



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Victor Alcântara Barbosa Cunto

**Descarbonizando o *Campus* UFSCar – Lagoa do Sino a partir da produção de Biogás:
uma análise de viabilidade ambiental, técnica e econômica**

Buri

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS LAGOA DO SINO

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Victor Alcântara Barbosa Cunto

**Descarbonizando o *Campus* UFSCar – Lagoa do Sino a partir da produção de Biogás:
uma análise de viabilidade ambiental, técnica e econômica**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental na Universidade
Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dra. Yovana María
Barrera Saavedra.

Buri

2022

Cunto, Victor Alcantara Barbosa

Descarbonizando o Campus UFSCar - Lagoa do Sino a partir da produção de Biogás: uma análise de viabilidade ambiental, técnica e econômica / Victor Alcantara Barbosa Cunto -- 2022.
67f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri
Orientador (a): Yovana María Barrera Saavedra
Banca Examinadora: Anne Alessandra Cardoso Neves, Beatriz Cruz Gonzalez
Bibliografia

1. Bioenergia. 2. Biogás. I. Cunto, Victor Alcantara Barbosa. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

FOLHA DE APROVAÇÃO
VICTOR ALCANTARA BARBOSA CUNTO

DESCARBONIZANDO O CAMPUS UFSCAR – LAGOA DO SINO A
PARTIR DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS: UMA ANÁLISE DE VIABILIDADE
AMBIENTAL, TÉCNICA E ECONÔMICA.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental na Universidade
Federal de São Carlos. Buri, 13 de abril de
2022

Orientador(a)



Documento assinado digitalmente

YOVANA MARIA BARRERA SAAVEDRA

Data: 20/04/2022 10:35:33-0300

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

Dra. Yovana María Barrera Saavedra

Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências da Natureza

Examinador(a)

Dr. Beatriz Cruz Gonzalez

Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências da Natureza

Examinador(a)

Dr. Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Examinador(a)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente para a minha família, por me apoiarem e acreditarem em mim.

AGRADECIMENTO

Agradeço a UFSCar *Campus* Lagoa do Sino, por proporcionar ensino de qualidade, estrutura de ensino, professores experientes e auxílio durante todos esses anos. Além disso, agradeço, em especial, a Prof^a. Yovana Saavedra, por me auxiliar no trabalho de conclusão de curso. Ao Prof^o. Jorge Pantoja, por estimular meus aprendizados e acreditar no meu potencial, me ajudando sempre que possível.

Aos meus amigos, que moraram e permaneceram comigo durante minha trajetória, sendo minha segunda família. À minha família e em especial à minha mãe, pai, irmão, avós, tias e tios, por todo suporte, amor e carinho que me propuseram durante toda a minha vida. Agradeço também à minha namorada, que me ajudou em todos os momentos, estando ao meu lado e me dando forças para o desenvolvimento deste trabalho.

E por fim, agradeço a todos que estiveram presentes durante minha jornada da graduação e proporcionaram uma rede de aprendizados enriquecedores que levo para minha vida.

“Porque o guerreiro de fé nunca gela. Não agrada o injusto, e não amarela”

(Pereira, P. P. Soares)

RESUMO

CUNTO, Victor. **Descarbonizando o *Campus* UFSCar – Lagoa do Sino a partir da produção de Biogás: uma análise de viabilidade ambiental, técnica e econômica.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, Buri, 2022.

A disposição da fração orgânica dos resíduos sólidos em aterros sanitários são causadoras de impactos ambientais, dentre eles a redução de sua vida útil e a geração de gases de efeito estufa, além de impossibilitar a revalorização do resíduo e da sua capacidade econômica. Em virtude das diretrizes traçadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10) e a sua destinação ambientalmente adequada, fica evidente a relevância da implantação da revalorização de resíduos orgânicos. Deste modo, este trabalho teve por objetivo realizar uma avaliação da produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário (RU) na UFSCar *Campus* Lagoa do Sino. Para atingir o objetivo principal foi realizada uma revisão da literatura sobre a viabilidade técnica, ambiental e econômica da implementação de biodigestores. Desta forma, obteve-se uma estimativa da produção de $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de biogás, a partir de $183,68 \text{ kg} \cdot \text{dia}^{-1}$ de sobras das refeições. Este possibilitou o dimensionamento de um reator anaeróbio, modelo canadense, com volume útil de $4,09 \text{ m}^3$ e investimento inicial de R\$ 8.631,81, obtendo tempo de retorno de 1,02 anos, considerando o cenário de substituição do Gás Liquefeito de Petróleo pelo CH_4 , contribuindo para viabilidade da sua implantação e ajudando na descarbonização do *Campus* Lagoa do Sino.

Palavras-chave: Biogás, Biorreator, GLP, Bioenergia, Sustentabilidade.

ABSTRACT

CUNTO, Victor. **Decarbonizing the Campus UFSCar - Lagoa do Sino from the production of Biogas: an analysis of environmental, technical and economic viability.** 2022. Undergraduate thesis - Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino, Buri, 2022.

The disposition of the organic fraction of solid waste in sanitary landfills, are responsible for environmental impacts, among them the reduction of its useful life and the generation of Greenhouse Effect Gases, besides preventing the revaluation of the waste and its economic capacity. Due to the guidelines drawn up by the National Solid Waste Policy and its environmentally appropriate destination, it is evident the relevance of the implementation of the revaluation of organic waste. Thus, this work aimed to carry out an evaluation of biogas production from organic waste from the University Restaurant at UFSCar Campus Lagoa do Sino. To achieve the main objective, a review of the literature, the technical, environmental and economic feasibility of the implementation of biodigesters was performed. Thus, the generation of $0.20 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ of biogas was obtained, from $183.68 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1}$ of leftover meals. This enabled the design of an anaerobic reactor, Canadian model, with a useful volume of 4.09 m^3 and initial investment of R\$ 8,631.81, obtaining a return time of 1.02 years, considering the scenario of substitution of Liquefied Petroleum Gas by CH_4 , contributing to the feasibility of its implementation and helping to decarbonize the Lagoa do Sino Campus.

Keywords: Biogas, Biorreactor, LPG, Bioenergy, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de conversão de biomassa para insumos diversificados.....	22
Figura 2 - Processos de biodigestão anaeróbica para formação de biogás.....	24
Figura 3 - Rotas metabólicas para formação de metano.....	27
Figura 4 - Esquema proposto para explicar a ação inibitória da amônia livre.....	31
Figura 5 - Biodigestor modelo chinês.....	35
Figura 6 - Biodigestor modelo indiano.....	36
Figura 7 - Representação do reator modelo canadense.....	37
Figura 8 - Diagrama sistêmico de aplicação da EC.....	39
Figura 9 - Imagem ilustrativa de uma caixa trapezoidal destinada ao biodigestor e suas dimensões.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de geração de resíduos orgânicos provenientes de diferentes RU's.....	21
Tabela 2 - Composição percentual dos gases contidos no biogás.....	24
Tabela 3 - Parâmetros utilizados no desenvolvimento dos cálculos da produção de CH ₄	51
Tabela 4 - Valores obtidos de vazão de alimentação com resíduos provenientes do RU.....	52
Tabela 5 - Resultados do volume útil do biodigestor baseando-se nos resíduos descartados.....	52
Tabela 6 - Resultados do fator de temperatura operacional do biodigestor e da carga de DQO convertida em CH ₄	53
Tabela 7 - Resultado de geração de CH ₄ diária utilizando o fator de correção da temperatura operacional.....	53
Tabela 8 - Variáveis dependentes e independentes dos aspectos construtivos da caixa trapezoidal.....	54
Tabela 9 - Resultado do dimensionamento dos aspectos construtivos dos biodigestores.....	54
Tabela 10 - Dimensionamento das caixas de entrada e saída do biodigestor.....	55
Tabela 11 - Dimensionamento das lonas de impermeabilização e vedação.....	55
Tabela 12: Poder calorífico mensal e equivalência de biogás em relação ao número de botijões de GLP.....	56
Tabela 13 - Produção de biofertilizante e receita obtida com a sua venda.....	57
Tabela 14: Geração de energia elétrica proveniente do CH ₄ e seu respectivo preço.....	58
Tabela 15 - Fator de investimento do biodigestor por m ³	58
Tabela 16: Gastos iniciais com a construção dos biodigestores.....	59
Tabela 17: Valores obtidos para obtenção do retorno do investimento no biodigestor considerando a conversão do CH ₄ em energia elétrica.....	60
Tabela 18: Valores obtidos para obtenção do retorno do investimento no biodigestor considerando a conversão do CH ₄ em combustível na cozinha do RU.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a – Comprimento da base maior da caixa trapezoidal (m)
- A_f – Área transversal da caixa trapezoidal (m^2)
- b – Comprimento da base menor da caixa trapezoidal (m)
- C_{bio} - Custo evitado de biofertilizante (R\$)
- CH_3COOH - Acetato
- CH_4 - Metano
- CO - Monóxido de Carbono
- CO_2 - Dióxido de Carbono
- DQO_{CH_4} – DQO convertida em CH_4 ($kg\ DQO.dia^{-1}$)
- E% - Eficiência de conversão da matéria orgânica (%)
- E_c – Energia efetiva gerada a partir da utilização de sistemas de cogeração ($kwh.dia^{-1}$)
- E_{met} – Energia gerada proveniente do CH_4 ($kwh.dia^{-1}$)
- f(T) – Fator de correção da temperatura operacional do biodigestor ($kg\ DQO.m^3$)
- GEE - Gases de Efeito Estufa
- h – Altura da caixa trapezoidal (m)
- h_{ces} – Profundidade das caixas de entrada e saída (m)
- H_2 - Hidrogênio
- H_2S - Ácido Sulfídrico
- L – Comprimento da caixa trapezoidal (m)
- L_{ce} – Largura da caixa de entrada (m)
- L_{cs} – Largura da caixa de saída (m)
- L_i – Lona de impermeabilização (m)
- L_v – Lona de vedação (m)
- m_p – Sobras alimentares despejadas por pessoa ($kg.pessoa^{-1}$)
- N_2 - Nitrogênio

N_2O - Óxido Nítrico

NH_3 - Amônia

n_p – Número de pessoas por dia no RU (pessoa.dia⁻¹)

O_2 - Oxigênio

P_{bio} – Potencial diário de produção de biofertilizante (kg)

P_{em} – Potencial de geração de energia elétrica do metano (kwh.m⁻³)

P_{merc} - Preço médio de biofertilizantes (R\$.kg⁻¹)

Q_a – Vazão de alimentação diária do biodigestor (m³.dia⁻¹)

S – Concentração da DQO do efluente (kg.m⁻³)

S_0 – Concentração da DQO do afluente (kg.m⁻³)

SELIC - Sistema Especial de Liquidação e Custódia

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

T_r – Tarifas de energia (R\$.kwh⁻¹)

TRH – Tempo de retenção hidráulica (dias)

V_{ce} – Volume da caixa de entrada dos resíduos (m³)

V_{cs} – Volume da caixa de saída dos resíduos (m³)

$V_{gás}$ – Volume destinado ao gás na campânula (m³)

V_{ger} – Valor de geração de energia elétrica através do CH₄ (R\$.dia⁻¹)

VPL - Valor Presente Líquido

V_u – Volume útil do biodigestor (m³)

Y_{obs} – Coeficiente de produção dos sólidos no sistema (kg DQO_{lodo}. kg DQO_{afl})

ρ – massa específica de restos alimentares (kg.m⁻³)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. JUSTIFICATIVA	17
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GERAL	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. REVISÃO DA LITERATURA	18
4.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	18
4.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS EM RESTAURANTES UNIVERSITÁRIOS	19
4.3. BIOMASSA	20
4.4. BIOGÁS	22
4.4.1. HIDRÓLISE	24
4.4.2. ACIDOGÊNESE	24
4.4.3. ACETOGÊNESE	25
4.4.4. METANOGÊNESE	25
4.4.5. PARÂMETROS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO	27
4.5. LEGISLAÇÕES VIGENTES	32
4.6. BIODIGESTOR	33
4.7. ECONOMIA CIRCULAR	38
5. MÉTODO DE PESQUISA	40
5.1. VIABILIDADE TÉCNICA	40
5.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL	48
5.3. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
6.1. DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR	50
6.2. BENEFÍCIOS DA TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS ALIMENTARES EM COPRODUTOS	60
7. CONCLUSÃO	62
8. REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

Os riscos das mudanças climáticas globais exercem grandes preocupações no cenário mundial. Isto ocorre devido ao aumento subsequente das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) produzidos principalmente pela utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia elétrica, nos processos de geração e transformação desses combustíveis e em processos agroindustriais, incluindo o transporte (CALDAS, 2017; MARQUES, 2018). Esse fenômeno ocorreu devido a aceleração no desenvolvimento da humanidade após a Revolução Industrial, a qual teve início no final do século XVIII, marcada pela utilização de máquinas à vapor e, posteriormente, na utilização intensa desses combustíveis em atividades que utilizam energia proveniente de sua combustão (GOLDEMBERG, 2009; CASTRO, 2020).

A utilização desenfreada dessas fontes energéticas contribuem para a elevação da temperatura do planeta que decorrem do aquecimento gerado pelo efeito estufa, amplificando a evaporação da água dos oceanos, principal agente potencializador de calor no planeta (vapor d'água), e em conjunto com a emissão de gases como o Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O) (NETO, 2010). Estes gases têm como função absorver a radiação solar irradiada pela superfície terrestre, impedindo que o calor retorne ao espaço, dificultando a sua dispersão (JUNGES et al., 2018). O CO₂ é o gás de maior participação na amplificação do efeito estufa, devido à sua maior capacidade radioativa e por se encontrar em maior volume que os demais (GOLDEMBERG, 2009; NETO, 2010).

O combustível fóssil é a principal fonte de energia elétrica mundial, sendo 80% de toda energia produzida advinda desse recurso. Ele é utilizado na forma de carvão mineral, gasolina, óleo diesel, gás natural e outros derivados de petróleo (GOLDEMBERG, 2009). Evidencia-se a necessidade de redução do consumo de energias primárias diversificando as fontes energéticas através do apoio e incentivo de governos, em âmbito mundial, capazes de influenciar a introdução de energia limpa e carbono zero (MARQUES, 2018). Esse apoio mundial avançou significativamente através do Protocolo de Kyoto, realizado em 1997, sendo um tratado internacional que teve como objetivo controlar as emissões de GEE, estabelecendo metas para serem concluídas até 2012 de redução das emissões de gases, sendo até 8% para países da União Europeia, e estimulando a criação de formas de desenvolvimento sustentável, a fim de preservar o meio ambiente (European Commission, 2015; SENADO FEDERAL, 201-).

Este estímulo proporcionou um leque de alternativas quanto às tecnologias capazes de

potencializar o desenvolvimento sustentável, incluindo as transformações energéticas favoráveis à redução das emissões de grandes quantidades de CO₂. O cenário global atual, trouxe metas ambiciosas desencadeando investimentos em energias limpas, desenvolvendo segmentos dinâmicos da economia e visando zerar as emissões de CO₂, através de iniciativas como o *Green Deal*, realizado na Europa, e Acordo de Paris, realizado por 195 países com o intuito de reduzir os GEE (OLIVEIRA, 2019; LOSEKANN; TAVARES, 2020).

Diferentemente de outras regiões do mundo, o Brasil possui diversificação em sua matriz energética, tendo cerca de 46,1% de fontes renováveis, como: biomassa, carvão vegetal, hidráulica e nuclear, e o restante em fontes não renováveis. Este fato, demonstra a menor emissão de GEE ao se relacionar com outros países. Porém, a problemática encontrada nessa situação é a forte dependência da energia elétrica proveniente de usinas hidrelétricas, sendo 63,8% em relação às demais, tornando a geração de energia elétrica vulnerável às mudanças climáticas e a alteração nos regimes de chuvas. Essa vulnerabilidade se explica devido aos baixos volumes de água encontrados nos reservatórios, não sendo capazes de abastecer as necessidades de produção energética pela alta demanda de água, que possibilita o esgotamento desses reservatórios, tornando-se necessário o acionamento de centrais termelétricas para geração de energia (GALVÃO; BERMAN, 2015; BEN, 2020). Neste sentido, é necessário que haja o aumento na utilização de fontes energéticas que permitam sua descarbonização, como é o caso da geração de biogás a partir de resíduos orgânicos provenientes de atividades agrícolas, cidades, universidades, entre outros.

