{amb} = 101,3 \times \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (9)$$

Onde:

z = Altitude do local (13 m) (Wrege et al., 2012)

A densidade do biogás calculado por aproximação, utilizando a Equação 10 (GEF, 2022).

$$\rho_{biogás} = C_{CH_4} \times \rho_{CH_4} + (1 - C_{CH_4}) \times \rho_{CO_2} \quad (10)$$

Onde:

C_{CH_4} = Porcentagem de metano no biogás (60 %) (IEA, 2020)

ρ_{CH_4} = Densidade do metano (kg.m⁻³)

ρ_{CO_2} = Densidade do dióxido de carbono (kg.m⁻³)

A energia consumida pelo sistema de agitação CSTR pode ser calculada com a Equação 11 (Wang; Zhang; Huo, 2016).

$$E_{AG} = e^{(2,67 \times 10^{-5} \times v^2 + 0,02376 \times v - 3,86)} \quad (11)$$

Onde:

E_{AG} = Consumo de energia do sistema de agitação (kWh.d⁻¹)

v = Velocidade da hélice (rpm)

A demanda de calor de entrada incluiu energia térmica para aumentar a

temperatura da biomassa até a temperatura de digestão e as perdas na parede do reator, de acordo com a Equação 12 (Passos; Ferrer, 2014).

$$E_{calor} = \frac{(\bar{C}_{p_{bio}} \times \rho_{bio} \times Q \times (T_{dig} - T_{amb}) + \bar{K} \times A \times (T_{dig} - \bar{T}_{amb}) \times 86.4 - \varepsilon \times Q \times \rho_{bio} (T_{dig} - T_{amb}))}{3600} \quad (12)$$

Onde:

E_{calor} = Calor na entrada do biodigestor (kWh.d⁻¹)

$\bar{C}_{p_{bio}}$ = Calor específico da biomassa (3,1336 kJ.kg⁻¹.°C⁻¹) (Yeh et al., 2020)

ρ_{bio} = Densidade da biomassa (430 kg.m⁻³) (Rocha, 2016)

Q_{bio} = Vazão volumétrica da biomassa (m³.d⁻¹)

T_{dig} = Temperatura de digestão (35 °C) (Drako, 2020)

\bar{T}_{amb} = Temperatura ambiente (19,3 °C) (Wrege et al., 2012)

\bar{K} = Coeficiente de transferência de calor (500 W.m⁻².°C⁻¹) (Carpenter, 2011)

$A_{L,CSTR}$ = Área lateral da parede do biodigestor (m²)

ε = Efetividade do trocador de calor (85 %) (Ferrer; Passos, 2015)

A área superficial da parede do reator ($A_{L,CSTR}$) foi calculada a partir do volume útil do reator, considerando uma relação diâmetro/altura de 2:1, enquanto a parte inferior e superior do reator não foram contabilizadas, conforme a Equação 13 e 14 (Ferrer; Passos, 2015).

$$A_{L,CSTR} = \frac{V_{CSTR}}{H_{CSTR}} \quad (13)$$

$$D_{CSTR} = 2 \times H_{CSTR} \quad (14)$$

Onde:

$A_{L,CSTR}$ = Areal lateral da parede do biodigestor (m²)

D_{CSTR} = Diâmetro do biodigestor (m)

H_{CSTR} = Altura do biodigestor (m)

V_{CSTR} = Volume do biodigestor (m³)

4.6 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A estimativa para produção de biogás foi efetuada por meio de diferentes modelos, para fins comparativos. Cada modelo apresenta suas próprias características e premissas

subjacentes, o que permite explorar diferentes perspectivas e considerar diversos fatores influentes. Para a presente pesquisa, o parâmetro adotado nos cálculos foi o teor de sólidos voláteis do substrato.

A vazão de metano (em $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) foi analisada em função do potencial energético do biogás e da porcentagem de sua concentração na mistura para uma determinada quantidade de substrato. Para os modelos de Chen-Hashimoto (1983) e Deng modificado (2016) foi necessária a conversão da produção de metano estimada para biogás, considerando a proporção de 60 % de metano no biogás.

A taxa máxima teórica de produção de metano foi obtida através da proporção de metano no biogás considerada neste estudo e os valores médios do potencial máximo teórico de produção de metano de carboidratos, proteínas e lipídeos (Tabela 6).

Tabela 6 – Estimativa da máxima produção teórica de metano e percentagem da composição do biogás

Nutriente	Potencial máximo teórico de produção de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{sv}$)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Carboidrato	0,42	50	50
Proteína	0,5	50	50
Lipídeo	1,01	70	30

Fonte: Nwokolo et al. (2020).

A seguir, são descritos os modelos utilizados para os cálculos de estimativa de produção de biogás.

4.6.1 Modelo Chen-Hashimoto (1983)

A metodologia desenvolvida por Chen (1983) aborda parâmetros importantes, como SV e a capacidade máxima de produção de biogás (B_0), os quais são determinados para estimar o potencial teórico de produção de biogás. As Equações 15, 16, 17 e 18 demonstram as variáveis para o cálculo para esse modelo (Chen, 1983).

$$B = B_0 \times \left(1 - \frac{K}{\mu \times TRH - 1 + K}\right) \quad (15)$$

Onde:

B = Produção de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

B_0 = Taxa máxima de produção metano ($0,66 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{sv}$) (Nwokolo et al., 2020)

TRH= Tempo de retenção hidráulica (30 dias) (Liu et al., 2018)

K = Constante cinética

μ = Taxa de crescimento específica de microrganismos

Os valores de COV e TRH foram estabelecidos com base em um sistema de biodigestão de resíduos alimentares utilizando o reator CSTR, descrito por Liu e colaboradores (2018).

Um modelo de regressão linear obtido a partir de resíduos alimentares foi utilizado para estimar a constante cinética (Equação 16), conforme Morken e colaboradores (2018).

$$K = 0.0255 \times COV - 0.0221 \quad (16)$$

Onde:

COV = Carga Orgânica Volumétrica ($2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{sv}$) (Liu et al., 2018)

A taxa máxima de crescimento específica de microrganismos (μ) foi obtida a partir de culturas anaeróbias combinadas de resíduos alimentares utilizando a média dos três valores do modelo *Three Reaction* (3R) a uma temperatura de $37 \text{ }^\circ\text{C}$ (Owhondah et al., 2016).

A produção diária de metano foi estimada utilizando a Equação 17.

$$Q_{CH_4} = B \times Q_{dig} \times SV \quad (17)$$

Onde:

Q_{CH_4} = Produção diária de metano ($\text{m}^3_{CH_4} \cdot \text{d}^{-1}$)

Q_{dig} = Quantidade de digestato produzida por dia ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

A quantidade de digestato pode ser calculada com a equação (18), através de um balanço de massa (Talia, 2018).

$$Q_{dig} = \sum Q_{sub} - Q_{subi} \times ST_i \times SV_i \times PGY_i \times \rho_{biogás} \quad (18)$$

Onde:

Q_{dig} = Quantidade de digestato produzida por dia ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

Q_{sub} = Vazão de alimentação do substrato ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

ST = Concentração de sólidos totais (%)

VS = Concentração de sólidos voláteis (%ST)

PGYI_i = Potencial máximo teórico de produção de biogás (m³.kg⁻¹vs)

ρ_{biogás} = Densidade do biogás (kg.m⁻³)

4.6.2 Modelo Deng modificado (Yang et al., 2016)

O modelo Deng modificado (2016) apresenta a Equação 19 para prever a influência da temperatura e da taxa de carga orgânica no rendimento de produção de metano. Um parâmetro cinético (K_D) foi introduzido no modelo de Deng como um coeficiente da constante de meia saturação e da carga orgânica volumétrica.

$$R_p = \frac{R_m}{1 + e^{K_d(K_s - COV)}} \quad (19)$$

Onde:

R_p = Taxa de produção de metano (m³_{CH4}.m⁻³.d⁻¹)

R_m = Potencial máximo teórico de produção metano (m³_{CH4}.d⁻¹)

K_D = Parâmetro cinético

K_s = Constante de meia saturação (kg_{sv}.m⁻³.d⁻¹)

COV = Carga orgânica volumétrica (kg_{sv}.m⁻³.d⁻¹)

A Constante de meia saturação (K_s) foi obtida a partir do modelo *Three Reaction* (3R) a uma temperatura de 37 °C (Owhondah et al., 2016).

O parâmetro cinético foi calculado a partir da equação 20.

$$K_d = 0.750 + 2542 \times e^{-0,426 \times T_{amb}} \quad (20)$$

Onde:

K_D = Parâmetro cinético

T_{amb} = Temperatura ambiente (19,3 °C) (Wrege et al., 2012)

Com isso, foi possível calcular a produção diária de biogás com a Equação 21.

$$Q_{CH4} = R_p \times V_{CSTR} \quad (21)$$

Onde:

Q_{CH_4} = Produção de biogás ($m^3 \cdot d^{-1}$)

R_p = Taxa de produção de metano ($m^3_{CH_4} \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$)

V_{CSTR} = Volume do CSTR (m^3)

4.6.3 Modelo Mashad e Zhang (2020)

Na metodologia de Mashad e Zhang (2020) é utilizado um modelo cinético simples de primeira ordem para calcular o rendimento de metano de diferentes tipos de substratos a partir das Equações 22, 23 e 24.

$$\Phi_{om} = m_{sub} \times T_{sc} \times V_{sc} \quad (22)$$

Onde:

Φ_{om} = Quantidade de matéria orgânica a ser tratada por dia ($kg_{sv} \cdot d^{-1}$)

m_{sub} = Vazão de alimentação do substrato ($kg \cdot d^{-1}$)

T_{sc} = Total de sólidos (%)

V_{sc} = Sólidos voláteis (% T_{sc})

$$B_{dp} = \Phi_{om} \times B_y \quad (23)$$

$$M_{dp} = B_{dp} \times M_c \quad (24)$$

Onde:

B_{dp} = Produção diária de biogás ($m^3 \cdot d^{-1}$)

B_y = Produção de biogás ($m^3_{BIOGÁS} \cdot kg^{-1}_{VS}$)

M_{dp} = Produção diária de metano ($m^3_{CH_4} \cdot d^{-1}$)

M_c = Quantidade de metano no biogás (60 %) (IEA, 2020)

4.7 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

A metodologia utilizada neste estudo para calcular o potencial elétrico envolveu

a aplicação de um índice de eficiência na coleta de gás. Esse índice foi determinado pela média de três modelos adotados para prever a produção de biogás no sistema de biodigestão. Além disso, a avaliação do potencial energético está vinculada ao Poder Calorífico Inferior (PCI) médio do biogás. Especificamente, a condição adotada de 60 % de metano no biogás foi considerada para a obtenção do PCI médio, que se aproximou de a 6,3 kWh.m⁻³, utilizando a Tabela 7 (Siahaan, 2023).

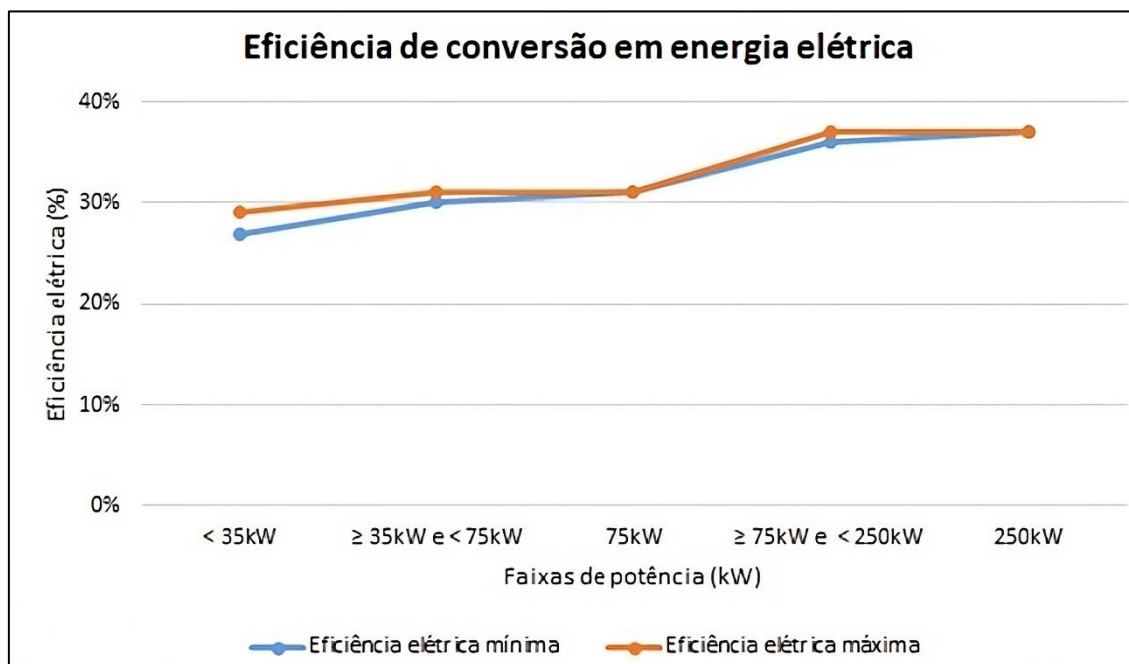
Tabela 7 – PCI e PCS do biogás baseado no conteúdo de metano

Conteúdo de CH₄ no biogás (%)	Poder Calorífico Inferior		Poder Calorífico Superior	
	MJ.m⁻³	kWh.m⁻³	MJ.m⁻³	kWh.m⁻³
45	16,1	4,47	17,9	4,97
50	17,9	4,97	19,9	5,53
55	19,7	5,47	19,9	6,08
60	21,5	5,96	23,9	6,63
65	23,3	6,46	25,9	7,18
70	25,5	6,96	27,9	7,74
Biogás purificado				
95	34,0	9,44	37,8	10,50
96	34,4	9,54	38,2	10,61
97	34,7	9,64	38,6	10,72
98	35,1	9,74	39,0	10,83
99	35,4	9,84	39,4	10,94

Fonte: Argalis; Veçere (2021).

A estimativa da geração de energia elétrica foi realizada com base nos parâmetros de eficiência energética usualmente observados em cogeneradores disponíveis no mercado, dotados do motor de combustão interna, gerador ou Stirling. Para a faixa de geração elétrica estimada <35 kW de potência instalada, esses cogeneradores apresentam eficiências de conversão em eletricidade próximas a 28 % (Figura 15).

Figura 15 – Eficiência de conversão em energia elétrica (rendimento), para faixas de potência diferentes (modo contínuo)



Obs.: Dados obtidos a partir de pesquisa realizada com fornecedores nacionais no ano de 2020.

Fonte: GEF (2020).

Para o cálculo de estimativa de geração de energia elétrica utilizando valores conhecidos de Poder Calorífico Inferior (PCI) e rendimento (η) foi utilizada a equação 25.

$$E_d = \frac{V_d \times PCI_{kWh} \times \eta}{100} \quad (25)$$

Onde

E_d = Energia produzida por dia de operação (kWh.d⁻¹)

V_d = Volume diário de biogás (m³.d⁻¹)

PCI_{kWh} = Poder Calorífico Inferior (6,3 kWh.m⁻³) (Tabela 7)

η = Rendimento da máquina (28 %) (Figura 15)

4.8 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA

Nesta etapa foram avaliados indicadores de sustentabilidade energética do Restaurante Universitário, tendo como base o seu consumo de energia elétrica e térmica (GLP) e o aproveitamento energético do biogás produzido a partir dos resíduos

alimentícios. Calculou-se os indicadores para cada modelo empregado para fins comparativos. Esses indicadores estão descritos nas seções que se seguem.