No Brasil, é existente grande disponibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), sendo 45,3% apenas de fração orgânica, dentre os resíduos gerados tem-se aproximadamente 36 milhões de toneladas de restos de alimentos e resíduos de poda e, em sua maioria, descartados inadequadamente ou despejados nos aterros sanitários. Como exemplificação, a grande quantidade diária de resíduos e sobras alimentares são geradas em restaurantes, tendo 11,3% de desperdício de toda comida preparada apenas em *fast foods* (NASCIMENTO, 2014; ANUFOOD, 2018; ABRELPE, 2020). Entretanto, segundo a Lei 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos devem ter possibilidade de tratamento e recuperação, sendo economicamente viáveis.

As problematizações supracitadas, tendo foco nos resíduos orgânicos, são passíveis de serem solucionadas através da utilização de biodigestores anaeróbios, capazes de converter a matéria orgânica em biogás, visando a geração de gás metano e energia, e com isso, reduzindo

consideravelmente o impacto ambiental, bem como, liberação de GEE para atmosfera e gerando a valorização econômica desse resíduo (NASCIMENTO, 2014).

2. JUSTIFICATIVA

A PNRS emprega progressivamente maior relevância ao gerenciamento de resíduos, sendo uma política que viabiliza uma visão sistêmica na gestão de resíduos sólidos, a fim de garantir a diminuição dos impactos ambientais, maior bem-estar social e o desenvolvimento sustentável (MOURA, 2017). Em suma, as Universidades, sendo instituições de significativa importância nos campos econômicos, tecnológicos e sociais, são responsáveis pela formação de profissionais de diversas áreas do conhecimento, dando-lhes o dever e a capacidade de cumprir as políticas públicas e exercer boas práticas em seus segmentos. Além disso, possuem como responsabilidades legais, por serem consumidoras de bens e serviços, efetuar o tratamento correto de seus resíduos, adequando-se às exigências da legislação vigente. Esta responsabilidade deve ser um fator decisivo para mudança de cenário no qual o país se encontra, em que são gerados 45,3% de resíduos orgânicos (contemplando sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeira) e trazendo maior sensibilidade sobre o assunto (MOURA, 2017; ABRELPE, 2020).

Contudo, devido a disponibilidade de insumos orgânicos capazes de serem utilizados para produção de energia, visando maior diversificação da matriz energética e sua descarbonização, se faz necessário produzi-la a partir da geração distribuída, focando na autoprodução e, conseqüentemente, na sua estabilidade de fornecimento e barateamento de custos, seguindo as definições do art. 14 da Lei nº 5163/2004 e nas diretrizes da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, a qual estimula a cogeração de energia visando autoconsumo.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é realizar uma avaliação da produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário (RU) na UFSCar *Campus* Lagoa do Sino.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Realizar a revisão da literatura;
- Levantar o diagnóstico da geração de resíduos orgânicos no campus LS;
- Realizar análise da viabilidade ambiental da produção de biogás;
- Realizar análise da viabilidade econômica da produção de biogás da área de estudo;
- Realizar análise da viabilidade técnica da produção de biogás da área de estudo

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Atualmente, a sociedade vive com grandes dificuldades relacionadas ao descarte de resíduos sólidos, sendo destinados para aterros sanitários, aterros controlados e lixões a céu aberto, tornando-os a forma mais tradicional de disposição final de resíduos (ABRELPE, 2021).

No Brasil, as alternativas de destinação final adequada englobam 60% dos resíduos coletados, em contrapartida, 40% dos resíduos continuam sendo enviados para aterros controlados e lixões. A região Sudeste conta com melhores cenários, tendo 73,4% dos resíduos destinados adequadamente, sendo 29.542.830 toneladas por ano (ABRELPE, 2021).

Adicionalmente, para que os resíduos gerados possam chegar à disposição final é necessário que possua uma logística e infraestrutura de coleta e transporte, porém essas condições não são realidade em alguns centros urbanos, gerando graves passivos ambientais. Estes resíduos muitas vezes são descartados irregularmente em terrenos baldios, próximos a estradas, rios, entre outras localidades, gerando problemas para a saúde pública (TACHIBANA, 2019).

A PNRS define o resíduo sólido como um bem resultante de atividades humanas, em estado sólido ou semi-sólido, gasosos contidos em recipientes, e líquidos, cujas características e particularidades de cada um tornem inviável o seu descarte em redes públicas de esgoto, em corpos d'água ou que exijam soluções técnicas para seu tratamento. Desse modo, os RSU são provenientes de resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas, resíduos de limpeza urbana, provindos de limpeza de logradouros, varrição e outros similares. Sendo obrigação das prefeituras a realização de sua coleta e destinação final ambientalmente adequada.

No Brasil, a composição do RSU é majoritariamente de origem orgânica e grande parcela destes resíduos não recebem tratamentos específicos e são destinados para aterros

sanitários, possibilitando a redução da vida útil desses locais. O resíduo orgânico se caracteriza por ser de origem vegetal ou animal, sendo constituído de matéria orgânica. Tem como especificidade física ser úmido e o alto grau de degradabilidade, sendo constituídos por restos de comida, resíduos agrícolas, de poda e jardinagem, entre outros (JUNQUEIRA, 2014).

Segundo a ABRELPE (2021), a centralização e seu conseqüente aumento na geração de resíduos foi influenciada em virtude da pandemia da COVID-19. Permitindo uma produção de 82,5 milhões de toneladas ou 225.965 toneladas diárias de resíduos orgânicos provenientes, em sua maioria, das residências. Em média, gerou-se 1,07 kg per capita no Brasil e no Sudeste esse valor é de 1,26 kg/hab/dia, sendo a região de maior geração de resíduos.

4.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS EM RESTAURANTES UNIVERSITÁRIOS

A geração de resíduos provenientes de restaurantes convencionais compreende todas as etapas do processo, desde a manipulação do alimento até o descarte de sobras alimentares após cada refeição. Esta realidade é pertinente em restaurantes universitários, demonstrando que a geração de resíduos orgânicos possui maior representatividade no volume de resíduos que os demais refugos.

Em estudos realizados na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), foi demonstrado que nas áreas voltadas para alimentação da comunidade acadêmica, a geração de resíduos orgânicos possui 97,21% do volume total de resíduos. Esta produção é equivalente a 90,15 kg.dia⁻¹ proveniente do consumo alimentar de 800 pessoas.dia⁻¹ (COSTA *et al.*, 2004). A análise efetuada no *Campus* de Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), demonstra que a quantidade média de resíduos orgânicos obtidos após sua segregação foram de 68,92 kg.dia⁻¹ após 355 refeições diárias e, assim, obtendo-se 0,194 kg.refeição⁻¹ (ALBERTONI, 2013).

Segundo Menezes *et al.* (2002), foi efetuado o levantamento no restaurante central do *Campus* de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), encontrando-se 74,6% da massa total de resíduos com origem orgânica e uma geração de 134,3 kg.dia⁻¹, após serem servidos, aproximadamente, 1000 refeições diárias. Já no diagnóstico realizado na Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), em Cuiabá, foram produzidos 199,3 kg.dia⁻¹ após servirem-se 1616 refeições (NASPOLINI *et al.*, 2009). Segundo Gomes (2014), foi realizado um diagnóstico no RU setorial II da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ao qual distribuí 2.480 refeições diárias, gerando 406,72 kg.dia⁻¹ de resíduos desperdiçados.

A seguir, na Tabela 1, evidencia-se, de maneira comparativa, o potencial de geração de biomassa obtida diariamente em função da geração média de resíduos orgânicos nos restaurantes, visando facilitar o entendimento dos dados retirados da literatura.

Tabela 1: Comparativo de geração de resíduos orgânicos provenientes de diferentes RU's.

Universidade	Resíduo Orgânico (kg)	Refeições diárias	Resíduo Orgânico (kg) / Refeição diárias
UEPB	90,15	800	0,113
UTFPR	68,92	355	0,194
USP	134,30	1.000	0,134
UFMT	199,30	1.616	0,123
UFMG	406,72	2.480	0,164

Fonte: Adaptado Sotti (2014).

Estes desperdícios relacionam-se a muitos fatores, tais como: planejamento inadequado no número de refeições produzidas, instabilidade na frequência diária dos comensais, preferências alimentares, treinamento dos funcionários para uma produção e porcionamento adequado dos alimentos e preparações (HIRSCHBRUCH, 1998). Apesar dos dados levantados, e mesmo com o desperdício obtido, é evidente a necessidade de realizar melhor gerenciamento dos resíduos, reutilizando-os positivamente, de maneira a não serem vistos apenas como desperdício e permitindo seu uso como fonte de novos produtos.

4.3. BIOMASSA

No contexto global, a biomassa é um termo que deriva de grupos de produtos energéticos e matérias-primas renováveis, provenientes de matéria orgânica. Considerando o contexto energético, a biomassa é uma fonte de energia renovável, a qual utiliza a matéria orgânica, provinda de animais e vegetais, e tem como finalidade a produção de energia, tanto elétrica, quanto combustíveis (MARAFON *et al.*, 2016).

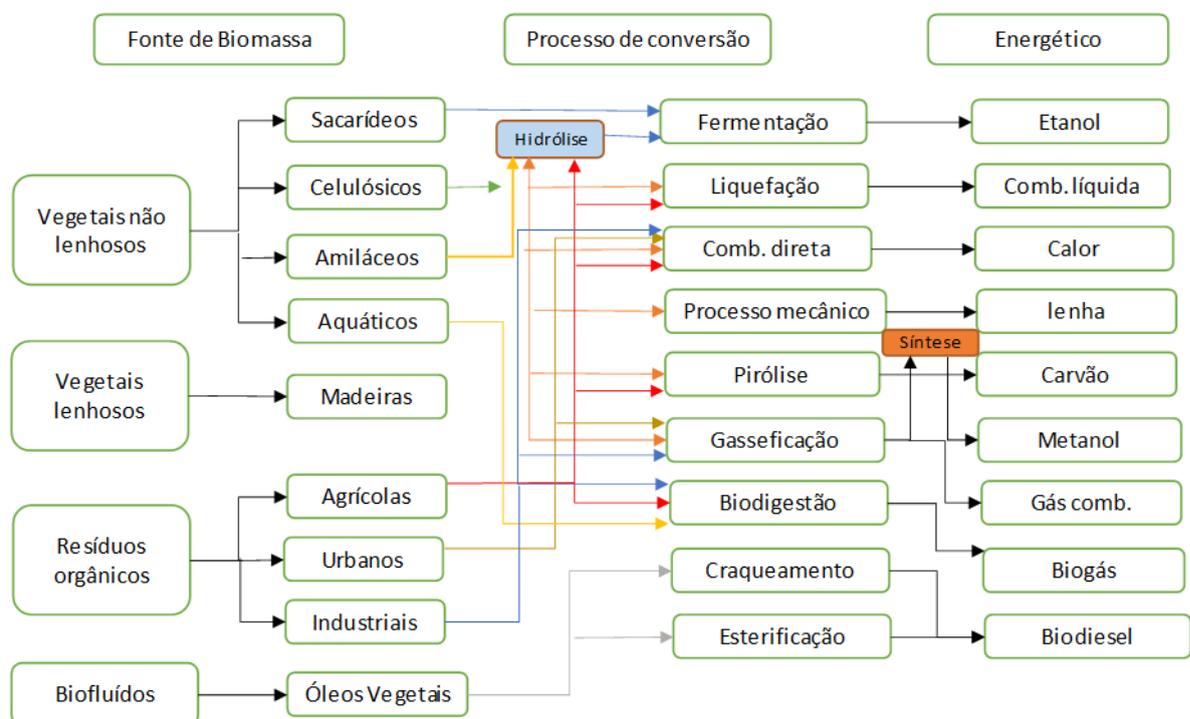
A biomassa é subdividida em duas classes distintas: biomassa tradicional e biomassa moderna. A biomassa tradicional é formada por lenha e resíduos naturais em geral. Já a

biomassa moderna, a qual são provindos de processos tecnológicos avançados e eficientes, é capaz de produzir biocombustíveis líquidos, briquetes e *pellets*, realizar cogeração energética - podendo utilizar recursos obtidos através dos resíduos agrícolas - e cultivos direcionados a geração de energia, como a cana-energia e florestas plantadas (GOLDEMBERG *et al.*, 2008; MARAFON *et al.*, 2016).

Na biomassa moderna, tem-se que a principal fonte de geração de energia provém dos resíduos, sendo principalmente de origem vegetal. Destes, os processos que são predominantemente utilizados como insumos energéticos são: produção de biocombustíveis sólidos para energia térmica (carvão e resíduos florestais), biocombustíveis líquidos (álcool e diesel) e geração de energia elétrica (combustão direta, gaseificação, queima de gases e outras tecnologias) (GOLDEMBERG *et al.*, 2008; MARAFON *et al.*, 2016).

Para a produção de energia, são realizados processos de conversão, sendo diferentes para cada tipo de insumo orgânico, como evidenciado na Figura 1, abaixo:

Figura 1: Processos de conversão de biomassa para insumos diversificados.



Fonte: Adaptado Kunz *et al.*, 2019.

A conversão de insumos sólidos é realizada em caldeiras e motores de combustão interna. Esses processos derivam da combustão direta, transformando a energia química dos combustíveis em calor, através de reações dos elementos constituintes com o O_2 fornecido; a decomposição térmica (termólise), caracterizando-se pela decomposição química de substâncias devido a inserção de calor no processo; e a combustão dos produtos sobressalentes da decomposição, a fim de obter a combustão completa do combustível (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

A biomassa líquida pode ser convertida em energia através de processos de combustão direta, cogeração (combinação de processos térmicos e mecânicos), processos termoquímicos (pirólise ou craqueamento, gaseificação, hidrólise, liquefação e transesterificação) e processos biológicos (fermentação e biodigestão anaeróbia) (OLIVEIRA, 2004).

O biocombustível depende intrinsecamente de características termoquímicas (composição elementar, granulometria, densidade, teor de cinzas, grau de umidade entre outros), transformando-os em poder calorífico para conversão em energia. Entretanto, para essa ação é necessária a análise físico-química e a determinação da composição de cada constituinte, os quais influenciam no rendimento do processo e na transformação da biomassa (OLIVEIRA, 2004).

4.4. BIOGÁS

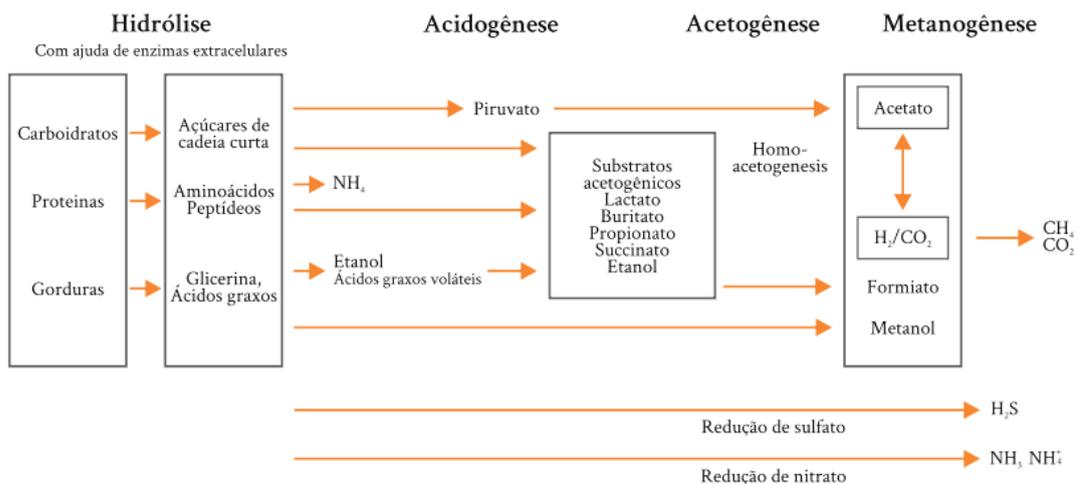
O biogás é um produto gerado a partir da digestão anaeróbica de um processo metabólico complexo, requerendo condições anaeróbias e que são dependentes de atividades associativas de microrganismos, tornando-os capazes em converter a matéria orgânica em mistura de gases, sendo composta por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), pequenas quantidade de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), tendo traços de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), carboidratos saturados (CS) e oxigênio (O_2), conforme evidenciado na Tabela 2 abaixo (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011):

Tabela 2: Composição percentual dos gases contidos no biogás.