4.8.1 Independência Energética Térmica (IET)

Este indicador está relacionado com a proporção da demanda total de energia usada nos restaurantes para cozinhar que não é suprida por fontes externas de energia. O GLP utilizado no restaurante é considerado um fluxo de energia externa, pois o combustível é adquirido de um fornecedor comercial. Em contraste, o biogás seria produzido no próprio restaurante, utilizando seus resíduos orgânicos como matéria-prima. A Equação 26 foi utilizada para calcular esse indicador (Juárez-Hernández; Castro-González, 2016).

$$IET = \frac{E_{biogás}}{D_{men}} \times 100 \quad (26)$$

Onde:

IET: Independência Energética Térmica (%)

$E_{biogás}$ = Contribuição energética mensal do biogás (kJ.mês^{-1})

$D_{mês}$ = Demanda mensal de energia do restaurante para cozinhar (kJ.mês^{-1})

4.8.2 Independência Energética Elétrica (IEE)

A IEE está relacionada com a proporção da demanda total de energia elétrica destinada ao funcionamento do Restaurante Universitário que não é atendida por fontes externas de energia elétrica (fornecida pela Celesc, por exemplo). A equação 27 foi empregada para calcular esse indicador e é formulada de maneira similar à equação para a independência energética térmica, mas adaptada para a eletricidade (Juárez-Hernández; Castro-González, 2016).

$$IEE = \frac{E_{elet_biogás}}{D_{men_elet}} \times 100 \quad (27)$$

Onde:

IEE: Independência Energética Elétrica (%)

$E_{\text{elet_biogás}}$ = Contribuição mensal de energia elétrica gerada a partir do biogás
(kJ.mês⁻¹)

$D_{\text{mês_elet}}$ = Demanda mensal de energia elétrica do restaurante (kJ.mês⁻¹)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E DE GÁS NO RU

Conforme informações obtidas da empresa prestadora dos serviços do restaurante universitário, o consumo de energia elétrica do restaurante se dá pelo uso de equipamentos e da iluminação e o consumo de GLP é decorrente do uso fogões, fornos e outros equipamentos de cozinha. A eletricidade do Restaurante é fornecida pela Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC).

A Tabela 8 apresenta os resultados do consumo mensal de energia elétrica do RU em 2022. Pode-se constatar que o consumo médio mensal em 2022 foi, aproximadamente, 4620 kWh.mês⁻¹ (equivalente a cerca de 154 kWh.d⁻¹).

Tabela 8 – Consumo mensal de energia elétrica no RU em 2022

Mês	Consumo eletricidade (kWh.mês ⁻¹)
Janeiro	2073
Fevereiro	6019
março	6687
Abril	6407
Maiο	4928
Junho	4846
Julho	3230
Agosto	3963
Setembro	3876
Outubro	4474
Novembro	4675
Dezembro	4261
Média mensal	4620

Fonte: Elaborado pelo autor.

O abastecimento de GLP no Restaurante é realizado pela empresa Supergasbras Energia Ltda. A Tabela 9 mostra o consumo mensal de GLP no período de janeiro a outubro de 2023, tendo-se um consumo médio de 4,49 m³.mês⁻¹.

Tabela 9 – Consumo mensal de GLP no RU em 2023

Mês	Consumo de GLP (m³)
Janeiro	4,00
Fevereiro	2,67
março	2,41
Abril	3,20
Maio	6,67
Junho	6,00
Julho	4,67
Agosto	3,60
Setembro	6,13
Outubro	5,60
Média mensal	4,49

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS DO RU

Os resultados obtidos em termos de quantidade de resíduos gerados no Restaurante estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12, referentes aos meses de abril, junho e agosto de 2023, respectivamente. Conforme já informado, os resíduos compreendem os resíduos descartados do restante do *buffet*, os resíduos descartados pelos usuários e os descartados na preparação dos alimentos.

Tabela 10 – Quantidade de resíduos gerados no RU no período de 24/04 a 30/04/2023

Refeição	Resíduos (kg)	24/04	25/04	26/04	27/04/	28/04	29/04	30/04
	Buffet	9,50	7,34	19,00	1,60	3,60	3,10	4,00
Almoço	Usuários	26,4	17,35	8,10	19,00	21,80	5,60	4,90
	Preparo	6,00	6,00	20,61	20,77	19,66	7,50	6,00
	Buffet	11,90	11,10	8,40	14,90	11,7	6,10	2,10
Janta	Usuários	10,00	8,70	8,00	4,51	7,59	4,00	2,60
	Preparo	6,00	6,00	20,61	20,77	19,66	7,50	6,00
Subtotal (kg)		69,8	56,49	84,71	81,55	103,66	33,80	25,60
Total (kg)		435,97						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Quantidade de resíduos gerados no RU no período de 19/06 a 25/06/2023

Refeição	Resíduos (kg)							
		19/06	20/06	21/06	22/06	23/06	24/06	25/06
	Buffet	8,84	14,05	10,34	2,20	2,40	5,30	6,60
Almoço	Usuários	69,30	14,94	8,56	9,29	21,80	2,40	2,70
	Preparo	66,75	25,92	29,21	23,80	19,66	7,10	5,10
	Buffet	4,10	0,00	16,54	12,67	6,65	8,00	4,30
Janta	Usuários	24,42	2,20	3,50	3,05	5,60	2,10	1,30
	Preparo	7,30	4,00	8,40	2,30	8,87	5,40	1,06
Subtotal (kg)		180,7	61,11	76,55	53,31	64,98	30,30	21,06
Total (kg)		488,02						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Quantidade de resíduos gerados no RU no período de 22/08 a 28/08/2023

Refeição	Resíduos (kg)	22/08	23/08	24/08	25/08	26/08	27/08	28/08
		Buffet	8,84	2,38	1,75	2,96	11,19	12,23
Almoço	Usuários	26,54	14,03	16,88	14,06	7,40	3,90	19,00
	Preparo	26,93	63,80	38,63	16,81	9,60	7,20	36,15
Janta	Buffet	4,30	1,70	16,97	20,44	12,51	22,85	18,31
	Usuários	5,70	3,10	8,73	6,16	2,20	1,82	12,5
	Preparo	2,10	4,80	3,25	1,30	0,00	2,60	6,80
Subtotal (kg)		74,41	89,81	86,21	61,73	42,90	50,70	98,13
Total (kg)		503,77						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a análise dos dados coletados nos meses de abril, junho e agosto de 2023, apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12, foi possível calcular a média mensal e anual da quantidade de resíduos gerados. Esses cálculos foram baseados na média aritmética dos resíduos coletados em cada um dos meses. Os resultados dessas médias estão sumarizados na Tabela 13.

Tabela 13 – Média mensal e anual diária de resíduos gerados no RU

Média (kg.d⁻¹)		Abril	Junho	Agosto
		Mensal	Almoço	11,33
	Jantar	9,44	6,27	7,53
Subtotal		20,76	23,24	23,99
Anual		22,66		

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 ANÁLISE DOS SÓLIDOS NOS RESÍDUOS

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos de ST, SF e SV dos resíduos alimentícios coletados no Restaurante, além dos valores em relação a quantidade média de resíduos gerados por dia.

Tabela 14 – Valores dos sólidos nos resíduos alimentícios coletados no RU

Parâmetros	Valores	
	(%)	(kg.d⁻¹)
Sólidos Totais (ST)	24,15	5,47
Sólidos Fixos (SF)	7,83	0,43
Sólidos Voláteis (SV)	92,17	5,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Determinar os SV em resíduos alimentícios é de grande importância, pois representam a fração orgânica que pode ser decomposta biologicamente, indicando a quantidade de material suscetível a processos de decomposição anaeróbica. Esse dado é relevante para avaliar o potencial de geração de biogás, impactos ambientais e estratégias de gerenciamento de resíduos.

Os valores obtidos na análise estão em concordância com os descritos pela

literatura (GU et al., 2020; Zhao et al., 2021; Rodrigues, 2018). Proença (2022), em seu estudo realizado no restaurante universitário no campus central da UFSC, encontrou um teor de 79.8 % de SV. Teores mais baixos de SV indicam uma menor quantidade de material orgânico disponível para a produção de biogás.

Esses valores podem variar devido a diferentes definições de frações orgânicas, que podem variar regional e nacionalmente, bem como devido ao período de amostragem.

5.4 DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO

Conforme descrito na seção 4.5 da metodologia, a escolha da tecnologia de Biodigestor CSTR para o aproveitamento energético dos resíduos alimentícios foi, inicialmente, considerada, devido a melhor adequação aos parâmetros utilizados neste estudo. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos de estimativa dos parâmetros de dimensionamento de biodigestor modelo CSTR.

Tabela 15 – Parâmetros de dimensionamento do biodigestor modelo CSTR

Vazão de Entrada		Volume de água (m ³)	Volume do CSTR (m ³)	COV (m ³ sv.d ⁻¹)	TRH (d ⁻¹)	Vazão de saída (m ³ .d ⁻¹)	Temperatura de operação (°C)	Consumo total do CSTR (kWh.d ⁻¹)
Vazão mássica (kg.d ⁻¹)	Vazão volumétrica (m ³ .d ⁻¹)							
22,66	0,065	0,014	1.10	2,5 ^a	20 ^b	0,028	35 ^c	4,09

^{a,b} Liu et al., (2018), ^c Drako (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diluição do substrato é essencial para alcançar a concentração de ST necessária para os biodigestores CSTR, geralmente até 15 % de TS, conforme demonstrado por Sawale et al. (2022), Persson (2019) e Murphy et al. (2013). Neste estudo, optou-se por adotar o mesmo valor de diluição, alinhando-se com as práticas recomendadas pela literatura.