Composição de Gases	Porcentagem (%)
CH ₄	55-70
CO ₂	27-45
N ₂	3-5
H ₂	1-10
O ₂	0,1
CO	0,1
H ₂ S	Traços

Fonte: Adaptado de DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011.

Este processo se subdivide em hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Estas etapas são dependentes de grupos específicos de microrganismos, necessitando de condições ambientais e características para cada espécie, como observa-se na Figura 2, a seguir:

Figura 2: Processos de biodigestão anaeróbica para formação de biogás.

Fonte: KUNZ *et al.*, 2009.

4.4.1. HIDRÓLISE

A digestão anaeróbia divide-se em quatro momentos, tendo a hidrólise como etapa inicial. Este processo consiste na degradação de compostos complexos de elevada massa molecular, como os lipídios, polissacarídeos e proteínas, transformando-os em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis, como demonstrado na Equação 1 (SOUZA; JUNIOR; FERREIRA, 2005; KUNZ *et al.*, 2019).



O processo ocorre devido a ação de enzimas extracelulares (exo enzimas) que são excretadas pelas bactérias hidrolíticas, sendo uma importante etapa da degradação bioquímica, tornando-se a limitante da velocidade da digestão anaeróbia. O tempo de biodegradação do substrato varia conforme o insumo, sendo altamente dependente de suas características, em que os carboidratos são degradados mais facilmente, em poucas horas; os lipídios e proteínas devido a sua complexidade, podem demorar alguns dias; e a lignocelulose e lignina tem velocidade de degradação ainda mais lenta durando dias e algumas vezes de maneira incompleta (KUNZ *et al.*, 2019).

4.4.2. ACIDOGÊNESE

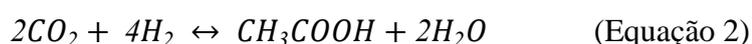
Nesta segunda etapa de biodigestão do material orgânico, as substâncias (monômeros) que são resultantes da fase hidrolítica são utilizadas como substrato por bactérias acidogênicas (anaeróbias e anaeróbias facultativas), transformando-as em diferentes tipos de ácidos, como ácido propanoico, ácido acético, ácido butanoico, ácido lático, álcoois, além de formar H₂, H₂S, óxidos de nitrogênio (NO_x) e CO₂. Os produtos gerados possuem cadeias curtas de moléculas contendo de um a cinco carbonos. Além do mais, é necessário que haja controle da pressão parcial do hidrogênio a ser produzido, o qual é capaz de afetar diretamente nos processos de oxidação dos produtos. Caso seja muito elevada a pressão obtida, será resultante maiores quantidades de carbono no processo, tornando-o prejudicial ao sistema (FERREIRA, 2015; KUNZ *et al.*, 2019).

A acidogênese, consiste em ser um estágio fermentativo, por sua vez, tem a capacidade de degradar os carboidratos (glicose) em piruvato e, este, em ácido lático a partir dos *Lactobacillales* e transformando-o, posteriormente, em etanol com auxílio das leveduras. Os processos degradativos da acidogênese consistem em: ácidos graxos sendo degradados por *Acetobacter* através da β -oxidação e liberando sequencialmente carbonos em formato de acetatos; aminoácidos são degradados por *Clostridium botulinum* através de reações que resultam na formação de acetato, NH_3 , CO_2 e H_2S (FERREIRA, 2015).

4.4.3. ACETOGÊNESE

A acetogênese é uma etapa crítica no processo de biodigestão anaeróbia, a qual é realizada por bactérias denominadas de acetogênicas. Suas reações são endotérmicas e permitem a absorção energética (FERREIRA, 2015; KUNZ *et al.*, 2019).

Esta etapa promove a relação de sintrofia (entropia negativa) entre as bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas, encontradas no processo da metanogênese, e as bactérias homoacetogênicas (FERREIRA, 2015; KUNZ *et al.*, 2019). A acetogênese consiste na transformação de ácidos de cadeia longa em ácidos de cadeia curta, contendo um ou dois átomos de carbono, sendo eles: o ácido fórmico e o acético, hidrogênio e CO_2 . A Equação 2 evidencia a relação de consumo de H_2 e CO_2 pelas bactérias homoacetogênicas demonstradas a partir de uma formulação química:



Este processo deve ser realizado para que as cadeias curtas de ácidos sejam termodinamicamente favoráveis e contribuindo com o consumo de hidrogênio gasoso pelas arqueas metanogênicas. A sintrofia realizada pelos grupos bacterianos permitem o crescimento e viabilizam a produção de acetato através de ácidos orgânicos (JUNQUEIRA, 2014).

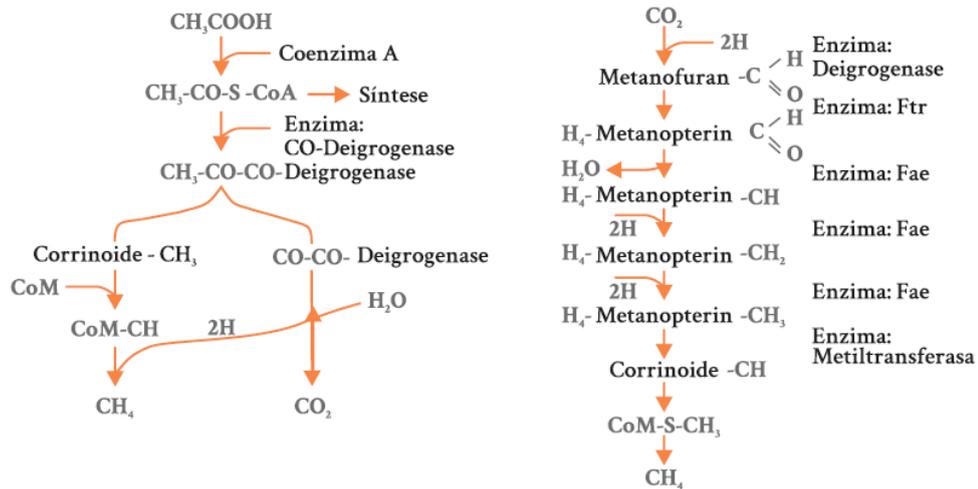
4.4.4. METANOGÊNESE

A metanogênese é um processo que se restringe a condições estritamente anaeróbias e costuma ser mais sensível dentre todas as demais fases. Neste momento, o carbono proveniente

da biomassa se transforma em CO_2 e CH_4 a partir das arqueas metanogênicas (KUNZ *et al.*, 2019).

Esses microrganismos processam a biomassa através de duas vias metabólicas, sendo: acetoclásticas e hidrogenotróficas. As acetoclásticas convertem o acetato (CH_3COOH) em CH_4 . Já as hidrogenotróficas, transformam H_2 e CO_2 em CH_4 . Essas reações ocorrem de maneira exotérmica, liberando energia e podem ser exemplificadas através da Figura 3 abaixo, possibilitando a observação dos caminhos metabólicos realizados até a geração de CH_4 (KUNZ *et al.*, 2019).

Figura 3: Rotas metabólicas para formação de metano.



Fonte: KUNZ *et al.*, 2009.

A imagem acima demonstra, com início na molécula CH_3COOH , a via metabólica acetoclástica e, iniciando em CO_2 , a via metabólica hidrogenotrófica.

Com relação a geração de CH_4 , existe a possibilidade de sua maior produção pelas arqueas metanogênicas acetoclásticas sendo, aproximadamente, 70% enquanto as arqueas metanogênicas hidrogenotróficas são capazes de gerar 30%. Em contrapartida, essa primeira é mais sensível à variação de pH e elevadas concentrações de NH_3 . Por este motivo, há predominância por parte das arqueas hidrogenotróficas (PORTES, 2005; FERREIRA, 2015; KUNZ *et al.*, 2019).

4.4.5. PARÂMETROS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO

A formação de biogás, bem como o processo de biodigestão anaeróbia para alcançar maiores eficiências, são dependentes de diversos fatores que, por sua vez, devem ser otimizados para maiores eficiências nos processos fermentativos. Esses parâmetros são:

- Temperatura;
- pH, alcalinidade e ácidos voláteis;
- Nutrientes;
- Nitrogênio amoniacal e amônia livre;
- Tempo de retenção hidráulica;
- Carga orgânica volumétrica;
- Agitação mecânica.

4.4.5.1. TEMPERATURA

Este parâmetro é de grande relevância para controle das propriedades físico-químicas dos componentes do substrato e influenciando, também, na velocidade de crescimento microbiano. Esses microrganismos podem ser classificados conforme a temperatura do ambiente, como:

- Termofílicos: Organismos que sobrevivem em temperaturas em torno de 60°C;
- Mesófilos: Temperaturas ótimas de 20°C até 40°C; e
- Psicrófilos: Temperaturas em torno de 10°C a 20°C.

Em virtude da sensibilidade dos microrganismos metanogênicos, é possível delimitar faixas ótimas de operação do reator, por exemplo, as bactérias acetoclásticas possuem maior sensibilidade com a elevação da temperatura. Ademais, a temperatura infere na pressão parcial de hidrogênio, desta maneira, influenciando na dinâmica populacional do biodigestor (CHERNICHARO, 1997; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

A elevação da temperatura pode beneficiar o biodigestor através da solubilização de compostos orgânicos, acelerando as reações bioquímicas. Também é capaz de eliminar possíveis patógenos. Porém, ela também é capaz de gerar efeito inibitório através da dissociação do NH_3 deslocando o equilíbrio químico do amônio (NH_4^+) para NH_3 , causando falência no processo devido a toxicidade da amônia livre para as arqueas metanogênicas a partir de

desequilíbrio iônico e/ou deficiência de potássio (K^+) (CHERNICHARO, 1997; KUNZ *et al.*, 2019).

Ainda assim, com a finalidade de evitar possíveis impactos negativos no biodigestor, é fundamental que não haja alterações bruscas no meio, elevando a temperatura em $2^\circ C$. Tornando-se de fundamental importância manter o controle da temperatura da biomassa para geração de biogás (KUNZ *et al.*, 2019).

4.4.5.2. pH, ALCALINIDADE E ÁCIDOS VOLÁTEIS

Assim como a temperatura, são existentes faixas ótimas de pH para cada tipo de microrganismo. As arqueas metanogênicas são sensíveis à variação de pH, atuando eficientemente em faixas entre 6,7 até 7,5 (pH próximo a neutralidade). Já as bactérias fermentativas são mais resistentes à variação de pH, tornando-as adaptáveis e atuantes em faixas de pH de 4,0 à 8,0, tendo como principais produtos o ácido acético e propiônico (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

Os ácidos voláteis são produzidos no decorrer da digestão anaeróbia diminuindo o pH e, por conseguinte, acidificando o meio reacional. Essa acidez pode ser acometida pelas atividades das arqueas metanogênicas que alcalinizam o meio através da produção de CO_2 , NH_3 e bicarbonato (HCO_3^-) (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

O sistema é regulado através da concentração de CO_2 , em fase gasosa, e HCO_3^- , em fase líquida. Para que haja o equilíbrio dos processos dentro do biodigestor, é necessário manter o CO_2 como gás, para não haver sua dissolução no meio reacional, conseqüentemente, não formando íons de hidrogênio. O controle dessa substância deve ser feito mantendo-se uma faixa de pH entre 6 e 7. Caso haja acidificação do meio baixando o pH para 4, haverá liberação excessiva de CO_2 . Já com sua alcalinidade elevada (pH 13), as moléculas de CO_2 estarão, majoritariamente, dissolvidas no substrato (KUNZ *et al.*, 2019).

Os problemas que envolvem a digestão anaeróbia estão atribuídos ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis (AOVs) causando a diminuição do pH e a inibição do crescimento das arqueas metanogênicas. Porém, este processo facilita o desenvolvimento de bactérias acidogênicas que contribuem ainda mais com a acidificação do meio e a maior concentração de AOVs (KUNZ *et al.*, 2019).

Para controle desse sistema, é possível observar a relação entre alcalinidade intermediária e alcalinidade parcial (AI/AP). O primeiro termo refere-se aos valores da alcalinidade pelo HCO_3^- e o segundo trata-se da alcalinidade proveniente dos ácidos voláteis (MÉZES *et al.*, 2011).

4.4.5.3. NUTRIENTES

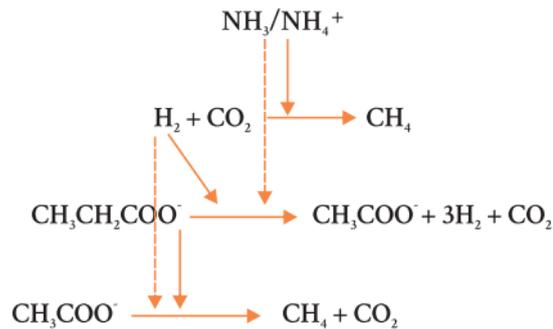
Para que haja o bom funcionamento do processo fermentativo dentro do reator, são necessários substratos que supram as demandas de nutrientes das bactérias anaeróbias. Estas, por sua vez, necessitam de nitrogênio, fósforo e enxofre. Além disso, para que haja desenvolvimento do processo digestivo, por meio de bactérias anaeróbias, demanda-se que concentrações equilibradas de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato. Ademais, para o crescimento celular são importantes elementos traços como: ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio (KUNZ *et al.*, 2019).

Contudo, são existentes substratos com nutrientes que podem ocasionar processos inibitórios, como é o caso do enxofre que em altas concentrações pode atribuir problemas no reator devido a capacidade de causar precipitação de nutrientes essenciais, como ferro, cobre, níquel entre outros, sendo insolúveis em baixos potenciais redox. Adicionalmente, os íons de metais pesados podem ocasionar inibições irreversíveis no desenvolvimento celular através de sua toxicidade (KUNZ *et al.*, 2019).

4.4.5.4. NITROGÊNIO AMONÍACAL E AMÔNIA LIVRE

Para que haja o desenvolvimento de bactérias anaeróbias é essencial que se obtenha NH_3 como nutriente, porém em elevadas concentrações acaba se tornando tóxico e inibindo o crescimento populacional no meio reacional. A fim de obter disponibilidade desse nutriente, deve-se realizar a fermentação de materiais que sejam ricos em uréia e proteínas. Entretanto, as condições de pH e temperatura no meio reacional inferem diretamente na produção de amônia livre, a qual é tóxica às arqueas metanogênicas devido sua facilidade em difundir-se através da membrana celular dos microrganismo. Na Figura 4, é possível observar a ação inibitória da amônia livre, tendo as linhas tracejadas como possível ação de inibição da reação e as linhas contínuas como inibição da reação (DE PRÁ *et al.* 2013; SILVA., 2014).

Figura 4: Esquema proposto para explicar a ação inibitória da amônia livre.



Fonte: Kunz *et al.*, 2019.

Para a eficiência do processo, os microrganismos que se encontram no meio reacional são obrigados a se adaptarem na presença de amônia livre. Isto é, ocorre a adaptação das espécies ao meio em que estão inseridos ou há seleção das populações de arqueas metanogênicas sobressaindo-se àquelas que se adequam às condições do reator (SILVA, 2014).

4.4.5.5. TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICA

Para que o biodigestor tenha plenitude em seu funcionamento, é necessário avaliar um parâmetro importante, sendo o Tempo de Retenção Hidráulico (TRH), que consiste em prescrever o tempo médio de permanência do substrato no interior do reator. Este é uma relação entre o volume útil do biodigestor e a vazão de alimentação (AMARAL *et al.*, 2004). Conforme evidenciado abaixo:

$$TRH = \frac{V_u}{Q_a} \quad (\text{Equação 3})$$

- Q_a – Vazão de alimentação diária do biodigestor ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$);
- V_u – Volume útil do biodigestor (m^3).

O TRH para biodigestores que são operados em faixas de temperatura mesofílicas, possuem variações entre 10 a 40 dias, e menores períodos de retenção caso sejam operados em faixas termofílicas.

Segundo Paterson (2010), há uma estreita relação entre o TRH e a taxa de carga orgânica no reator. Ao obter conhecimento do substrato inserido no sistema e este não possuir alterações, introduzindo quantidades ainda maiores fazem com que o TRH reduza. Assim, para manutenção do sistema, este parâmetro deve ser definido de modo que haja reabastecimento dos microrganismos, porém deve ser considerado que o baixo tempo de retenção farão com que os microrganismos não degradem o substrato e o rendimento do gás se torne insuficiente.

4.4.5.6. CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA

A Carga Orgânica Volumétrica (COV) é um parâmetro que representa a quantidade de insumo adicionado no biorreator, esta é quantificada em um determinado intervalo de tempo. A COV é uma relação entre a vazão de alimentação de substrato, a concentração de sólidos voláteis presentes no substrato sobre o volume útil do biodigestor (KUNZ *et al.*, 2019). Conforme evidenciado a seguir:

$$COV = \frac{Q_a \times S_v}{V_u} \quad (\text{Equação 4})$$

Esta métrica tem a capacidade de influenciar o desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia, ao ponto que para propiciar condições adequadas para os microrganismos encontrados no meio reacional, é necessário que haja ótimas COVs. Em contrapartida, suas baixas concentrações inferem em baixas relações alimento por microrganismo e, conseqüentemente, resultam em inibição ou diminuição das atividades biológicas. Porém, este parâmetro deve ser controlado rigorosamente, pois, com sua elevada concentração pode gerar acúmulo de ácidos voláteis e gerando falência no processo (KUNZ *et al.*, 2019).

4.4.5.7. AGITAÇÃO

No decorrer do processo da biodigestão, a agitação é fundamental, esta consiste na movimentação dos resíduos inseridos dentro do tanque, em formato líquido ou pastoso, por meio de mecanismos propulsores, como pás ou semelhantes, tendo como finalidade o facilitamento das realizações de reações químicas através da transferência de calor e de massa (SOUZA; JUNIOR; FERREIRA, 2005). Este parâmetro influencia na distribuição adequada de substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor (KUNZ *et al.*, 2019).

São existentes a agitação mecânica, a qual se preferencia pela utilização de motobombas

submersas com hélices, misturadores de eixo longo e misturadores em forma de pá horizontal; agitação hidráulica, que consiste na recirculação do interior do biodigestor através de bombas hidráulicas; e agitação pneumática, tendo a recirculação visando a homogeneização do substrato através de borbulhamento (*gas lift*) (SOUZA; JUNIOR; FERREIRA, 2005; KUNZ *et al.*, 2019).

4.5. LEGISLAÇÕES VIGENTES

No Estado de São Paulo são existentes leis que vigoram a favor da utilização de biomassa como fonte energética, devido suas características sustentáveis e de baixa emissão de carbono, conforme salientado pelo Decreto nº 58.869, de 4 dezembro de 2012, ao qual cita a inserção do Programa Paulista de Biogás, incentivando e impulsionando a participação de energias renováveis na matriz energética. Este decreto visa o estabelecimento e cumprimento das diretrizes aplicadas através da Lei nº 13.789/2009, instituindo a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC do Estado de São Paulo, tendo como objetivo realizar adaptações necessárias aos impactos provenientes das mudanças climáticas e a redução das emissões e concentrações de GEE na atmosfera, conforme citado no Artigo 2º.

Além disso, com a promulgação do Decreto nº 51.736, de 4 de abril de 2017, Art. 1º - fica instituída a criação de uma Comissão Especial de Bioenergia no Estado de São Paulo, tendo como atribuições, o desenvolvimento de cadeias produtivas, pesquisas científicas e tecnológicas, geração de energia, questões regulatórias, entre outros.

Estas questões regulatórias podem ser observadas a partir da Deliberação da Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (ARSESP) nº 744/2017, visando aumentar as participações das fontes renováveis, o estabelecimento de critérios de distribuição do Biometano na rede de gás canalizado, bem como a fiscalização de suas características atendendo as especificações de qualidade da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A fim de contribuir com a eficiência energética e diminuição da poluição atmosférica na comercialização e no uso de biocombustíveis, e também, com os mecanismos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), Lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017.

4.6. BIODIGESTOR

Biodigestor é um reator que tem como função propiciar um ambiente anaeróbio para que haja decomposição biológica de matéria orgânica, estabilizando-a e, a partir da fermentação proveniente do processo, sendo capaz de gerar biogás e digestato (CARVALHO, 2014; SILVA, 2016).

Essa tecnologia é favorável ao meio ambiente devido a uma série de vantagens, como a redução das emissões atmosféricas através da utilização do gás que é produzido como fonte energética, por exemplo. Suas vantagens estão correlacionadas a diminuição do endereçamento dos resíduos orgânicos para aterros sanitários, utilizando-o na produção de energia renovável e substituindo o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), sendo uma fonte combustível para geração de energia (diversificando a matriz energética), produção de biofertilizantes e, conseqüentemente, na redução de impactos ambientais. Todavia, os biodigestores contam com desvantagens, como o custo de sua instalação e implantação de sistemas, seu retorno de investimento podem ser de médio a longo prazo, são necessárias equipes capacitadas para operar o sistema e também contar com medidas preventivas, a fim de evitar acidentes (JUNQUEIRA, 2014; SILVA, 2016).

São existentes diversos tipos de biodigestores, cada um possuindo suas vantagens e desvantagens, e características próprias de operação. A partir das condições locais, tipo de substrato, relações de custo e benefício, é possível escolher o reator ideal, apesar de ambos terem o mesmo produto final, porém com eficiências distintas (SILVA, 2016).

4.6.1. TIPOS DE BIODIGESTORES

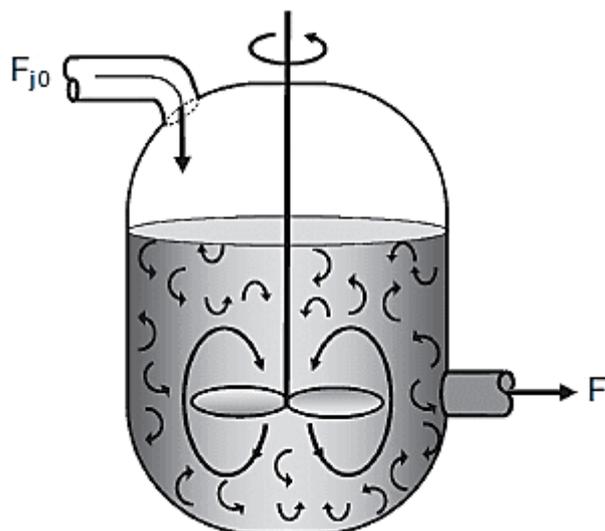
4.6.1.1. BIODIGESTOR BATELADA

O reator do tipo batelada tem como característica ter sua alimentação intermitente, inserindo o substrato e fechando-o, de maneira a ficar totalmente sem O₂ (ambiente anaeróbio), favorecendo a fermentação do material por microrganismos anaeróbios. Após esta etapa fermentativa, com a produção de biogás, o reator é aberto e são retirados os resíduos para, assim, iniciar o processo novamente (DEGANUTTI, 2002).

Estes reatores possuem fácil operação e necessitam, apenas, de uma carga inicial de resíduos para produção de biogás. Devido ao processo não ser contínuo, são aplicados em locais que haja sazonalidade de produção de biomassa, por exemplo, em produções agrícolas (soja,

milho e trigo, entre outras). Abaixo, na Figura 5, é possível visualizar o reator para melhor entendimento.

Figura 5: Imagem ilustrativa de reator batelada.



Fonte: Pires, 2019.

4.6.1.2. BIODIGESTOR CONTÍNUO

O reator contínuo tem como característica a produção de biogás e de biofertilizante enquanto há alimentação de substrato, sendo um processo incessante. Deste modo, os resíduos inseridos no biodigestor devem contribuir com fácil degradabilidade e serem abundantemente disponíveis para que não haja interferência em seu processo. Este reator conta com dutos de alimentação e, após a degradação dos resíduos, os gases obtidos são extraídos através de tubulações na parte superior do reator e o biofertilizante é removido nos dutos de saída (JUNQUEIRA, 2014; CARVALHO, 2014).

São existentes dois tipos de biodigestores contínuos, os horizontais e os verticais, conforme o posicionamento no solo. Além das subdivisões envolvendo outras classificações quanto ao modelo utilizado (CARVALHO, 2014).

Os biodigestores verticais, geralmente são aterrados, e possuem formato cilíndrico, tendo fluxo de alimentação ascendente ou descendente, dependendo da viabilidade a ser empregada. Caso seja ascendente, o reator é alimentado pela parte inferior e os gases produzidos

são capturados na parte superior. Já o reator de fluxo descendente é alimentado pela parte superior e os subprodutos obtidos são retirados pela parte inferior. Essas atribuições dos biodigestores devem-se ter cautela, devido à possibilidade de contaminação dos lençóis freáticos, visto que são aterrados em certa profundidade no solo (CARVALHO, 2014).

Os biodigestores contínuos horizontais, possuem como característica ter maior comprimento em relação a sua altura e contam com grande flexibilidade, assumindo qualquer forma em sua implementação. Podendo ou não serem submersos no solo e, desta forma, eliminando possíveis riscos de contaminação dos lençóis freáticos. É alimentado em suas extremidades, retirando-se do lado oposto ao da alimentação os produtos obtidos (gás natural, digestato e biofertilizante) (GASPAR, 2003; JUNQUEIRA, 2014; CARVALHO, 2014).

Existem diversos modelos de reatores de fluxo contínuos, os mais empregados são:

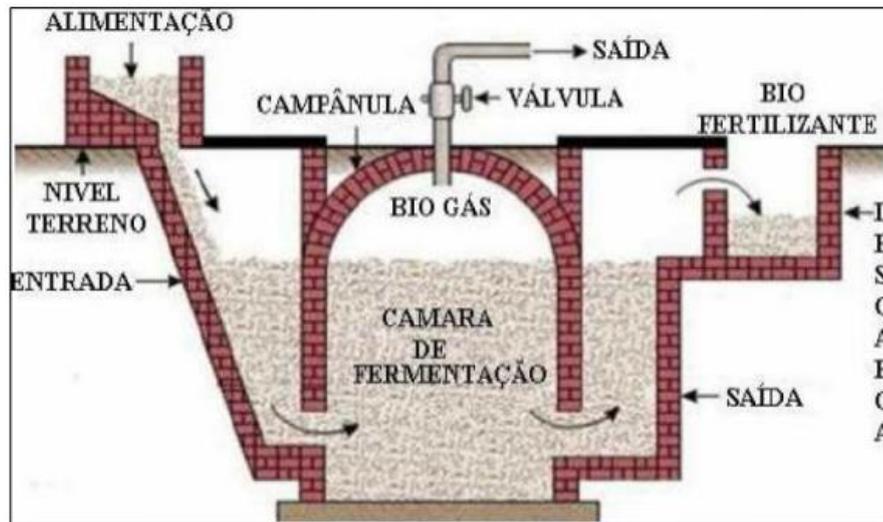
- Chinês;
- Indiano;
- Canadense.

4.6.1.3. BIODIGESTOR MODELO CHINÊS

O modelo chinês de biodigestor é construído a partir de uma câmara cilíndrica em alvenaria para fermentação, com teto impermeável (campânula), sendo destinado ao biogás. Em sua parte superior, possui tubulações de captação dos gases, os quais são controlados na saída dos mesmos a partir de uma válvula (MOTTA, 2012; JUNQUEIRA, 2014).

Este biodigestor tem como princípio a prensa hidráulica, o qual ao acumular gases em seu interior, existe uma pressão que resulta na movimentação do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em momentos de descompressão há deslocamento no sentido contrário (DEGANUTTI, 2002; JUNQUEIRA, 2014).

Segundo Deganutti (2022), devido aos materiais utilizados nesse modelo, sendo ele quase completamente de alvenaria, os custos relativos do biodigestor são menores dentre os demais. Porém, são necessários cuidados reforçados na vedação estrutural, para não obter vazamentos de gases. Ademais, para que haja redução da pressão interna pelos gases, estes são liberados para atmosfera e, por este motivo, não sendo possível sua utilização em instalações de grande porte, conforme observado na Figura 6, evidenciado abaixo:

Figura 6: Biodigestor modelo chinês.

Fonte: Fonseca et al. (2009)

4.6.1.4. BIODIGESTOR MODELO INDIANO

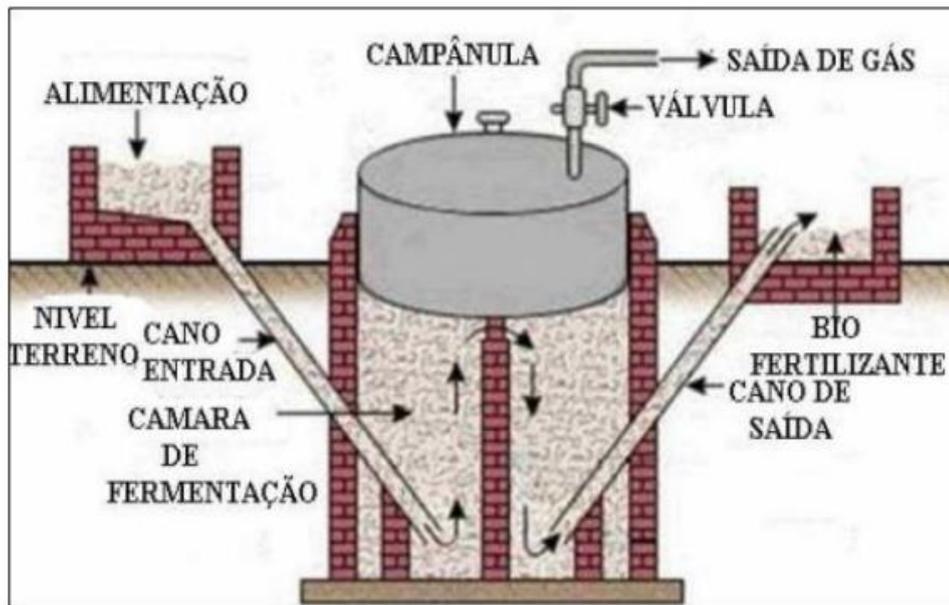
Esse tipo de biodigestor possui uma campânula flutuante como gasômetro, podendo estar inserida sobre a biomassa em fermentação ou em selo d'água externo, e obtêm uma parede central a qual subdivide o seu tanque em duas câmaras, tendo como função a movimentação do substrato de maneira homogênea em todo o interior do reator.

Este modelo opera em pressões constantes durante todo o processo fermentativo, à medida que o gás produzido não é consumido imediatamente, o gasômetro (encontrado na parte superior) se desloca, a fim de aumentar o volume no interior do reator (DEGANUTTI et. al., 2002).

É um modelo de fácil construção, porém o gasômetro por ser de metal, encarece os custos de sua instalação, podendo até mesmo inviabilizá-lo.