O valor de TRH escolhido nesta pesquisa está em consonância com vários estudos, incluindo o de Uma, Thalla e Devatha (2020), Van et al. (2019); Wu et al. (2015); Nagao et al. (2012), que afirmam que sistemas de um estágio para degradação de resíduos alimentares geralmente operam com TRH de até 30 dias em condições mesofílicas. Além disso, conforme observado por Uddin e Wright (2022), é crucial que os substratos

permaneçam no digestor por tempo suficiente para garantir a conversão máxima de materiais orgânicos em biogás.

Conforme indicado por Kunz et al. (2019), biodigestores CSTR variam na faixa de 1 a 4 $\text{kg}_{\text{SVadc}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, sendo que neste estudo adotou-se o valor de COV para as condições ideais, conforme proposto por Liu et al. (2018). De acordo com Tessakka et al. (2019), um excesso de COV pode resultar no acúmulo de AGVs, carga de choque no reator e pH baixos. Por outro lado, uma COV baixa pode levar à escassez de nutrientes necessários para os microrganismos, resultando em crescimento instável, morte e produção de inibidores de geração, como a amônia.

Megido et al. (2021) destacam a importância da temperatura como um parâmetro chave, influenciando a taxa de reação, a estabilidade e a atividade microbiana em processos de digestão anaeróbica. É ressaltado que variações graduais ou abruptas na temperatura podem impactar negativamente a produção de biogás. No presente estudo, a escolha da faixa de temperatura se alinha com as condições mesofílicas comumente adotadas em reatores anaeróbicos (25-45 °C), conforme observado por Deago et al. (2023) e Hamzah et al., (2020). Conforme apontado por Khalid et al. (2011), a faixa de temperatura entre 35-37 °C é considerada apropriada para otimizar a produção de metano.

O consumo direcionado para manter a temperatura mesofílica de 35°C e o sistema de agitação a 120 rpm tem impacto na eficiência do biodigestor CSTR. Esses valores serão descontados na quantidade de energia gerada nos indicadores de sustentabilidade energética.

5.5 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os parâmetros considerados para os cálculos de estimativa de produção de biogás obtidos a partir da quantidade de resíduos e seu teor de sólidos, bem como, valores preconizados pela literatura estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros considerados nos cálculos da produção de biogás

Parâmetros	Valores
Quantidade de resíduo gerados no RU (kg.d ⁻¹)	22,66
Sólidos voláteis (kg _{sv} .d ⁻¹)	5,04
Vazão máxima teórica de metano (m ³ _{sv} .d ⁻¹)	0,66 ^a
Porcentagem de metano no biogás (%)	60
Vazão máxima teórica de biogás (m ³ _{sv} .d ⁻¹)	1,10
Peso específico do biogás (kg.m ⁻³)	1,13

^a Nwokolo et al., (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desses parâmetros, foi possível realizar os cálculos do potencial de produção de biogás pelos três modelos adotadas neste trabalho (Chen-Hashimoto (1985); Deng modificado (2016) e Mashad e Zhang (2020)), cujos resultados estão expressos na Tabela 17.

Tabela 17 – Estimativa de produção de biogás pelos 3 modelos avaliados

Modelos	Volume de biogás (m³)		
	Diário	Mensal	Anual
Chen-Hashimoto (1985)	3,93	118,02	1435,94
Deng modificado (2016)	4,65	139,58	1698,17
Mashad e Zhang (2020)	5,38	161,40	1963,73
Volume médio (m ³)	4,66	139,67	1699,28
Volume específico médio (m ³ .kg ⁻¹ _{sv})	0,92	27,6	331,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na presente investigação, foi observado que os potenciais teóricos de produção de biogás pelos 3 modelos se mostraram divergentes. Constata-se que os resultados obtidos pelo modelo Mashad e Zhang se mostraram cerca de 1,16 vezes superior ao do modelo Deng modificado e 1,37 vezes ao modelo Chen-Hashimoto. Essas diferenças na produção de biogás podem ser atribuídas às peculiaridades de cada modelo, à natureza dos resíduos utilizados e à falta de estudos sistemáticos que avaliem a aplicabilidade desses modelos a amostras de biomassa de diferentes fontes.

No modelo Chen-Hashimoto (1983), a ênfase na capacidade máxima de produção de biogás (B_0) e a consideração dos parâmetros SV e TRH são fatores cruciais. O emprego de uma metodologia baseada em um sistema de biodigestão de resíduos alimentares, aliada a um modelo de regressão linear, destaca a influência significativa dos parâmetros cinéticos na estimativa da produção de metano. A obtenção da taxa máxima de crescimento específico de microrganismos (μ) a partir de culturas anaeróbias também acrescenta complexidade aos cálculos.

O modelo Deng modificado (2016) destaca a influência da temperatura e da taxa de carga orgânica na produção de metano. A consideração da constante de meia saturação (K_s) evidencia a sensibilidade do sistema às condições operacionais. A complexidade do modelo Deng pode levar a variações nos resultados, especialmente quando comparado a outros modelos mais simplificados.

A metodologia de Mashad e Zhang (2020), baseada em um modelo cinético simples de primeira ordem, oferece uma abordagem mais direta, mas potencialmente menos precisa. A simplicidade do modelo pode não capturar totalmente a complexidade das interações no biodigestor CSTR, resultando em uma estimativa mais conservadora da produção de biogás.

A Tabela 18 apresenta dados detalhados de estudos que investigaram a biodigestão anaeróbia de resíduos alimentares em biodigestores do tipo CSTR. Esses resultados são essenciais para compreender as variabilidades nos parâmetros de operação, composição do substrato e produção de biogás, contribuindo para a análise abrangente da eficiência desses sistemas em diferentes condições experimentais.

Tabela 18 – Valores operacionais relatados na literatura para condições semelhantes a este estudo

Tipo de substrato	Tipo de DA*	ST (%)	SV (%)	COV (kg _{VS} .m ⁻³ .d ⁻¹)	TRH (dias)	T (°C)	%CH ₄	Prod. esp. de biogás (m ³ .kg ⁻¹ _{SV})	Referência
Resíduo alimentar de supermercado	CSTR	7,62	95,01	2,4	30	35	60	0,740	Wu et al., (2015)
Resíduo alimentar da cantina	CSTR	19,90	80,6	2,5	17	37	65,20	0,694	Baldi et al., (2019)
Resíduo alimentar de restaurante	CSTR	19,62	95,26	3,79	-	37	58,60	0,648	Grimberg et al., (2015)
Resíduo alimentar de reciclado	CSTR	4,50	70,7	4,5	15	35	61,10	0,622	Ventura et al., (2014)
Resíduo alimentar da cantina	CSTR	19,70	91,87	6	-	35	65,2	0,729	Wang et al., (2016)

*DA = Digestor Anaeróbio. Para biodigestores de 2 estágios, foi considerado somente o 1º estágio. Foi considerado o maior valor de produção de metano disponível.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os resultados de biodigestores CSTR utilizando resíduos alimentares de diferentes fontes, percebeu-se nuances que contribuem para a variabilidade nos dados, quando comparados aos resultados obtidos neste estudo, das quais se destacam:

- i.) Teor de sólidos voláteis (ST) e substrato: A diversidade nos teores de ST nos substratos de diferentes estudos pode influenciar significativamente a produção de biogás. Wu et al. (2015) apresentou um teor de sólidos voláteis de 7,62 %, enquanto Baldi et al. (2019) e Grimberg et al. (2015) registraram valores mais elevados de 19,90 % e 19,62 %, respectivamente. A variação nos teores de ST pode impactar diretamente a atividade microbiana e, conseqüentemente, a produção de biogás.
- ii.) Temperatura de Operação (T): As diferenças nas temperaturas de operação

entre os estudos, como observado nas condições de Baldi et al. (2019) a 37 °C e Ventura et al. (2014) a 35 °C, podem influenciar as taxas de degradação anaeróbia. A temperatura é um fator crítico para a atividade microbiana e, portanto, afeta diretamente a produção de biogás.