Para sua alimentação, os resíduos a serem inseridos devem apresentar uma concentração de Sólidos Totais (ST) inferior a 8%, facilitando a circulação do material no interior do biodigestor e favorecendo sua homogeneização, evitando entupimentos. Observa-se abaixo, na Figura 7, a configuração de um reator do tipo indiano (DEGANUTTI et. al., 2002; JUNQUEIRA, 2014):

Figura 7: Biodigestor tipo indiano.



Fonte: Fonseca et al. (2009).

4.6.1.5. BIODIGESTOR MODELO CANADENSE

O biodigestor tipo canadense, apesar de possuir aspectos construtivos simples relacionado aos supracitados, apresenta tecnologia mais avançada e complexa. Este modelo, também denominado de biodigestor de fluxo tubular, possui câmara de biodigestão escavada no solo e um gasômetro inflável de material plástico (lonado ou geomembrana), como evidenciado na Figura 8 (LUCAS JUNIOR; SOUZA, 2009; JUNQUEIRA, 2014; SILVA, 2016):

Figura 8: Representação do reator modelo canadense.



Fonte: Lima, 2020.

O biodigestor possui em seus aspectos construtivos uma caixa de entrada, feita de alvenaria, contendo a profundidade menor que sua largura (tornando a caixa de entrada mais rasa), a fim de evitar o entupimento no duto de entrada (JUNQUEIRA, 2014).

Durante o processo de fermentação e liberação do biogás, a cúpula de material flexível infla e acumula os gases e, posteriormente, acabam sendo retirados através de válvulas.

Este reator, devido sua facilidade na construção, utilizando majoritariamente materiais plásticos, é empregado em larga escala em propriedades rurais no Brasil. Porém, devido ao material utilizado, o reator está sujeito a complicações, como perfuração em sua cúpula e possibilitando vazamento de gás (JUNQUEIRA, 2014).

4.7. ECONOMIA CIRCULAR

Segundo Ellen Macarthur Foundation - EMF (2015), a Economia Circular (EC) modifica modelos lineares, constituídos pelo fluxo de produzir, distribuir, usar e dispor, em *loops* circulares. Tem-se como definição, sendo esta a mais aderida para EC, uma economia industrial restaurativa ou regenerativa por intenção e projeto (EMF, 2013) ou conceituada como a realização de circuito fechado do fluxo de material em todo o sistema econômico (GENG; DOBERSTEIN, 2008).

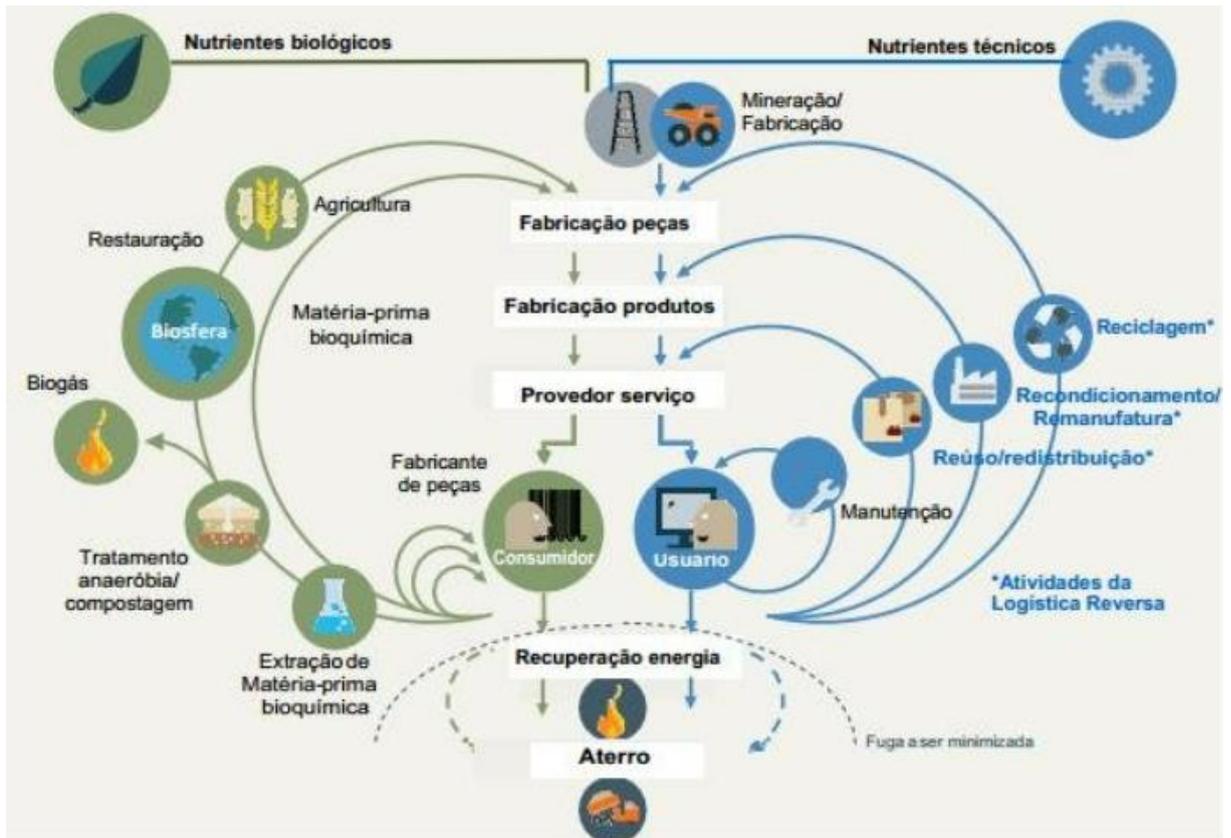
No contexto geral, a EC tem como princípio reduzir e otimizar o desenvolvimento dos produtos nas organizações. Baseando-se na capacidade de recuperação dos recursos locais, reutilizando-os novamente, ao invés de realizar a importação dos insumos e matérias-primas (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Para a efetividade do processo, é necessário que sejam alcançadas as três esferas do desenvolvimento sustentável, ou seja, o pilar econômico, ambiental e social (ZABANIOTON, 2018). Os principais valores atribuídos à EC são: gerenciar resíduos e poluição, manter produtos e materiais em uso, e regenerar ecossistemas. Estes estão vinculados ao seu conceito, remetendo a um sistema econômico que é atuante na transformação da interação da sociedade com a natureza, prevenindo o esgotamento dos recursos naturais, e fechando o ciclo de energia e materiais.

Na Figura 9, é evidenciado o diagrama sistêmico ao qual define o círculo de valor aplicado através da reconstituição do capital, distinguindo ciclos tecnológicos e biológicos. Nos

ciclos biológicos são projetados para ter retorno dos insumos ao processo produtivo através de tecnologias, como compostagem e biodigestão anaeróbia, e os ciclos técnicos, atuando na recuperação e restauração dos produtos através de estratégias de remanufatura, reciclagem, entre outros (EMF, 2019).

Figura 9: Diagrama sistêmico de aplicação da EC.



Fonte: Adaptado Ellen Macarthur Foundation, 2019.

A aplicação deste diagrama borboleta visa auxiliar as áreas da ciência que estudam sistemas produtivos, trazendo a compreensão de um modelo cíclico. Este apresenta entradas, saídas, interações com o meio ambiente e o retorno ao processo produtivo, demonstrando determinada parcela dos fluxos de materiais e energia, possibilitando a transformação da economia linear em circular (BARROS, 2019).

Para que seja possível avaliar a existência da possibilidade de inserção da circularidade nos processos produtivos a serem realizados, utiliza-se indicadores de circularidade. Os

indicadores devem ser de fácil compreensão e utilização, simplificando a comunicação de informações e sua eficácia deve estar alinhada aos valores do público-alvo (SICHE *et al.*, 2007). Assim, permitindo a realização do gerenciamento desse processo em termos de material e energia, em nível micro (organização, universidade, propriedade rural), nível meso (parque industrial e eco-indústria) e nível macro (regiões e cooperativas) (BARROS, 2019).

5. MÉTODO DE PESQUISA

Conforme Gil (2007), a pesquisa pode ser classificada por sua natureza como aplicada. Já desde o ponto de vista da abordagem do problema, pode ser classificada como qualitativa e quantitativa. A abordagem de seus objetivos pode ser classificada como exploratória. As técnicas usadas para desenvolver o trabalho foram a revisão bibliográfica exploratória, a pesquisa documental e a observação *in loco*.

Para a realização do trabalho foram usadas 4 etapas principais, sendo que a primeira etapa foi baseada na revisão exploratória da literatura sobre temas relacionados com biogás, ferramentas ambientais, econômicas e técnicas para usos em análise de viabilidade. Já na segunda etapa foi realizado o diagnóstico dos resíduos gerados no Restaurante Universitário (RU) do *campus* Lagoa do Sino. Para isso foram consultados os números de pessoas entre estudantes, terceirizados e servidores (docentes, estagiários e técnicos) no ano 2019, por se entender que este seria o cenário normal do *campus* antes da pandemia causada pelo COVID-19. Já para realizar o cálculo dos resíduos orgânicos gerados foram usados dados identificados na literatura. Esta alternativa foi adotada pela impossibilidade de poder fazer uma amostra real dos resíduos orgânicos gerados no RU do *campus*, pois atualmente o ano letivo está sendo realizado no formato Ensino Não Presencial Emergencial (ENPE).

Na terceira e quarta etapa foram realizadas a viabilidade técnica, ambiental e econômica para a produção do biogás no campus. Para isso, nos seguintes itens são apresentadas as informações adotadas para realizar isto.

5.1. VIABILIDADE TÉCNICA

Para este projeto foi efetuado o dimensionamento do biodigestor modelo canadense, de fluxo contínuo, em razão da alimentação diária de resíduos orgânicos. Considerou-se dois cenários distintos: o primeiro cenário, contou com a utilização de restos alimentares do RU, como fonte de matéria orgânica para geração de CH₄ e a autossuficiência do local ao longo do

tempo, através da substituição do GLP por Biogás; e o segundo cenário, refere-se ao aproveitamento de resíduos alimentícios visando a geração de energia elétrica e sua utilização na UFSCar *Campus Lagoa do Sino*.

As vazões obtidas tiveram como base os dados do número de pessoas (alunos, professores e funcionários da universidade). Para este, foi considerado apenas o intervalo do almoço para obtenção da viabilidade de implantação do biodigestor. Além disso, o levantamento da quantidade de alimentos a serem descartados após cada refeição (resíduos.refeição⁻¹) foi baseado em valores encontrados em estudos e artigos científicos.

O desenvolvimento das equações demonstradas no decorrer do trabalho foram sequenciadas por ordem de aplicação no dimensionamento do biodigestor modelo canadense.

Desta forma, para o dimensionamento do volume útil do biodigestor, foi necessário ter conhecimento da Vazão de Alimentação (Q_a), evidenciada nas Equação 5 abaixo (MACEDO, 2013):

$$Q_a = \frac{m_p \times n_p}{\rho_a} \quad (\text{Equação 5})$$

- m_p – sobras alimentares despejadas por pessoa (kg.pessoa⁻¹);
- n_p – número de pessoas por dia no RU (pessoa.dia⁻¹);
- ρ – massa específica de restos alimentares (kg.m⁻³).

A partir da vazão de alimentação diária gerada, é possível obter o Volume Útil (V_u) do biodigestor relacionando-o ao Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), sendo o período de tempo que o substrato manteve-se dentro do fermentador gerando seus processos biodegradáveis, conforme demonstrado na Equação 6 a seguir (MACEDO, 2013):

$$V_u = Q_a \times TRH \quad (\text{Equação 6})$$

Através do V_u foi possível obter a carga de DQO convertida em CH_4 (K_{DQO}), esta é uma relação entre a vazão de alimentação do substrato utilizado, da diferença de concentração da DQO do afluente (S_0) e do DQO de efluente (S), e do coeficiente de produção dos sólidos no sistema (Y_{obs}), conforme encontrado na Equação 7 abaixo (CHERNICHARO, 1997):

$$DQO_{CH_4} = Q_a \times (S_0 - S) - Y_{obs} \times Q_a \times S_0 \quad (\text{Equação 7})$$

Segundo Chernicharo (1997), o Y_{obs} possui uma faixa de aplicação entre 0,11 a 0,23 kg DQO_{lodo} . kg DQO_{afl}^{-1} .

Através da conversão da carga orgânica introduzida no reator anaeróbio em CH_4 e a fim de otimizar os resultados, utilizou-se o fator de correção para temperatura operacional do biodigestor ($f(T)$) e a própria DQO convertida em CH_4 , como demonstrado a seguir na Equação 8 (CHERNICHARO, 1997).

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que,

$$f(T) = \frac{P \times K_{DQO}}{R \times (273 - Tr)} \quad (\text{Equação 9})$$

- P – Pressão atmosférica (atm);
- Tr – Temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$);
- R – Constante dos gases perfeitos (atm.L/mol.K);
- K_{DQO} - DQO correspondente por mol de CH_4 ($DQO \cdot mol^{-1}$).

Ademais, para a eficiência de biodegradação da matéria orgânica inserida no reator foi necessário realizar o seguinte cálculo, conforme exposto na Equação 10 a seguir (DAL MAGO, 2009):

$$E\% = \frac{S - S_0}{S} \quad (\text{Equação 10})$$

Para os valores dos aspectos construtivos para o dimensionamento do biodigestor. Desta forma, a fim de dimensionar a caixa trapezoidal da lagoa coberta, onde fica alocado o lodo biológico, foram utilizadas relações trigonométricas para obtenção da área transversal da fossa, conforme evidenciado na Equação 11 a seguir (ALVES, 2017):

$$A_f = \frac{(a+b) \times h}{2} \quad (\text{Equação 11})$$

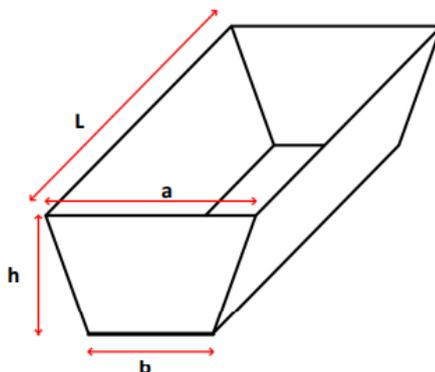
- A_f - Área transversal da caixa trapezoidal (m^2);
- a - Base maior da caixa trapezoidal (m);
- b - Base menor da caixa trapezoidal (m);
- h - Altura da caixa trapezoidal (m).

No comprimento da caixa trapezoidal (L) adotou-se uma relação de 5:1 entre o comprimento e o da base maior (a), conforme demonstrado na Equação 12 (ALVES, 2017):

$$L = a \times 5 \quad (\text{Equação 12})$$

Considerando as equações demonstradas acima, é possível estimar as dimensões da caixa trapezoidal. Abaixo é demonstrada na Figura 10, uma ilustração a fim de facilitar o entendimento dos coeficientes supracitados (ALVES, 2017):

Figura 10: Imagem ilustrativa de uma caixa trapezoidal destinada ao biodigestor e suas dimensões.



Fonte: Alves, 2017.

Segundo Ribeiro (2011), para efetuar o dimensionamento da campânula adotou-se que o volume a ser considerado da caixa trapezoidal seja de 60% do volume total, para que o sistema não entre em colapso, abrangendo somente os produtos sólidos e líquidos. Desta maneira, para os produtos gasosos foi necessário calcular os 40% restantes, conforme demonstrado a seguir:

$$V_{gás} = \left(\frac{V_u}{0,6}\right) \times 0,4 \times 100\% \quad (\text{Equação 12})$$

Em que $V_{gás}$ é o volume destinado ao gás na campânula em m^3 .

Ademais, foram considerados os cálculos da caixa de entrada e de saída dos resíduos. O volume da caixa de entrada (V_{ce}) é equivalente ao valor adicionado de 20% a mais que o obtido na vazão de alimentação e o volume da caixa de saída (V_{cs}) é três vezes maior que o V_{ce} . Além disso, foi necessário definir a profundidade (h_{ces}) de ambas em 1 metro, com a finalidade de facilitar os cálculos efetuados, como demonstrado na Equação 13 e 14 a seguir (ALVES, 2017):

$$V_{ce} = V_u \times 120\% \quad (\text{Equação 13})$$

$$V_{cs} = 3 \times V_{ce} \quad (\text{Equação 14})$$

Em conjunto ao dimensionamento dos aspectos construtivos do biodigestor, para incrementar os cálculos financeiros adiante, foram inseridos como elementos complementares os cálculos para obtenção do tamanho da lona de impermeabilização (L_i) e da lona da cúpula do gasômetro (L_c), em m^2 (ALVES, 2017).

$$L_i = (L \times b) + (2 \times L \times h) + (2 \times L) + (2 \times a \times h) + (2 \times a) + 4 \quad (\text{Equação 15})$$

$$L_v = (h \times a \times b) + (h \times a) + (h \times b) + h \quad (\text{Equação 16})$$

As larguras das caixas, as quais possuem geometria plana e quadrada, foi necessário calcular a raiz quadrada dos respectivos volumes, evidenciados anteriormente nas equações 13 e 14, conforme exposto nas equações a seguir (ALVES, 2017).

$$L_{ce} = \sqrt{V_{ce}} \quad (\text{Equação 17})$$

$$L_{cs} = \sqrt{V_{cs}} \quad (\text{Equação 18})$$

Para avaliar a viabilidade na substituição do GLP para o biogás no RU, se faz necessário obter uma equivalência calorífica em relação à ambos. Para isso, foi considerado o Poder Calorífico (PC), tanto do botijão de GLP (P-13), quanto na obtenção do biogás. Sabe-se que o gás de cozinha possui PC igual a $11.750 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e o biogás possui valores entre 5.000 a $7.000 \text{ kcal.m}^{-3}$. Além disso, tem-se que o botijão possui 13 kg de GLP em seu interior (OLIVER *et al.*, 2008).

Para calcular a equivalência destes gases, foi efetuada a seguinte sequência de equações (OLIVER *et al.*, 2008):

$$Q_{biogás} = 30 \times Q_a \times PC_{biogás} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde,

- $Q_{\text{biogás}}$ - Poder calorífico obtido através da produção mensal de biogás (Kcal/mês);
- $PC_{\text{biogás}}$ - Poder calorífico do biogás (kcal.m^{-3}).

O valor obtido será referente a produção mensal de biogás, considerando 30 dias no mês.

Oliver *et al* (2008), menciona a relação entre a massa contida no botijão de GLP com o seu PC é de, aproximadamente, 152.750 Kcal. Desta forma, é possível calcular o equivalente de biogás em comparação com o GLP, conforme exposto na Equação 20:

$$Eq_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{biogás}}}{152.750} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde $Eq_{\text{biogás}}$ é o equivalente do biogás em relação ao número de botijões de 13 kg de GLP no mês, em botijão.mês⁻¹.

Já na viabilidade energética foi necessário calcular a quantidade de energia gerada, a partir da produção de CH₄. Isto é possível através da relação entre o potencial de geração de energia elétrica do CH₄ (P_{em}), em kwh.m^{-3} , e a produção diária do gás no biodigestor ($\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$), evidenciado abaixo (MACEDO, 2013):

$$E_{met} = P_{em} \times Q_a \quad (\text{Equação 21})$$

Onde E_{met} é a energia gerada proveniente do CH₄.

Ainda assim, considerando a eficiência máxima de 38% dos sistemas de conversão para cogeração, é obtido conforme demonstrado na Equação 22 (MACEDO, 2013).

$$E_c = E_{met} \times N\% \quad (\text{Equação 22})$$

Onde E_c é a energia real gerada proveniente de resíduos orgânicos após o processamento em sistemas de cogeração e $N\%$ é a eficiência do motogerador.

Além disso, para que seja possível avaliar economicamente o valor a ser gerado é necessário relacionar as tarifas de energia (T_r) ao obtido com o E_c (MACEDO, 2013).

$$V_{ger} = E_c \times T_r \quad (\text{Equação 23})$$

- V_{ger} - Valor de geração de energia elétrica através do CH_4 (R\$.dia⁻¹).

Segundo Sganzerla (1983) e Machado (2013), para o cálculo de custos evitados foi feita uma estimativa de geração de biofertilizante, utilizando as concentrações produzidas ao final da biodigestão nos reatores dos principais componentes obtidos, sendo o Nitrogênio (N), Potássio (K) e o Fósforo (P), considerando as concentrações 0,0047 kg.L⁻¹, 0,0018 kg.L⁻¹ e 0,005 kg.L⁻¹, respectivamente. Através dessas informações realizou-se os seguintes cálculos:

$$P_{bio} = Q_a \times (N + K + P) \quad (\text{Equação 24})$$

Onde,

- P_{bio} - Potencial diário de produção de biofertilizante (kg).

A fim de obter valores palpáveis de receita, a partir do biofertilizante realizou-se um levantamento de mercado para aquisição do preço médio dos biofertilizantes para, assim, ter conhecimento do quanto, em reais, é produzido desse produto no biodigestor, conforme segue abaixo (ALVES, 2017):

$$C_{bio} = P_{bio} \times P_{merc} \quad (\text{Equação 25})$$

Onde,

- C_{bio} - Custo evitado de biofertilizante (R\$);
- P_{merc} - Preço médio de biofertilizantes (R\$.kg⁻¹).

5.2. ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL

A partir do levantamento de dados referentes à quantidade de resíduos gerados no RU do *Campus* Lagoa do Sino, foram realizadas análises comparativas quanto à circularidade dos processos desenvolvidos e a mitigação referente a disposição final desses resíduos em aterros sanitários, em relação a sua revalorização através da geração de energia renovável, de maneira qualitativa. Ademais, foram avaliados os possíveis impactos ambientais positivos e negativos capazes de serem gerados devido a construção do biodigestor anaeróbico.

Além disso, foram avaliadas as contribuições que essas tecnologias tem para com a EC, realizando uma comparação com os princípios de circularidade e a capacidade que este possui de empregabilidade na universidade. Esta avaliação consiste nos seguintes princípios, anteriormente apresentados (EMF, 2019):

- Eliminar resíduos e poluição desde o princípio;
- Manter produtos e materiais em uso;
- Regenerar sistemas naturais.

5.3. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para realizar a viabilidade econômica da implantação de biodigestores, no *Campus* UFSCar Lagoa do Sino, foi realizada uma investigação de custos obtidos no desenvolvimento do projeto, quanto a sua instalação, traçando base de cálculos financeiros dos equipamentos a serem utilizados, como materiais, máquinas, montagem, transporte e operação, compreendendo custos fixos e variáveis ao longo do tempo, como a manutenção do equipamento e mão de obra.

Além disso, foram analisados indicadores econômicos para favorecer a tomada de decisão quanto à implementação do biodigestor. Inicialmente, deve-se determinar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), consistindo na taxa de desconto mínima que torna o investimento atrativo ao investidor, considera-se fatores de tempo de investimento, riscos e a Taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e Custódia), devido a sua influência nas taxas de juros do país. A TMA consiste na avaliação de elementos, como o custo de oportunidade, risco do negócio e a sua liquidez. Para obter conclusões sobre a atratividade do negócio deve-se avaliar comparativamente a Taxa Interna de Retorno (TIR) em relação à TMA, se aquele superar este, então a rentabilidade do projeto é superior ao referencial obtido (LIMA, 2013; NOGUEIRA, 2019).

Complementarmente, para uma análise inicial avaliou-se o Valor Presente Líquido (VPL), que é calculado a partir do somatório das entradas do fluxo de caixa menos o investimento inicial. Este indicador possui como objetivo o cálculo de possíveis eventos futuros em uma alternativa de investimento, quando seu valor for positivo, o mesmo terá retornos favoráveis e alta viabilidade de implementação. O VPL pode ser demonstrado a partir da Equação 26 (NOGUEIRA, 2019):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (\text{Equação 26})$$

- FC_0 – Investimento inicial do projeto;
- FC_t – Fluxo de caixa no período de tempo (t);
- n – Número de períodos analisados;
- i – Taxa mínima de atratividade.

Caso o VPL seja positivo, será um projeto considerado aceito, se o VPL for negativo, será recusado (LIMA, 2013; NOGUEIRA, 2019).

O TIR é um índice que indica a aceitabilidade do investimento, desta forma, analisando o fluxo de caixa do projeto e anulando o VPL através da taxa (K), caso o valor deste seja nulo. O TIR é calculado da seguinte maneira:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} - FC_0 \quad (\text{Equação 27})$$

A aceitação de um projeto utilizando o TIR, necessita da análise dos seguintes critérios:

- $TIR > TMA$, o projeto é viável;
- $TIR < TMA$, o projeto é inviável.

Ainda, como indicador de análise financeira, tem-se o *Payback*, sendo uma forma mais ágil de obtenção da avaliação dos fluxos de caixa do investidor. São existentes dois modos de cálculo para o retorno do investimento, o *Payback* simples, não considerando a taxa de juros, e o *Payback* descontado, sendo o mais adequado para grandes projetos devido a consideração de taxa de juros, minimizando riscos e sendo mais assertivo. Este método refere-se ao tempo necessário de retorno do resultado econômico descontado pela TMA. Expresso da seguinte maneira (LIMA, 2013; NOGUEIRA, 2019):

$$n_i = \frac{\log \log \frac{P_{mt}}{P_{mt} - V_p \cdot i}}{\log \log (1+i)} \quad (\text{Equação 28})$$

- n_i – Tempo de recuperação de capital investido (anos);
- P_{mt} – Valor do pagamento periódico;
- V_p – Valor presente;
- i – Taxa de pagamento.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

O dimensionamento do biodigestor contou com a análise de dois cenários distintos. Inicialmente, foi feita a averiguação da viabilidade de implantação dessa tecnologia para os resíduos provenientes do RU, a fim de gerar autonomia energética para o mesmo, além de avaliar as vantagens ambientais e econômicas que essa tecnologia pode trazer para o *Campus* Lagoa do Sino e para a própria natureza, através da circularidade dos processos que são provenientes desse tipo de tratamento de resíduos, bem como dos produtos que são gerados e a possibilidade de substituição do GLP, utilizado na cozinha do RU, por Biogás. Já para o outro cenário, considerou-se a geração do CH₄, visando a geração de energia elétrica a partir dos resíduos gerados no RU em conjunto com os demais itens supracitados.

Os parâmetros utilizados, tendo como base dados secundários selecionados em artigos científicos, encontram-se expostos na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3: Parâmetros utilizados no desenvolvimento dos cálculos da produção de CH₄.

Parâmetros	Valor adotado
TRH	Tempo de retenção hidráulica 20 dias
n _p	Número de pessoas por dia no RU 1120 pessoas
E%	Eficiência de remoção de DQO 92%
Y _{obs}	Coefficiente de produção dos sólidos no sistema 0,11 kg SST . kg DQO _{apl} ⁻¹
S ₀	Concentração de Sólidos Voláteis no Efluente 55 kg.m ⁻³

Fonte: Autoria própria, 2022.

O número de comensais relaciona-se ao somatório de 960 alunos, 70 professores, 44 técnicos administrativos, 18 estagiários e 28 terceirizados.

Com base nos parâmetros supracitados e a relação entre n_p, m_p e a densidade das sobras descartadas dos alimentos permitiram os seguintes resultados para vazão de alimentação (Q_a), demonstrado na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Valores obtidos de vazão de alimentação com resíduos provenientes do RU.

Descrição	Resultado
Q _a	0,20 m ³ .dia ⁻¹

Fonte: Autoria própria, 2022.

Para obtenção dos valores acima, considerou-se que os resíduos de alimentos descartados tinham peso específico (ρ) de 897 kg.m⁻³ e que foi desperdiçado 0,164 kg por refeição, obedecendo valores sugeridos pelo estudo de Gomes (2014).

Ademais, o desenvolvimento do volume útil do biodigestor foi feito a partir da relação entre a vazão de alimentação a ser gerada pelo RU e o TRH. Abaixo é evidenciado o volume do biodigestor (Tabela 5).

Tabela 5: Resultados do volume útil do biodigestor baseando-se nos resíduos descartados.

Descrição	Resultado
V_u	4,09 m ³

Fonte: Autoria própria, 2022.

Através da vazão de alimentação e utilizando cargas ótimas de concentração de substrato no afluente, conforme salientado na Tabela 3, foi possível gerar as seguintes cargas convertidas em CH₄ e seus respectivos fatores de correção devido a temperatura operacional, expostos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados do fator de temperatura operacional do biodigestor e da carga de DQO convertida em CH₄.

Item	Descrição	Resultados
1	f(T)	3,17 kgDQO . m ⁻³
2	K _{DQO}	9,12 kgDQO _{CH₄} . m ⁻³

Fonte: Autoria própria, 2022.

Desta maneira, para a produção diária de CH₄, utilizou-se temperaturas mesofílicas, fixadas em 27 °C, visando o melhor desempenho dos microrganismos fermentadores. Então, encontrou-se valores otimizados e, conseqüentemente, uma maior eficiência na produção de CH₄.

Ademais, com os resultados obtidos e expostos na Tabela 6, encontrou-se a estimativa da geração de CH₄ por dia, utilizando o respectivo fator de correção de temperatura operacional.

Tabela 7: Resultado de geração de CH₄ diária utilizando o fator de correção da temperatura operacional.

Descrição	Resultados
Q _{CH₄}	2,88 m ³ .dia ⁻¹

Fonte: Aatoria própria, 2022.

O volume útil do biodigestor serviu como base para o dimensionamento dos aspectos construtivos da caixa trapezoidal, denominado como fossa. Ademais, foram calculadas as variáveis independentes da estrutura, sendo elas a base maior (a) e a base menor (b) do trapézio e sua altura (h). Desta forma, obteve-se os seguintes resultados (Tabela 8).

Tabela 8: Variáveis dependentes e independentes dos aspectos construtivos da caixa trapezoidal.

Descrição	Resultados
a	1,11 m
b	0,38 m
h	1,00 m
L	5,53 m
A _f	0,74 m ²

Fonte: Aatoria própria, 2022.

O valor do volume útil obtido com os cálculos para o dimensionamento do biodigestor, considera apenas 60% do seu volume total, sendo apenas a fossa. Para que não haja complicações na campânula, onde ficam armazenados os gases após o processo fermentativo,

é necessário destinar ao menos 40% do volume total do biodigestor (RIBEIRO, 2011). Desta maneira, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Resultado do dimensionamento dos aspectos construtivos dos biodigestores.

Descrição	Resultados
A_{total}	1,24 m ²
A_g	0,49 m ²
V_g	2,73 m ³

Fonte: Autoria própria, 2022.

Além disso, com esses valores foi possível dimensionar as caixas de entrada e saída dos resíduos no biodigestor. Foi fixada a profundidade de ambas as caixas em um metro e adotada geometria quadrada, a fim de facilitar os cálculos. Desta forma, obteve-se os seguintes resultados, na Tabela 10.

Tabela 10: Dimensionamento das caixas de entrada e saída do biodigestor.

Descrição	Resultados
V_{ce}	0,25 m ³
V_{cs}	0,74 m ³
L_{ce}	0,50 m
L_{cs}	0,86 m

Fonte: Autoria própria, 2022.

Ademais, para que não haja percolação de resíduos líquidos no solo, atingindo lençóis freáticos, e liberação de gases na atmosfera, foi necessário incrementar nos custos a obtenção de geomembranas ou lonas plásticas para vedação e impermeabilização do reator. Portanto, para a lona de impermeabilização e de vedação obteve-se os seguintes resultados, na Tabela 11:

Tabela 11: Dimensionamento das lonas de impermeabilização e vedação.

Descrição	Resultados
L_i	32,61 m ²
L_v	2,90 m ²

Fonte: Aatoria própria, 2022.