- iii.) Tempo de Retenção Hidráulica (TRH): A variação no TRH entre os estudos, como evidenciado por Wu et al. (2015) com 30 dias e Ventura et al. (2014) com 15 dias, sugere diferentes estratégias de operação. O TRH é um parâmetro essencial na biodigestão anaeróbia, afetando o tempo que os substratos permanecem no reator e influenciando diretamente a eficiência do processo. Diferenças significativas no TRH podem resultar em diferentes níveis de degradação do substrato e, conseqüentemente, em variações na produção de biogás.
- iv.) Produção Específica de Biogás: A produção específica de biogás varia consideravelmente entre os estudos, destacando a sensibilidade do processo às características específicas de cada substrato e às condições operacionais. Por exemplo, Grimberg et al. (2015) obteve $0,648 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{sv}$, enquanto Ventura et al. (2014) registrou $0,622 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{sv}$.

Essas nuances refletem a complexidade dos sistemas de biodigestão anaeróbia e ressaltam a importância de considerar as particularidades de cada estudo ao interpretar e comparar os resultados. Fatores como composição do substrato, condições operacionais e parâmetros cinéticos utilizados nos modelos podem contribuir para as divergências observadas nos dados da literatura em relação aos resultados obtidos neste estudo.

5.6 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA

A Tabela 19 exibe a estimativa de equivalência energética do biogás em relação ao consumo médio do restaurante. De acordo com Lima e Passamani (2012), 1 m³ de biogás equivale a 0,45 m³ de GLP. Portanto, ao multiplicar a produção média de biogás obtida neste estudo pela equivalência energética do GLP, obtém-se a produção equivalente de biogás.

Tabela 19 – Estimativa de equivalência energética do biogás e consumo médio do restaurante

Produção média de biogás (m³.d⁻¹)	Equivalência energética GLP	Produção equivalente de biogás (m³.d⁻¹)	Consumo médio de GLP (m³.d⁻¹)	Consumo do CSTR (m³.d⁻¹)
4,66	0,45	1,23	4,49	1,93

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os valores de produção equivalente de biogás foram descontados o consumo de energia do sistema de biodigestão. Comparando a produção equivalente de biogás com o consumo médio diário do restaurante, o Indicador de Independência Energética Térmica (IET) revela que, aproximadamente, 27,4 % da demanda por energia térmica no Restaurante poderia ser suprida pelo sistema de biodigestão. Essa proporção pode ser relevante, especialmente considerando os custos mensais associados à aquisição de GLP. Contudo, é relevante notar que os valores analisados neste estudo se referem ao biogás bruto, contendo cerca de 60 % de metano. Nesse sentido, a purificação do biogás é recomendada para elevar o PCI, tornando-o mais equiparável ao GLP em termos de eficiência energética. Esse processo possibilitaria uma utilização mais eficaz e direta do biogás como substituto viável do GLP.

Além disso, em geral, utilizar o biogás bruto diretamente não é viável, uma vez que alguns de seus elementos podem ser prejudiciais ao processo de combustão em concentrações específicas, podendo impactar a eficácia ou resultar em corrosão de componentes no sistema de conversão (Paim, 2017).

A Tabela 20 apresenta a estimativa da produção de energia elétrica em função do uso do biogás gerado a partir dos resíduos do RU. Para tanto, foram considerados a geração de energia a partir de um motogerador, utilizando a média de biogás resultante dos modelos matemáticos adotados. Também foram considerados parâmetros como eficiência do sistema motogerador e o PCI.

Tabela 20 – Estimativa da produção de energia elétrica a partir do biogás

Parâmetros	Valores
Produção média diária de biogás (m^3d^{-1})	4,66
Eficiência global (%)	0,30
PCI (kWh/m^3)	6,3
Produção média mensal de energia elétrica (kWh)	263,97
Produção média anual de energia elétrica (kWh)	3211,64
Uso de energia elétrica mensal pelo CSTR (kWh)	109.48

Fonte: Elaborado pelo autor.

A demanda elétrica mensal do Restaurante está avaliada em 1420 kWh, revelando que a produção de biogás não seria suficiente para atendê-la. Com base nos dados de Independência Energética Elétrica (IEE), apenas 11 % da demanda seria coberta. Para alcançar um equilíbrio ideal entre produção e consumo, foi calculado o ponto ótimo, no qual a produção mensal de biogás seria igual à demanda. Sob essas condições, seriam necessários $205,45 \text{ kg.d}^{-1}$ de resíduos para suprir essa demanda elétrica.

Portanto, os resultados obtidos permitem sugerir que os resíduos alimentícios gerados no Restaurante Universitário apresentam potencial para fins de aproveitamento energético a partir de fonte renovável de energia.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs estimar o potencial de geração de biogás e energia elétrica a partir dos resíduos de alimentos do Restaurante Universitário da UFSC, campus Araranguá. Estes estudos visaram propor uma estratégia de valoração dos resíduos e o fomento do uso de fontes renováveis de energia.

A partir dos resultados obtidos nas diferentes etapas, se pode constatar uma produção média diária de resíduos alimentícios estimada de, aproximadamente 22,66 kg, apresentando um teor elevado de sólidos voláteis, o que indica um promissor potencial para a produção de biogás. O biodigestor CSTR foi selecionado como potencialmente adequado, embora seja necessária uma análise mais aprofundada. Ao empregar três modelos matemáticos distintos, a produção estimada de biogás variou entre 3,93 e 5,38 m³ por dia, o que poderia suprir cerca de 27,4 % da demanda de combustível para cozimento no restaurante e, aproximadamente, 11 % da demanda por energia elétrica.

Sugere-se que estudos futuros abordem a co-digestão, explorem técnicas de pré e pós-tratamento, conduzam ensaios e experimentos para desenvolver um modelo de biodigestor adequado para alimentos, e desenvolvam modelos matemáticos específicos para os diferentes tipos de resíduos alimentares. Além disso, a inclusão de outros períodos temporais em análises subsequentes pode contribuir para uma compreensão mais abrangente do desperdício em Unidades de Alimentação, auxiliando na determinação de padrões relacionados a sobras, restos e desperdícios. Igualmente, seria interessante considerar o crescente interesse na utilização de digestão anaeróbia seca para o tratamento de resíduos alimentares. Nesse sentido, seria relevante realizar estudos integrativos similares nesses sistemas no futuro.

De maneira geral, este estudo representa um passo inicial na realização de análises mais integrativas da produção de biogás a partir de resíduos alimentares no campus. Os resultados indicam que a digestão anaeróbica localizada pode contribuir para a sustentabilidade energética e a gestão de resíduos na UFSC-Araranguá, alinhando-se aos objetivos da instituição. A implementação desse processo pode oferecer oportunidades valiosas para aprendizado prático e servir como modelo para outros campi e organizações.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFY, H. I. et al. Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, n. 1, p. 102293, 2024.

ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. Microbiology and biochemistry of anaerobic digesters: an overview. Em: SINGH, L.; YOUSUF, A.; MAHAPATRA, D. M. (Eds.). **Bioreactors**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 17–26.

AEPC, 2019. Design and Construction Manual of Double Membrane Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) based Large Sized Biogas Plant. **Alternative Energy Promotion Centre**.

AJAY, C. M.; MOHAN, S.; DINESHA, P. Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: A review. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 125, p. 10–26, 2021.

ALAM, M. et al. Production of biogas from food waste in laboratory scale dry anaerobic digester under mesophilic condition. **Energy nexus**, v. 7, n. 100126, p. 100126, 2022.

ALMEIDA, L. et al. Insights to improve covered lagoon biodigesters through by-products recovery in pig farms. **Environmental Research and Technology**, v. 4, n. 3, p. 284–292, 2021.

ALMEIDA, R. M. B. **Novas oportunidades de aproveitamento do biogás no Brasil**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

ARELLI, V. et al. Solid state anaerobic digestion of organic waste for the generation of biogas and bio manure. Em: HUSSAIN, C.; HAIT, S. (Eds.). **Advanced Organic Waste Management**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 247–277.

ARGALIS, P. P.; VEGERE, K. Perspective biomethane potential and its utilization in the transport sector in the current situation of Latvia. **Sustainability**, v. 13, n. 14, p. 7827, 2021.

AYILARA, M. S. et al. Waste Management through Composting: Challenges and Potentials. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4456, 2020.