Utilizando os valores de Q_a , em ambos os cenários, foi possível gerar a equivalência a partir do poder calorífico entre o biogás e o GLP. Para este projeto, foi considerado parâmetros otimizados, visando a maior obtenção de biogás, contendo o maior percentual de CH₄ e influenciando positivamente em seu poder calorífico. Desta forma, utilizou-se para os cálculos o valor de 7.000 Kcal.m⁻³ e obteve-se os seguintes resultados, conforme demonstrado na Tabela 10 abaixo:

Tabela 12: Poder calorífico mensal e equivalência de biogás em relação ao número de botijões de GLP.

Descrição	Resultados
$Q_{\text{biogás}}$	604.259 Kcal.mês ⁻¹
$Eq_{\text{biogás}}$	3,96 Botijão.mês ⁻¹

Fonte: Aatoria própria, 2022.

Portanto, através do tratamento dos resíduos orgânicos utilizando biodigestores anaeróbios, é possível obter a quantidade de biogás referente a 3,96 botijões de GLP.

Segundo a CNN Brasil (2022), os valores médios de botijão de GLP no Brasil, se encontram a R\$ 102,40, em fevereiro de 2022. Em virtude disso, houve uma contribuição com a redução de custo em R\$ 405,08 ao mês.

Além dos aspectos construtivos e do comparativo entre o GLP e o biogás, para garantir maior autonomia energética e econômica para o *Campus* Lagoa do Sino utilizando o biodigestor, foi feito um estudo, sendo baseado em dados secundários, e foram analisadas as gerações de biofertilizantes e a possível produção de energia elétrica.

Inicialmente, foi feito um estudo hipotético focado na possibilidade de geração de biofertilizantes orgânicos através dos resíduos. Desta forma, para analisar quanto de biofertilizante foi gerado, considerando as concentrações contidas de cada nutriente, após a estabilização do digestato, e qual a capacidade de geração de receita (em reais) do mesmo, em relação a sua geração diária. A seguir, foram expostos na Tabela 13 os seguintes resultados (ALVES, 2017).

Tabela 13: Produção de biofertilizante e receita obtida com a sua venda.

Descrição	Resultados
P_{bio}	1,43 kg.dia ⁻¹
V_{bio}	R\$ 13,19

Fonte: Aatoria própria, 2022.

Para constituir o valor de venda do biofertilizante (V_{bio}), realizou-se uma média de valores dos fertilizantes convencionais mineralizados encontrados no mercado, sendo avaliado em aproximadamente R\$9,20, e através desse valor, multiplicando o quanto foi gerado com o preço médio do produto, obteve-se R\$13,19 por dia. Desta forma, a receita pode ser revertida de maneira positiva para o *Campus* Lagoa do Sino, considerando que o mesmo pode se tornar um produto provindo de resíduos e conta com a possibilidade de ser comercializado, e ainda de utilizá-lo nos espaços que possuam vegetação, por exemplo, no Sistema Agroflorestal (SAF) da Universidade e em suas áreas comuns.

Em conjunto com o biofertilizante, há a possibilidade de geração de energia elétrica, constituindo mais uma fonte de receita para a Universidade, esta considera o quanto foi gerado de biogás sendo convertido em eletricidade. Para isso, foram consideradas as tarifas médias da concessionária de energia CPFL para obtenção do preço a ser abatido ao final do mês, atribuindo valores tarifários de R\$0,94 por Kwh.

O potencial energético produzido pelo CH₄, se encontra em uma faixa entre 6,25 a 10 kwh.m⁻³, para este cálculo considerou valores ótimos a serem obtidos, então foi utilizado 10 kwh.m⁻³ (COELHO et al., 2016). Ainda assim, para geração real de eletricidade, é necessário utilizar uma máquina de conversão de energia em sistemas de cogeração, esta possibilita uma eficiência máxima de conversão de 38%, reduzindo a geração de energia elétrica, conforme evidenciado na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14: Geração de energia elétrica proveniente do CH₄ e seu respectivo preço.

Item	Descrição	Resultados
V _{ger}	Valor de geração de energia elétrica por dia	28,77 kwh.dia ⁻¹
E _{real}	Valor de geração de energia elétrica após conversão em sistemas de cogeração	10,93 kwh.dia ⁻¹
V _{gerd}	Investimento obtido com a geração de energia elétrica por dia	10,28 R\$.dia ⁻¹

Fonte: Autoria própria, 2022.

Portanto, considerando os quantitativos de insumos orgânicos, obteve-se R\$10,28 por dia.

A viabilidade financeira para implantação do biodigestor no *Campus* Lagoa do Sino considera os custos do investimento inicial, obtidos na construção desta tecnologia, levando em consideração os materiais a serem utilizados e a mão-de-obra. Na Tabela 15 encontra-se uma ponderação de valores avaliados em R\$ por m³ do biodigestor, contemplando seus aspectos construtivos em geral (ALVES, 2017).

Tabela 15: Fator de investimento do biodigestor por m³.

Volume em m ³	Fator de Investimento por m ³
$0 < VF < 99$	R\$1.583,43
$100 < VF < 500$	R\$457,82
$501 < VF < 3.000$	R\$171,57

Fonte: Adaptado Alves, 2017.

Desta maneira, considerou que o custo para construção da caixa trapezoidal (fossa) teve um fator de investimento inicial de R\$1.583,43 devido ao volume útil dimensionado para o mesmo. Efetuando a relação entre o seu volume e o fator de investimento, foi obtido um custo inicial de R\$ 6.484,78. Além disso, considerou que para a realização da manutenção periódica anual do sistema (C_{mp}), seria necessário investir 10% do custo do investimento inicial e para a manutenção quinquenal (C_{mq}), a cada 5 anos, deve ser considerado um fator de correção de 1,395 e um investimento de 5% em relação ao gasto inicial. Os valores obtidos são demonstrados na Tabela 16, a seguir:

Tabela 16: Gastos iniciais com a construção dos biodigestores.

Descrição	Resultados
C_{inv}	R\$ 6.484,78
C_{mp}	R\$ 324,24
C_{mq}	R\$ 904,30

Fonte: Autoria própria, 2022.

Baseando-se nos custos iniciais e nas receitas que podem ser obtidas através dos produtos gerados no biodigestor, calculou-se o valor presente (VP) da implementação dessa

tecnologia, sendo o somatório do custo inicial de investimento, da manutenção quinquenal e da geomembrana a ser utilizada (impermeabilização e vedação).

Em suma, para contribuição no cálculo de *Payback* (Pbk), utilizou-se a série anualizada do fluxo de caixa (U), sendo a receita obtida através dos produtos gerados no biodigestor (biofertilizante, eletricidade e biogás), esses passíveis de venda ou de aproveitamento na própria universidade. Para o desenvolvimento dos cálculos efetuados foi considerada uma Taxa de Atratividade Mínima de 10%. Abaixo, foram expostos os valores obtidos para análise do retorno do investimento inicial, conforme demonstrado na Tabela 17 a seguir:

Tabela 17: Valores referentes ao retorno do investimento no biodigestor considerando a conversão do CH₄ em energia elétrica.

Descrição	Resultados
VP	R\$ 8.631,81
U	R\$ 7.965,87
Pbk	1,20 anos

Fonte: Autoria própria, 2022.

Com o volume inicial obtido através da inserção dos resíduos orgânicos, foi possível ter uma taxa de retorno do investimento, para a construção dos biodigestores, de 1,20 anos. Porém, a obtenção do retorno do investimento inicial está se baseando apenas na transformação do biogás em energia elétrica.

Desta forma, não permitindo a utilização do gás como fonte combustível, substituindo o GLP, na cozinha do RU. Para isto, é necessário desconsiderar a conversão da eletricidade e utilizar, apenas, o biogás no intuito de se tornar um combustível visando a combustão e uso na cozinha. Abaixo é evidenciado o *payback* para esta análise (Tabela 18).

Tabela 18: Valores obtidos para obtenção do retorno do investimento no biodigestor considerando a conversão do CH₄ em combustível na cozinha do RU.

Descrição	Resultados
VP	R\$ 8.631,81
U	R\$ 9.284,15
Pbk	1,02 anos

Fonte: Autoria própria, 2022.

Através desses valores, torna-se evidente o maior abatimento de custo em relação ao gasto inicial e, conseqüentemente, um *payback* menor, com apenas 1,02 anos para o cenário, o qual considera a utilização da substituição do GLP por Biogás. Sendo este, comparativamente, o melhor cenário a ser considerado, devido ao tempo de retorno deste ser 15% inferior ao obtido no cenário de utilização de biogás para geração de energia elétrica.

Além dos ganhos econômicos já supracitados, o biorreator anaeróbico contribui também com a EC, através do ciclo biológico, devido a este utilizar resíduos orgânicos para a produção de biogás e digestato. Desta forma, eliminando os resíduos e tornando-os em produtos valorizados no mercado, diminuindo a geração de poluentes desde o princípio das atividades, pois há possibilidade de substituição de insumos capazes de degradar o meio ambiente, como os combustíveis fósseis. Essa tecnologia mantém os produtos na cadeia produtiva por mais tempo, ao invés de descartá-los após sua utilização inicial, e permitindo que haja regeneração dos sistemas naturais devido aos aspectos orgânicos que lhes competem, por exemplo, como fonte de biofertilizantes, não afetando negativamente à biodiversidade, bem como, solo e lençóis freáticos

6.2. BENEFÍCIOS DA TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS ALIMENTARES EM COPRODUTOS

O transporte dos resíduos a serem gerados são destinados ao aterro sanitário, tendo como características a utilização de valas cavadas com solo compactado e sendo enterrado em células, localizado na Campina do Monte Alegre, em São Paulo, a 8,0 quilômetros da UFSCar Lagoa

do Sino. Este fator, torna-se quase que inviável ambientalmente, pois, apesar distância de locomoção, gerando liberação de CO₂ na atmosfera, e também deve-se considerar a compactação do solo no Aterro Controlado, sendo que os resíduos orgânicos são materiais putrescíveis e geram chorume em sua degradação, facilitando a percolação do mesmo no solo. Ainda assim, esta tecnologia não permite a drenagem dos líquidos gerados, bem como, dos gases produzidos, como o CH₄, tornando-os passíveis de liberação na atmosfera.

Por este motivo, o investimento em tecnologias que permitam a utilização da matéria orgânica, a qual seria descartada, como coproduto de suas atividades podem obter retornos significativos para o *Campus* Lagoa do Sino, quanto ao meio ambiente (GONDAK, 2019).

Inicialmente, haveria a possibilidade na valorização dos resíduos através da sua conversão em digestato, este sendo um produto da sua biodegradação, ao qual se encontra estabilizado e permite uma melhor utilização dos mesmos para a melhoria nas características do solo e na produção de culturas orgânicas, utilização em gramíneas nas áreas comuns ou em pesquisas nas produções agrícolas da Universidade (NICOLOSO *et al.*, 201-). Desta forma, além de diminuir o rastro da pegada de carbono, ele está possibilitando a diminuição na utilização de fertilizantes mineralizados favorecendo as condições do solo.

Além disso, a utilização de biodigestores anaeróbios, como fonte mitigadora de GEE, permite o reaproveitamento destes gases para geração de energia renovável e também é capaz de substituir a utilização de GLP consumido no RU, ou sendo utilizado como fonte de geração de energia elétrica para as atividades na universidade. Assim, tornando-se fonte primária de energia (combustível ou eletricidade), representando economia ambiental e financeira. Em razão disto, havendo uma diversificação na matriz energética, diminuindo a dependência (mesmo que em microescala) de energia proveniente de resíduos fósseis.

Este processo de biodigestão anaeróbia evidencia a inserção dos princípios de Economia Circular dentro da UFSCar *Campus* Lagoa do Sino, devido ao reaproveitamento dos resíduos que são provenientes do RU, tornando-os fontes de matéria-prima para outros processos que atribuam valor em sua geração. Por essa razão, o modelo empregado passa a divergir da linearidade, devido a atribuição de funções diferentes para esse produto, ao qual possui maiores iterações com a cadeia produtiva e não apenas tendo sua disposição final. Inicialmente, o resíduo seria fonte de receita para transportadores e destinadores, porém são gerados maiores ganhos e possibilidades ao considerar o resíduo orgânico como um produto. Desta forma, é capaz de observar a circularidade do processo de biodegradação anaeróbica, pois há a

transformação dos resíduos em produtos energéticos e orgânicos, além da realização, propriamente dita, do tratamento dos resíduos (GONDAK, 2019). Além disso, observando-se o diagrama borboleta apresentado no item 4.7 pode afirmar que a produção de biogás na UFSCar *Campus* Lagoa do Sino apoia o ciclo biológico trazendo a minimização da disposição e conseguindo a redução de GEE, especialmente o CH₄.

Ademais, este processo sendo realizado de maneira evidente em universidades, se tornam vetores de conhecimento de processos alternativos capazes de gerar o tratamento e utilização de subprodutos dos mesmos, de maneira a valorizá-los e quebrando o paradigma da linearidade da cadeia produtiva, desta forma, trazendo maior tempo de vida ao produto em si (por exemplo, alimentos que seriam descartados) e tornando-os capazes de substituir fontes primárias que possibilitem maiores degradações ao meio ambiente.

7. CONCLUSÃO

Apesar do custo de investimento inicial ser elevado, a tecnologia a ser desenvolvida na universidade pode gerar muitos ganhos econômicos, sociais e ambientais ao longo do tempo, devido ser uma tecnologia que gera produtos diversos e utiliza insumos que seriam, inicialmente, descartados.

Além de contribuir com a destinação ambientalmente correta desses resíduos, o *Campus* Lagoa do Sino obteria benefícios, como geração de digestato, para utilização em pesquisas, SAF e áreas comuns, e sua comercialização; geração de biogás, a fim de propiciar a substituição na utilização do GLP na cozinha do RU ou a geração de energia elétrica, sendo passível de abater custos com consumo de eletricidade. Desta forma, com a obtenção do valor de *payback* na geração de biogás como fonte de gás de cozinha, sendo de 1,02 anos, possibilitou a maior viabilidade de inserção para este cenário, ao invés da utilização de biogás para geração de energia elétrica, tendo o *payback* de 1,20 anos.

Vale ressaltar, que a utilização do biodigestor nos processos de reaproveitamento de resíduos sólidos, possibilita a integração do conceito de Economia Circular na Universidade, trazendo à tona a sustentabilidade como fonte de dispersão de conhecimentos no meio acadêmico e atribuindo ainda mais valor à sua utilização. Ainda assim, possibilita a valorização dos resíduos orgânicos, inserindo-os novamente na cadeia produtiva e retirando riscos sociais, devido a vetores de doenças, e ambientais, cujo, ambos os exemplos estão vinculados ao seu descarte inapropriado.

É necessário salientar que os estudos efetuados no desenvolvimento do projeto limitaram-se a utilização de dados secundários provenientes de artigos científicos relacionados ao assunto para realização do dimensionamento do biodigestor, sendo uma das dificuldades enfrentadas devido ao período pandêmico. Desta maneira, não foram possíveis as realizações de estudos práticos, como a construção dos biorreatores em escala de bancada e a possibilidade de obtenção de concentrações de resíduos que permitissem a otimização nos processos de fermentação, por conseguinte, maior geração de CH₄ através dos restos orgânicos provenientes do RU.

Para projetos futuros, será necessário realizar estudos detalhados e práticos que contemplem otimizações na mistura com diferentes concentrações de resíduos orgânicos, como provenientes do RU, resíduos de varrição, resíduos agrícolas, entre outros, buscando maior geração do CH₄; a construção de biodigestores em escala de bancada, avaliando as melhores dimensões a serem utilizadas e realizando comparações entre seus aspectos construtivos, observando os parâmetros que gerem maiores eficiências energética. Portanto, contribuindo com o melhor desenvolvimento e resultados a serem obtidos. Também há necessidade de avaliações mais detalhadas utilizando ferramentas como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), análise de fluxos de materiais empregados dentro da universidade e o uso de indicadores circulares, tanto qualitativos, quanto quantitativos.

8. REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR nº 10004, de 30 de novembro de 2004**. Resíduos Sólidos - Classificação. [S. l.], 30 nov. 2004. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 9 set. 2021.