AWE, O. W. et al. Effect of oil content on biogas production, process performance and stability of food waste anaerobic digestion. **Waste and biomass valorization**, v. 9, n. 12, p. 2295–2306, 2018.

BALDI, F.; PECORINI, I.; IANNELLI, R. Comparison of single-stage and two-stage anaerobic co-digestion of food waste and activated sludge for hydrogen and methane production. **Renewable energy**, v. 143, p. 1755–1765, 2019.

BENTI, N. E. et al. The current status, challenges and prospects of using biomass energy in Ethiopia. **Biotechnology for biofuels**, v. 14, n. 1, 2021.

BIZERRA, A. M. C.; QUEIROZ, J. L. A. DE; COUTINHO, D. A. M. O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 13, n. 3, p. 299–315, 2018.

BOSU, R.; TALUKDAR, S. K.; ZAHED, M. A. **Biogas Utilization from Biomass and Kitchen Waste and its**. Disponível em: <[https://www.ajer.org/papers/v5\(11\)/U051101150157.pdf](https://www.ajer.org/papers/v5(11)/U051101150157.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2023.

Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos** – 2021. Brasília: SNS/MDR, 2022. 244 p.

Brasil. Ministério da ciência, tecnologia e inovações; Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento industrial; Cibiogás, Centro Internacional de Energias Renováveis. Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano.

CARPENTER, K. J. Agitated vessel heat transfer. Em: **A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering**. [s.l.] Begellhouse, 2008.

CASTILLO-HERNÁNDEZ, A.; MAR-ALVAREZ, I.; MORENO-ANDRADE, I. Start-up and operation of continuous stirred-tank reactor for biohydrogen production from restaurant organic solid waste. **International journal of hydrogen energy**, v. 40, n. 48, p. 17239–17245, 2015.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. 1048p. 2013.

CESTONARO DO AMARAL, A. et al. Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of environmental management**, v. 168, p. 229–235, 2016.

COELHO, S.T. (Coord.), GARCILASSO, V.P., JUNIOR, A.D.F., SANTOS, M.M., JOPERT, C.L. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. 1ª edição. Synergia, São Paulo, 2018.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural wastes**, v. 8, n. 2, p. 65–81, 1983.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. Applications of Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) and Characteristics of Its Microbial Community: A Review of Bibliometric Trend and Recent Findings. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 19, 2021.

COSTA, I. M.; FERREIRA DIAS, M. Evolution on the solid urban waste management in Brazil: A portrait of the Northeast Region. **Energy reports**, v. 6, p. 878–884, 2020.

DA ROCHA, C. M. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares**. 2016. Monografia (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

DE ESPECI, M. **Estudo de Viabilidade Econômica para atender As Necessidades De Energia Uma Unidade de Suino**. 2019. Monografia (Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

DE OLIVEIRA, L. R. G. et al. Kinetics assessment and modeling of biogas production by anaerobic digestion of food wastes and acclimated sewage sludge. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 4, p. 1–11, 2021.

DE VRIEZE, J. et al. Co-digestion of molasses or kitchen waste with high-rate activated sludge results in a diverse microbial community with stable methane production. **Journal of environmental management**, v. 152, p. 75–82, 2015.

DEAGO, E. et al. Optimizing anaerobic digestion at ambient temperatures: Energy efficiency and cost reduction potential in Panama. **Water**, v. 15, n. 14, p. 2653, 2023.

DEENA, S. R. et al. Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques - A review. **Bioresource technology**, v. 355, n. 127234, p. 127234, 2022.

DOS SANTOS REIS, A.; GAVAZZA, S.; SANTOS, S. M. Anaerobic treatment of food waste in pilot scale. **Water Practice & Technology**, v. 11, n. 4, p. 774–783, 2016.

Drako, 2020 I. Drako Analyzing heating requirements for mesophilic and thermophilic biosolids digestion Environ. **Sci. Eng. Magazine**, 33, pp. 60-64 2020,

EBNER, J. et al. **Estimating the biogas potential from colleges and universities**. Volume 2: Economic, Environmental, and Policy Aspects of Alternate Energy; Fuels and Infrastructure, Biofuels and Energy Storage; High Performance Buildings; Solar Buildings, Including Solar Climate Control/Heating/Cooling; Sustainable Cities and Communities, Including Transportation; Thermofluid Analysis of Energy Systems, Including Exergy and Thermoconomics. Anais American Society of Mechanical Engineers, 2014.

EL-MASHAD, H.; ZHANG, R. Biogas Energy from Organic Wastes. Em: **Introduction to Biosystems Engineering**. [s.l.], 2020.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanco Energético Nacional – BEN**. 2022. 2022a.

FARGHALI, M. et al. Prospects for biogas production and H₂S control from the anaerobic digestion of cattle manure: The influence of microscale waste iron powder and iron oxide nanoparticles. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 101, p. 141–149, 2020.

FARM-ENERGY. **Types of Anaerobic Digesters**. Disponível em: <<https://farm-energy.extension.org/types-of-anaerobic-digesters/>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

FENG, L. et al. Developing a biogas centralised circular bioeconomy using agricultural residues - Challenges and opportunities. **The Science of the total environment**, v. 868, n. 161656, p. 161656, 2023.

FERDEŞ, M. et al. Food waste management for biogas production in the context of sustainable development. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6268, 2022.

FERRER, I.; PASSOS, F.; Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production. **Water research**, v. 68, p. 364–373, 2015.

FERTAHI, S. et al. The current status and challenges of biomass biorefineries in Africa: A critical review and future perspectives for bioeconomy development. **The Science of the total environment**, v. 870, n. 162001, p. 162001, 2023.

FIKRI HAMZAH, M. A. et al. Performance of anaerobic digestion of acidified palm oil mill effluent under various organic loading rates and temperatures. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2432, 2020.

FRANCISCO MEDEIROS, A. et al. Avaliação da produção de metano a partir da codigestão de resíduos sólidos orgânicos com macrófitas aquáticas. **Revista DAE**, v. 71, n. 239, p. 115–128, 2022.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146–157, 2019.

GAMBATI, M. F. et al. **Biodigestor anaeróbio: alternativa para tratamento de resíduos sólidos orgânicos**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade Multivix, 2020.

GU, J. et al. Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. **Bioresource technology**, v. 301, n. 122765, p. 122765, 2020.

GRIMBERG, S. J. et al. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester--assessment of variable loadings on system performance. **Bioresource technology**, v. 178, p. 226–229, 2015.

GU, J. et al. Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. **Bioresource technology**, v. 301, n. 122765, p. 122765, 2020.

GUPTA, P.; KURIEN, C.; MITTAL, M. Biogas (a promising bioenergy source): A critical review on the potential of biogas as a sustainable energy source for gaseous fuelled spark ignition engines. **International journal of hydrogen energy**, v. 48, n. 21, p. 7747–7769, 2022.

HOLDEN, N. M. et al. **Introduction to Biosystems Engineering**. [s.l.] American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) in association with Virginia Tech Publishing, Virginia Tech Libraries, 2020.

HU, Y. et al. Performance comparison of CSTR and CSFBR in anaerobic co-digestion of food waste with grease trap waste. **Energies**, v. 15, n. 23, p. 8929, 2022.

HUSSAIN, C. M.; PAULRAJ, M. S.; NUZHAT, S. **Source reduction and waste minimization**. Philadelphia, PA: Elsevier Science Publishing, 2021.

JUÁREZ-HERNÁNDEZ, S.; CASTRO-GONZÁLEZ, A. Assessing the impact of biogas on the energy sustainability of an urban restaurant in Mexico. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, v. 17, n. 1, p. 61–71, 2016.

IEA Bioenergy Review 2022. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2023/05/Annual-Report-2022.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

IEA Bioenergy Review 2023. Disponível em: <<https://www.ieabioenergyreview.org/>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

IEA, **Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth**, IEA, Paris Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

IZHAR, T. N. T. et al. A review of food waste characterization and treatment in anaerobic digestion. **IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 646, n. 1, p. 012004, 2021.

JUÁREZ-HERNÁNDEZ, S.; CASTRO-GONZÁLEZ, A. Assessing the impact of biogas on the energy sustainability of an urban restaurant in Mexico. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, v. 17, n. 1, p. 61–71, 2016.

KABEYI, M. J. B.; OLANREWAJU, O. A. Technologies for biogas to electricity conversion. **Energy reports**, v. 8, p. 774–786, 2022.

KALAISELVAN, N. et al. A waste to energy technology for Enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted

heating systems, socio economic benefits and challenges. **Chemosphere**, v. 293, n. 133486, p. 133486, 2022.

KALAKECH, C. et al. Progress and challenges in recovering dissolved methane from anaerobic bioreactor permeate using membrane contactors: A comprehensive review. **Journal of water process engineering**, v. 50, n. 103218, p. 103218, 2022.

KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1737–1744, 2011a.

KHANAL, S. K.; TIRTA NINDHIA, T. G.; NITAYAVARDHANA, S. Biogas From Wastes. Em: TAHERZADEH, M. J. et al. (Eds.). **Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches**. [s.l.] Elsevier, 2019a. p. 165–174.

KUNZ, A. et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [s.l.] Airton Kunz, Ricardo Luis Radis Steinmetz, André Cestonaro do Amaral (editores Técnicos), 2019.

LABATUT, R. A.; PRONTO, J. L. Sustainable waste-to-energy technologies: Anaerobic digestion. Em: TRABOLD, T. A.; BABBITT, C. W. (Eds.). **Sustainable Food Waste-To-energy Systems**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 47–67.

LABUZA, T. P.; FU, B. Growth kinetics for shelf-life prediction: Theory and practice. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 12, n. 3–5, p. 309–323, 1993.

LAMPIS, A. **Dossier de Energia 2022. Brasil: um foco no setor elétrico**. [s.l.] Banco Interamericano de Desarrollo, 2022.

LETCHER, T. M. (ED.). **Managing global warming: An interface of technology and human issues**. San Diego, CA: Academic Press, 2018.

LI, C. et al. Exploring available input variables for machine learning models to predict biogas production in industrial-scale biogas plants treating food waste. **Journal of cleaner production**, v. 380, n. 135074, p. 135074, 2022a.

LI, Y. et al. Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. **Bioresource technology**, v. 149, p. 565–569, 2013.

LOSEKANN, Luciano; TAVARES, Amanda. **Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural**. Texto para Discussão. Brasília: Editora Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). 1ª. ed. 2020. 71p. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10712/6/TD_Transicao_energetica_opportunidades_Publicacao_Preliminar.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2023.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R.; CASTAÑEDA-AYARZA, J. A. Municipal solid waste treatment in Brazil: A comprehensive review. **Energy nexus**, v. 11, n. 100232, p. 100232, 2023.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do Potencial energético do Biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

LIU, X. et al. Effects of hydraulic retention time on anaerobic digestion performance of food waste to produce methane as a biofuel. **Environmental technology & innovation**, v. 11, p. 348–357, 2018.

LOPES, J. O. et al. Mathematical models for estimating methane production in covered lagoon biodigesters treating pig manure. **Engenharia agrícola**, v. 41, n. 4, p. 438–448, 2021.

MAFACIOLLI, D. **Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia utilizando dejetos de aves de postura com suplementação de glicerina bruta**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Centro Universitário UNIVATES, 2012.

MAHMUDUL, H. M. et al. Estimation of the sustainable production of gaseous biofuels, generation of electricity, and reduction of greenhouse gas emissions using food waste in anaerobic digesters. **Fuel (London, England)**, v. 310, n. 122346, p. 122346, 2022.

MAKAMURE, F.; MUKUMBA, P.; MAKAKA, G. An analysis of bio-digester substrate heating methods: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, n. 110432, p. 110432, 2021.

MCTI. Brasília-DF. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil)

MEDEIROS A. F. **Estudo da produção de metano a partir da co-digestão de resíduos sólidos orgânicos com macrófitas aquáticas**. 20 Dissertação (Mestrado em Engenharia ambiental) – Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

MEGIDO, L. et al. Impact of organic loading rate and reactor design on thermophilic anaerobic digestion of mixed supermarket waste. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 123, p. 52–59, 2021.

MERTINS, A.; WAWER, T. How to use biogas?: A systematic review of biogas utilization pathways and business models. **Bioresources and bioprocessing**, v. 9, n. 1, 2022.

Ministério de Minas e Energia - MME. **Plano Nacional de Energia - PNE 2050**, Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/documents/36208/468569/Relatório+Final+do+PNE+2050/77ed8e9a-17ab-e373-41b4-b871fed588bb>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

Ministério de Minas e Energia - MME. **Resenha Energética Brasileira 2023**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas/resenha-energetica-brasileira-2023/view>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

MORKEN, J.; GJETMUNDTSEN, M.; FJØRTOFT, K. Determination of kinetic constants from the co-digestion of dairy cow slurry and municipal food waste at increasing organic loading rates. **Renewable energy**, v. 117, p. 46–51, 2018.

MOURA RP. **Avaliação do potencial de geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do restaurante universitário da UFRJ** – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

MULLINS, E. A. **Biogas Production and Digestate Quality of Diet-Influenced Food Waste after Anaerobic Digestion**. [s.l.] Ohio University, 2021.

MUTHUDINESHKUMAR, R.; ANAND, R. Life cycle assessment on biofuel production from biomass gasification and syngas fermentation. **IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 312, n. 1, p. 012016, 2019.

MURPHY, J. D.; THAMSIRIROJ, T. Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. Em: **The Biogas Handbook**. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 104–130.

NASCIMENTO, L. A.; OLIVEIRA, R. R. M.; SOUSA, I. P.; MARADINI, P. S.; ROSA, A. P. Insights to improve covered lagoon biodigesters through by-products recovery in pig farms. **Environmental Research and Technology**, v. 4, p. 284-292, 2021.

NAGAO, N. et al. Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. **Bioresource technology**, v. 118, p. 210–218, 2012.

NGEMA, L. et al. Enhancing biodegradation of industrial wastewater into methane-rich biogas using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 7, p. 4181, 2023.

NWOKOLO, N. et al. Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production. **Processes (Basel, Switzerland)**, v. 8, n. 10, p. 1224, 2020.

OCEANLAB. Avaliação Ambiental Estratégica. **Programa Inovação e Transição Digital 2022**. Disponível em: <https://www.compete2030.gov.pt/wp-content/uploads/2023/06/PITD_RELATORIO_AMBIENTAL_FINAL.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2023.

O'CONNOR, S. et al. Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, n. 110580, p. 110580, 2021.

OHEMENG-NTIAMOAH, J.; DATTA, T. Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion. **Bioresource technology**, v. 247, p. 697–704, 2018.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Spatial analysis of energy indicators and proposition of alternative generation sources for the Brazilian territory. **Journal of cleaner production**, v. 356, n. 131894, p. 131894, 2022.

OLIVEIRA, N. M. DE; STRASSBURG, U.; ROCHA JUNIOR, W. F. DA. O Potencial de Geração de Biogás Proveniente da Criação de Suínos no Oeste do Paraná: Um Estudo Exploratório. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 4, p. 803, 2016.

Organização das Nações Unidas Para o Desenvolvimento Industrial; Centro Internacional de Energias Renováveis; Centro Internacional de Energias Renováveis. **Guia prático para projetos de biogás**. Brasília: MCTI, 2022. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Centro Internacional de Energias Renováveis. Operação e monitoramento de reatores anaeróbios: guia de boas práticas. Brasília: **MCTI**, 2021. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Centro Internacional de Energias Renováveis. Sistemas de biogás e biometano: percepções de mercado no

Brasil e no exterior. Brasília: **MCTI**, 2021. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

OWHONDAH, R. O. et al. Assessment and parameter identification of simplified models to describe the kinetics of semi-continuous biomethane production from anaerobic digestion of green and food waste. **Bioprocess and biosystems engineering**, v. 39, n. 6, p. 977–992, 2016.

PAIM, J. V. **Aplicação do biogás produzido a partir de dejetos de gado leiteiro como fonte alternativa de energia em uma queijaria**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, 2018.

PANESAR, K. **Implementation of large-scale anaerobic digestion of food waste at the University of South Florida**. [s.l.] University of South Florida, 2020.

PERDIGÃO, D. Atuação política de grupos de interesse na evolução da matriz energética do Brasil de 1960 a 2019. **Revista Mundi Sociais e Humanidades (ISSN 2525-4774)**, v. 5, n. 3, 2020.

PEREIRA RIBEIRO, M. C. et al. Institutional and legal framework of the Brazilian energy market: Biomass as a sustainable alternative for Brazilian agribusiness. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1554, 2020.