ABRELPE (org.). **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2020**. São Paulo, SP: [s. n.], 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 1 out. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. [S. l.], 17 abr. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 9 set. 2021.

ANUFOODBRAZIL. **Desperdício de alimentos em restaurantes chega a seis mil toneladas no país**. Disponível em: <https://www.anufoodbrazil.com.br/2018/09/25/desperdicio-de-alimentos-em-restaurantes-chega-seis-mil-toneladas-no-pais/> Acesso em: 02 out. 2021.

ARANHA, Flávia Queiroga; GUSTAVO, Ana Flora Silva e. **AVALIAÇÃO DO**

DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS EM UMA UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO E NUTRIÇÃO NA CIDADE DE BOTUCATU, SP. Higiene Alimentar, Botucatu, SP, 2018. Disponível em: <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2018/04/882814/276-277-site-28-32.pdf>. Acesso em: 2 out. 2021.

ARSESP. DELIBERAÇÃO nº 744, de 26 de julho de 2017. **Dispõe sobre as condições de distribuição de Biometano na rede de gás canalizado no âmbito do Estado de São Paulo, e dá outras providências.** [S. l.], 26 jul. 2017. Disponível em: <http://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl7442017.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. DECRETO nº 58.659, de 4 de dezembro de 2012. **Institui o Programa Paulista de Biogás e dá providências correlatas.** [S. l.], 4 dez. 2012. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2012/decreto-58659-04.12.2012.html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

BARROS, MURILLO VETRONI. **FERRAMENTA PARA PROMOVER A ECONOMIA CIRCULAR EM PROPRIEDADES RURAIS.** 2019. Monografia (Mestrado) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR), [S. l.], 2019. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4283/1/PG_PPGEPI_M_Barros%2C%20Murillo%20Vetroni_2019.pdf. Acesso em: 23 fev. 2022.

BORGES, Iran; SILVA, André Guimarães Maciel e; ORZIL, Rodrigo. **Agronegócio da Ovinocultura.** 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267769611_AGRONEGOCIO_DA_OVINOCULTURA>. Acesso em: 21 fev. 2019.

CALDAS, Leonardo Araujo. **Perspectivas da substituição gradual de termelétricas a combustíveis fósseis por sistemas fotovoltaicos em microgeração distribuída.** 2017. Dissertação (Pós-graduação em Energias Renováveis) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/12709/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 9 set. 2021.

CASTRO, Fábio da Silveira. **Impacto das projeções de mudanças climáticas globais do IPCC no zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul.** Brazilian Journal of Development, CURITIBA, PR, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/10200/8521>. Acesso em: 9 set. 2021.

CARVALHO, A. **Modelação matemática do processo de digestão anaeróbia.** 2014. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2014. Disponível em: . Acesso em: 03 jan. 2022.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Segrac, 1997, v. 5. 245 p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, 379 p., 2007.

CNN BRASIL. **Preço do botijão de gás no Brasil tem alta de quase 50% em dois anos.** [S.

l.], 10 fev. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/preco-do-botijao-de-gas-no-brasil-tem-alta-de-quase-50-em-dois-anos/#:~:text=O%20pre%C3%A7o%20do%20g%C3%A1s%20de,no%20primeiro%20m%C3%AAAs%20de%202022>. Acesso em: 8 fev. 2022.

COELHO, Willian Leonardo Vieira et al. **ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NO ESTADO DE MATO GROSSO EM DIFERENTES CENÁRIOS PRODUTIVOS**. REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46305/pdf>. Acesso em: 11 fev. 2022.

DAL MAGO, A. **Avaliação de biodigestores com o uso de dejetos de suínos em Braço do Norte e em Concórdia**. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

DE PRÁ, M. C. et al. **Simultaneous removal of TOC and TSS in swine wastewater using the partial nitrification process**. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, v. 88, n. 9, 2013.

DEGANUTTI, R, et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. In: 40 encontro de energia meio rural. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP. São Paulo, 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. Wiley-VCH, 2011.

DIÁRIO OFICIAL DO PODER EXECUTIVO. DECRETO nº 51.736, de 4 de abril de 2007. **Institui a Comissão Especial de Bioenergia do Estado de São Paulo e dá providências correlatas**. [S. l.], 4 abr. 2007. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/decreto_n_51736_04_04_2007.pdf. Acesso em: 10 mar. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF), 2013b. **Towards the Circular Economy**, vol. 1 (Isle of Wight).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF), 2015. **Rumo à economia circular. Ellen Macarthur Foundation**. Disponível em: www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economiacircular_Updated_08-12-15.pdf. Acesso em: mar. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - EMF. **Economia circular: Diagrama Sistêmico**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/diagrama-sistemico>. Acesso em: 10 mar. 2022.

EMBRAPA. **Esterqueira**. [S. l.], 20--.. Disponível em: <https://www.embrapa.br/paratec-control-e-integrado-verminoses/vermes/caprinos-ovinos/esterqueira>. Acesso em: 2 out. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional (BEN) 2020**: Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf 01

out. 2021.

ESTADO DE SÃO PAULO. LEI nº 13.798, de 9 de novembro de 2009. **Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC.** [S. l.], 9 nov. 2009. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/lei_13798_09nov_09_portugues.pdf. Acesso em: 10 mar. 2022.

European Commission (2015). **European climate change programme.** European Commission. Disponível em: http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/first/index_en.htm. Acesso em: 09 set. 2021.

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **AValiação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás.** 2015. Monografia (Pós-graduação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG), [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1132M.PDF>. Acesso em: 5 jan. 2022.

FONSECA, F. S. T, et al. **Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA:** um Estudo de Caso. In: congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

GALVÃO, Jucilene; BERMANN, Célio. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **ESTUDOS AVANÇADOS**, [s. l.], 2015. DOI 10.1590/S0103-40142015000200004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/vkWLM6pfvzMGj8NxysXHbZm/?lang=pt>. Acesso em: 9 set. 2021.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo – PR.** 2003. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85585/>.

GENG, Y., DOBERSTEIN, B., 2008. **Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving “leapfrog development”.** The International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 15(3), pp.231-239.

GIL, A.C **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 4 ed. 10. Reimpre. São Paulo. Atlas S.A 2007 176p.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. **A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems.** Journal of Cleaner Production, v. 114, p. 11-32, 2016.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.; GUARDABASSI, P. **The sustainability of ethanol production from sugarcane.** Energy Policy, London, v. 36, p. 2086- 2097. 2008.

GOLDEMBERG, José. **Biomassa e energia.** Quim. Nova, Campinas, São Paulo, n. 3, ed. 32, 20 fev. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 9 set. 2021.

GOMES, J., N., C. **Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do campus Pampulha da UFMG**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2014

GONDAK, MAURÍCIO DE OLIVEIRA. **SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PARA A SUSTENTABILIDADE DA PROPRIEDADE RURAL PELO APROVEITAMENTO DE DEJETO BOVINO VIA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA, SEGUNDO PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR**. 2019. Monografia (Pós-Graduação de MBA) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/59619/R%20-%20E%20-%20MAURICIO%20DE%20OLIVEIRA%20GONDAK.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 2 mar. 2022.

GONÇALVES, MANUELA MEDEIROS; ALBUQUERQUE, JOSÉ DE LIMA. **GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: UM ESTUDO NO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFRPE À LUZ DA AGENDA AMBIENTAL NA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA**. ENGEMA XX, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/20/anais/arquivos/198.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2022.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. Revista Estudos Avançados, n.25, v.71, 2011.

JUNGES, Alexandre Luis *et al.* **EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL A PARTIR DA FÍSICA PARA EDUCAÇÃO BÁSICA**. Experiências em Ensino de Ciências, Juazeiro do Norte, Ceará, v. 13, n. 5, 23 nov. 2018. Disponível em: https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID531/v13_n5_a2018.pdf. Acesso em: 9 set. 2021.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado**. 2014. 55 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: . Acesso em: 18 jan. 2022.

LIMA, Daniel FERREIRA DOS SANTOS. **Análise da viabilidade econômico financeira do aproveitamento dos gases de biodigestores para produção de energia elétrica**. XX Congresso Brasileiro de Custos, Uberlândia, MG, 20 de nov. 2013.

LIMA, Heleno Quevedo de. **Biodigestor - Modelos e configurações**. [S. l.], 31 ago. 2020. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/biodigestor-modelos-e-configuracoes>. Acesso em: 8 fev. 2022.

LUCAS JÚNIOR, J.; SOUZA, C.F.; LOPES, J.D.S. **Construção e operação de Biodigestores**. Viçosa-MG. CPT. 2009. 158 p. apud SILVA, J. E. P. **Avaliação técnica e econômica de um biodigestor de fluxo tubular: estudo de caso do modelo implantado na etec “orlando quagliato” em santa cruz do rio pardo, SP**. 2016. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu-SP, 2016. Disponível em: . Acesso em: 03 jan. 2022.

KUNZ, Airton *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [S. l.: s. n.], 2019.

MACEDO, FLÁVIA JUNQUEIRA DE. **DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES PARA TRATAMENTO DE DEJETOS DA PRODUÇÃO SUÍNA**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [S. l.], 2013.

MACHADO, G. B., **Fertilizantes**. Portal resíduos sólidos. Offenbach, Alemanha, 2013. Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/> Acesso em: 05 fev. 2022.

MARAFON, Anderson Carlos *et al.* **Uso da Biomassa para a Geração de Energia**. [S. l.: s. n.], 2016.

MARQUES, Luiz. **Decrescimento (II) – Mudanças climáticas**. Campinas, São Paulo, 20 jun. 2018. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/artigos/luiz-marques/decrescimento-ii-mudancas-climaticas>. Acesso em: 9 set. 2021.

MÉZES, L.; BIRÓ, G.; SULLYOK, E.; PETIS, M.; BORBÉLY, J.; TAMÁS, J. **Novel Approach on the basis of FOS/TAC method**. Analele Universității din Oradea, Fascicula: Protectia Mediului, v. 17, ano 16, p. 713-718, 2011B.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Mudanças climáticas e Transição energética**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia#TOPO>. Acesso em: 9 set. 2021.

MIRANDA, EVARISTO DE. **ÁREAS CULTIVADAS NO BRASIL E NO MUNDO. POTÊNCIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/174066/1/4942.pdf>. Acesso em: 9 set. 2021.

MORENO, RAFAELA FERNANDES. **ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS - ESTUDO DE CASO EM CRIAÇÃO DE OVINOS**. Orientador: Clider Adriane de Souza Silva. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA, PR, 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9277/1/CT_COELE_2017_1_21.pdf. Acesso em: 9 set. 2021.

MOURA, Raquel Piedade. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO CENTRAL DA UFRJ**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10021389.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

MOTTA, K. U. **Avaliação da geração de biogás de um biodigestor de dejetos bovinos e suínos**. 2012. 127 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: . Acesso em: 18 jan. 2022.

MULLER, Patrícia Carla. **Avaliação do desperdício de alimentos na distribuição do almoço servido para os funcionários de um hospital público de Porto Alegre - RS**. Orientador: Ana Beatriz Almeida de Oliveira. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação em Nutrição) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008. Disponível

em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/16556/000699412.pdf?sequence=1>. Acesso em: 2 out. 2021.

NASCIMENTO, RENAN CARLOS. **BIOGÁS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO COM ADIÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO E ÓLEO DE COZINHA**. 2014. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (Graduação de Engenharia Ambiental) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, [S. l.], 2014. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5367/1/LD_COEAM_2014_1_21.pdf. Acesso em: 9 set. 2021.

NATURAL. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/pubpreliminar/210225_transicao_energetica_e_oportunidades_de_cooperacao_no_brics.pdf. Acesso em: 9 set. 2021.

NOGUEIRA, Lucas Alvarez. **ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA NA IMPLANTAÇÃO DE TERMOELÉTRICA A BASE DE CASCA DE ARROZ EM CACHOEIRA DO SUL-RS**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, [S. l.], 2019.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**. BARRETO, E. J. F. (Coord.). Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NETO, Petrônio De Tilio. **Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres [online]**. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010. As mudanças climáticas na ordem ambiental internacional. pp. 37-81. ISBN: 978-85-7982-049-6. Available from SciELO Books. Acesso em: 9 set. 2021.

NICOLOSO, Rodrigo da Silveira et al. **USO DO DIGESTATO COMO FERTILIZANTE**. Separata de: NICOLOSO, Rodrigo da Silveira. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. [S. l.: s. n.], 201-. cap. 5, p. 94 - 128. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197622/1/final9157.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2022.

OLIVER. et al. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Oliver (Org.). Brasil: Instituto Winrock, 2008.

OLIVEIRA, André Soares. **A Liderança dos Países Desenvolvidos no Acordo de Paris: reflexões sobre a estratégia do Naming and Shaming dentro do Balanço-Global**. Sequência, [s. l.], 2019.

PATERSON, M. **Guide to Biogas. From production to use**. 5 th, Gülzow de 2010. Published by the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) with support of the Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection. German Federal Parliament. Disponível em: <http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/u/guide_biogas_engl_2012.pdf>.

PIRES, João Felipe de Moraes. MARTINS, Daiane Micaelly. COELHO, Filipe Alves. **Construção de reatores contínuos: Tanque agitado e Reator Tubular para avaliação de desempenho na reação de saponificação do Acetato de Etila**. Revista Científica

Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 10, Vol. 02, pp. 176-200. Outubro de 2019. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/construcao-de-reatores>

PORTES, Z. A. **Aplicativo computacional para projetos de biodigestores rurais**. Universidade estadual paulista Júlio de mesquita filho. Botucatu, ago. 2005. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br>.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Decreto nº 5163, de 30 de julho de 2004**. REGULAMENTA A COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, O PROCESSO DE OUTORGA DE CONCESSÕES E DE AUTORIZAÇÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS. [S. l.], 30 jul. 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.htm. Acesso em: 9 set. 2021.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº 9605, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. [S. l.], 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 9 set. 2021.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. [S. l.], 26 dez. 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. Acesso em: 7 mar. 2022.

RIBEIRO, D. S. **Determinação das dimensões de um biodigestor em função da proporção gás/fase líquida**. Revista Holos, ano 27, v. 1. 2011. Disponível em: <DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UM BIODIGESTOR EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO GÁS/FASE LÍQUIDA | Ribeiro | HOLOS (ifrn.edu.br)>. Acesso em: 02 fev. 2022.

ROCHA, Martha Suzana Rodrigues dos Santos. **Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras**. ENGEVISTA, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 217-235, 2017.

SAMPAIO, Rosana F. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfis/a/79nG9Vvk3syHhnSgY7VsB6jG/?lang=pt>. Acesso em: 18 set. 2021.

SENADO FEDERAL. Agência Senado. **Protocolo de Kyoto**. Brasília, DF, 201-. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>. Acesso em: 9 set. 2021.

SGANZERLA, E. **Biodigestor, uma solução**. Porto Alegre, RS, 1983.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. **Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países**. Ambiente & Sociedade, p. 137-148, 2007

SILVA, J. E. P. **Avaliação técnica e econômica de um biodigestor de fluxo tubular: estudo de caso do modelo implantado na etec “orlando quagliato” em santa cruz do rio pardo**,

SP. 2016. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Botucatu-SP, 2016. Disponível em: . Acesso em: 03 jan. 2022.

SILVA, W. T. L. **Saneamento básico rural: ABC da agricultura familiar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

SNA. Sociedade Nacional de Agricultura. **Ovinocultura brasileira tem espaço para crescer, assegura especialista**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/ovinocultura-brasileira-tem-espaco-para-crescer-assegura-especialista/>. Acesso em: 9 set. 2021.

SOTTI, Gustavo de. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. 2014. 59 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos. **O Campus**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.lagoadosino.ufscar.br/o-campus>. Acesso em: 9 set. 2021.

WIEGANT, W. M.; ZEEMAN, G. **The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes**. *Agricultural Wastes*, v. 16, p. 243–253, 1986.

ZABANIOTOU, A. **Redesigning a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 177, p. 197-206, 2018.