Persson, E. Dry anaerobic digestion of food waste at mesophilic and thermophilic temperature, 2019.

Periódicos **IFPR**. Disponível em:
<[https://periodicos.ifpr.edu.br/index.php?journal=MundiSH&page=article&op=view&path\[\]=1175](https://periodicos.ifpr.edu.br/index.php?journal=MundiSH&page=article&op=view&path[]=1175)>. Acesso em: 13 dez. 2023.

PETRUCCI, R. H. et al. **General chemistry: Principles and modern applications**. Old Tappan, NJ: Prentice Hall, 2011.

PINA, M. D. DE. **Análise e tomada de decisão para avaliação de locais de produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no estado de Goiás.** Monografia (Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.

PINHEIRO, L. U. **Análise de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para produção de biogás utilizando hidrólise ácida e básica.** 2022. Monografia (Graduação em Química Industrial) – Instituto Federal do Espírito Santo, 2022.

PROENÇA, A. J. **Potencial de produção de biogás através da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UFSC.** 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico, Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

PROBIOGÁS. **Guia Técnico de aproveitamento de biogás em estações de tratamento de esgoto.** 2017. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-guia-etes.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2023.

RADMARD, S. A.; HAJI AGHA ALIZADEH, H.; SEIFI, R. Enhancement anaerobic digestion and methane production from kitchen waste by thermal and thermo-chemical pretreatments in batch leach bed reactor with down flow. **Research in Agricultural Engineering**, v. 64, n. 3, p. 128–135, 2018.

RAHMAN, M. A. et al. Biogas production from anaerobic co-digestion using kitchen waste and poultry manure as substrate—part 1: substrate ratio and effect of temperature. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 13, n. 8, p. 6635–6645, 2023.

REBOUÇAS, D.; LIMA, G.; MACHADO, I. **Eficiência Energética Aplicada a Instalação Elétrica de uma Residência.** Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/24582>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

RODRIGUES, H. DE S. **Diagnóstico da Produção de Resíduos Alimentares dos Restaurantes da Universidade Federal do Vale do São Francisco**. [s.l.] Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2022.

RUSÍN, J.; CHAMRÁDOVÁ, K.; BASINAS, P. Two-stage psychrophilic anaerobic digestion of food waste: Comparison to conventional single-stage mesophilic process. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 119, p. 172–182, 2021.

RUXIANG, C. et al. Feeding controls H₂S production in situ in high solid anaerobic digestion. **Bioresources and bioprocessing**, v. 9, n. 1, 2022.

SAGASTUME GUTIÉRREZ, A. et al. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. **Journal of cleaner production**, v. 269, n. 122317, p. 122317, 2020.

SANTANA, R. F. DE; ARAGÃO JÚNIOR, W. R.; EL-DEIR, S. G. **Resíduos sólidos: desenvolvimento e sustentabilidade**. [s.l.] EDUFRPE, 2020.

SAWALE, S. D.; KULKARNI, A. A. Current technical advancement in biogas production and Indian status. Em: TULI, D.; KASTURE, S.; KUILA, A. (Eds.). **Advanced Biofuel Technologies**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 501–532.

SETIC-UFSC. **Restaurante Universitário do Campus Araranguá**. Disponível em: <<https://ru.ararangua.ufsc.br/cardapio/>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

SETIC-UFSC. **UFSC – Campus Araranguá**. Disponível em: <<https://ararangua.ufsc.br/dados-institucionais/>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

SIAHAAN, H. H. Renewable energy test - biogas as fuel in Otto cycle. **IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 1182, n. 1, p. 012022, 2023.

SILVA, A. P. R. DA et al. Modelling the growth of lactic acid bacteria at different temperatures. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 61, n. 0, p. e18160159, 2018.

SILVA, W. R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. 2009. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, 2009.

SIMON, F. W.; CASTILHOS JUNIOR, A. B. DE. Avaliação de digestato proveniente de resíduos alimentares por meio de ensaio de germinação. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 329, 2020.

SKARIYACHAN, S. et al. Recent advances in plastic degradation - From microbial consortia-based methods to data sciences and computational biology driven approaches. **Journal of hazardous materials**, v. 426, n. 128086, p. 128086, 2022.

SOUSA, A. L.; RIZZATTO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 2, 2022.

Suitable technology for biodigestion - Search. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/search?q=%20suitable%20technology%20for%20bio%20digestion>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

TALIA, L. Biogas Plants: Design and Fabrication. Em: **Biofuel and Biorefinery Technologies**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 51–93.

TÁPPARO, D. C. et al. Swine manure biogas production improvement using pre-treatment strategies: Lab-scale studies and full-scale application. **Bioresource technology reports**, v. 15, n. 100716, p. 100716, 2021.

TASSAKKA, M. I. S. et al. Optimum organic loading rates (OLR) for food waste anaerobic digestion: Study case Universitas Indonesia. **International Journal of Technology**, v. 10, n. 6, p. 1105, 2019.

UDDIN, M. M.; WRIGHT, M. M. Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. **Physical Sciences Reviews**, v. 0, n. 0, p. 2819–2837, 2022.

UMA, S.; THALLA, A. K.; DEVATHA, C. P. Co-digestion of food waste and Switchgrass for biogas potential: Effects of process parameters. **Waste and biomass valorization**, v. 11, n. 3, p. 827–839, 2020.

VAN, D. P. et al. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. **Environmental Engineering Research**, v. 25, n. 1, p. 1–17, 2019.

VAN HAANDEL, A.; LUCAS DOS SANTOS, S.; VIEIRA PAIVA, F. Aplicação do sistema UASB-lagoas de polimento para o tratamento de esgoto visando ao reúso agrícola ou industrial ou à proteção de recursos hídricos. **Revista DAE**, v. 69, n. 229, p. 173–191, 2021.

VENTURA, J.-R. S.; LEE, J.; JAHNG, D. A comparative study on the alternating mesophilic and thermophilic two-stage anaerobic digestion of food waste. **Journal of environmental sciences (China)**, v. 26, n. 6, p. 1274–1283, 2014.

WANNER FORNER, J.; DE CONTO, S. M. Geração de resíduos sólidos de um restaurante em uma instituição de ensino superior. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 255, 2020.

WANG, F.; ZHANG, C.; HUO, S. Influence of fluid dynamics on anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Environmental technology**, v. 38, n. 9, p. 1160–1168, 2017.

WERKNEH, A. A. Biogas impurities: environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. **Heliyon**, v. 8, n. 10, p. e10929, 2022.

WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. [s.l.], 2012.

WU, L.-J. et al. Comparison of single-stage and temperature-phased two-stage anaerobic digestion of oily food waste. **Energy conversion and management**, v. 106, p. 1174–1182, 2015.

XU, F. et al. Multi-criteria assessment of food waste and waste paper anaerobic co-digestion: Effects of inoculation ratio, total solids content, and feedstock composition. **Renewable energy**, v. 194, p. 40–50, 2022.

XUE, S. et al. Interactive effects of carbohydrate, lipid, protein composition and carbon/nitrogen ratio on biogas production of different food wastes. **Bioresource technology**, v. 312, n. 123566, p. 123566, 2020.

YANG, H. et al. A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater. **Water research**, v. 102, p. 464–474, 2016.

YANG, S. et al. Biogas production of food waste with in-situ sulfide control under high organic loading in two-stage anaerobic digestion process: Strategy and response of microbial community. **Bioresource technology**, v. 373, n. 128712, p. 128712, 2023.

YEH, C. K. et al. Optimizing food waste composting parameters and evaluating heat generation. **Applied sciences (Basel, Switzerland)**, v. 10, n. 7, p. 2284, 2020.

ZHANG, W. et al. Performance and kinetic evaluation of semi-continuously fed anaerobic digesters treating food waste: role of trace elements. **Bioresource technology**, v. 178, p. 297–305, 2015.

ZHAO, X.-F. et al. Effect of total solids contents on the performance of anaerobic digester treating food waste and kinetics evaluation. **E3S web of conferences**, v. 272, p. 01026, 2021.

ZHENGWEI, L. I. et al. A pilot-scale study on the stability of two-phase anaerobic digestion of food waste under thermophilic conditions. **Huanjing gongcheng xuebao**, v. 10, n. 11, p. 6662–6668, 2016.

ZUPANČIČ, M. et al. Current status and review of waste-to-biogas conversion for selected European countries and worldwide. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1823, 2022.