

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
ENGENHARIA MECÂNICA

Eugenio Lima Barreto
Leonardo Bazilio Sabatini
Lucas Cavalcanti Avante
Lucas Ramires de Brito Mattarazzo
Luccas Henrique Araújo

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA RESÍDUOS
ALIMENTARES

SÃO PAULO
2022

Eugenio Lima Barreto
Leonardo Bazilio Sabatini
Lucas Cavalcanti Avante
Lucas Ramires de Brito Mattarazzo
Luccas Henrique Araújo

Proposta de implementação de um biodigestor para resíduos alimentares

Trabalho de conclusão de curso apresentado
a Universidade São Judas Tadeu, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Iguatinã de Melo Costa

SÃO PAULO

2022

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os professores que nos proporcionaram muitos conhecimentos durante a trajetória acadêmica na Universidade São Judas Tadeu, em especial ao Prof. Dr. Iguatinã de Melo Costa pelo empenho dedicado a este trabalho, pela orientação, apoio e confiança, a todos os familiares que fizeram parte da nossa formação, nos incentivando e confiando em nós e aos colegas do grupo que se dedicaram ao máximo para a execução do projeto de TCC, nosso muito obrigado.

RESUMO

A pesquisa teve por objetivo verificar a capacidade de produção de biometano através de um biodigestor anaeróbio a partir de resíduos orgânicos alimentares provenientes do Restaurante Industrial situado numa empresa de embalagens de grande porte na cidade de Mauá – SP. A análise dos relatórios disponibilizados pelo restaurante indicou uma quantidade de descarte de resíduos de aproximadamente 1186 kg (2020), 1919 kg (2021) e 3667 kg (2022). Considerando o valor de 23% para a fração de sólidos voláteis desse montante, estimou-se uma produção de biometano equivalente a aproximadamente 109 m³ (2020), 176 m³ (2021) e 336 m³ (2022). Essa quantidade de biometano não foi capaz de tornar a cozinha auto sustentável no aspecto de utilizar somente o biometano produzido para suprir a demanda do fogão. Entretanto a economia estimada entre esse período de 3 anos foi de aproximadamente R\$ 16.228,00, correspondendo a aproximadamente 17% do valor gasto pelo restaurante com gás de cozinha GLP (gás liquefeito de petróleo) que totaliza um montante de R\$ 95.880,00 durante o período de 2020 a 2022. Com a utilização do biodigestor o valor total da despesa com a compra de gás GLP pelo restaurante seria de R\$ 79.652,00.

Palavras chave: biometano, biogás, biodigestor, resíduo alimentar, energia sustentável, energia verde, restaurante industrial, calculadora biometano.

ABSTRACT

The research aimed to verify the biomethane production capacity through an anaerobic biodigester from organic food waste from the Industrial Restaurant located in a large packaging company in the city of Mauá - SP. The analysis of the reports provided by the restaurant indicated an amount of waste disposal of approximately 1186 kg (2020), 1919 kg (2021) and 3667 kg (2022). Considering the value of 23% for the volatile solids fraction of this amount, a production of biomethane equivalent to approximately 109 m³ (2020), 176 m³ (2021) and 336 m³ (2022) was estimated. This amount of biomethane was not able to make the kitchen self-sustainable in terms of using only the biomethane produced to supply the demand for the stove. However, the estimated savings over this 3-year period was approximately R\$ 16,228.00, corresponding to approximately 17% of the amount spent by the restaurant on LPG cooking gas (liquefied petroleum gas), which totals R\$ 95,880.00 during the period from 2020 to 2022. With the use of the biodigester, the total value of the expense with the purchase of LPG gas by the restaurant would be R\$ 79,652.00.

Keywords: biomethane, biogas, biodigester, food waste, sustainable energy, green energy, industrial restaurant, biomethane calculator

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas da digestão anaeróbica	21
Figura 2 - Fluxo de processos da digestão anaeróbica	22
Figura 3 - Percentual dos principais gases do biogás	24
Figura 4 - Possíveis aplicações para biogás e biometano	25
Figura 5 - Número de usinas de biogás e capacidade total instalada entre os anos de 2010 e 2014 no continente europeu	31
Figura 6 - Gráfico de sobra de alimentos (KG) – 2020 até 2022	33
Figura 7 - Diagrama de Pareto	35
Figura 8 - Painel de consumo de energia elétrica residencial no Brasil.....	42
Figura 9 - Representação simplificada do biodigestor	49
Figura 10 - Representação dos sistemas do reator	50
Figura 11 - Identificação no SolidWorks da tubulação contendo chips de ferro (1ª etapa de pós tratamento)	51
Figura 12 - Representação no SolidWorks para a segunda e terceira etapa de pós tratamento	51
Figura 13 - Planilha de monitoramento	52
Figura 14 - Instrução para formatar como tabela no Excel	53
Figura 15 - Demonstração da fórmula ALEATÓRIOENTRE	53
Figura 16 - Ferramenta utilizada para atualizar o dashboard	54
Figura 17 - Ferramenta utilizada para retirar fórmulas e colar como valores.....	54
Figura 18 - Ferramenta de agrupamento de colunas.....	55
Figura 19 - Ferramenta para inserir formatação condicional	56
Figura 20 - Gerenciador de regras da formatação condicional	57
Figura 21 - Layout da calculadora do projeto.....	57
Figura 22 - Distribuição das quatro regiões da calculadora do projeto	58
Figura 23 - Primeira região	58
Figura 24 - Segunda região	59
Figura 25 - Correlação entre os dados de entrada e saída.....	59
Figura 26 - Terceira região	61

Figura 27 - Quarta região.....	62
Figura 28 - Cabeçalho planilha MonitoramentoOperacional	63
Figura 29 - Caixa de Listagem aplicada junto com formatação condicional	63
Figura 30 - Dashboard contendo o relatório gerencial do projeto	64
Figura 31 - Sugestão do local de instalação do biodigestor 2D	65
Figura 32 - Sugestão do local de instalação do biodigestor 3D (imagem disponibilizada através do Google Earth).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - comparação entre os tipos de resíduos utilizados na digestão anaeróbica e seu potencial de geração de biogás	20
Tabela 2 - Média da composição do biogás	23
Tabela 3 - Média para determinação do percentual dos STi (sólidos totais iniciais)	36
Tabela 4 - Média para determinação do percentual de sólidos voláteis totais.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ad	Fator de Segurança para Adicional de Água [m]
Ag	Área da Seção Transversal do Gasômetro [m ²]
CMAB	Biodigestor Anaeróbio Completamente Misturado
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COV	Carga Orgânica Volumétrica [kg/m ³ *dia]
CST	Carga Sólida Total
CSTR	Reator de Tanque Agitado Contínuo
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fg	Força Exercida na Parede do Gasômetro [N]
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GPR	Taxa de Produção de Gás [(m ³ CH ₄ / dia) / (m ³ de reator)]
Hg	Altura do Gasômetro [m]
HRT	Tempo de Retenção Hidráulica
MT	Massa Total a ser Abastecida no Biodigestor [kg]
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OLR	Taxa de Carregamento Orgânico
ONU	Organização das Nações Unidas
PAM	Produção Anual de Metano [m ³]
PCI	Poder Calorífico Inferior [kWh/m ³]
Pd	Produção Diária de Resíduos Alimentares [kg/dia]
PDM	Produção Diária de Metano [m ³]
Pg	Pressão no Gasômetro [Pa]
PMM	Produção Mensal de Metano [m ³]
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
Rg	Raio do Gasômetro [m]
Rwgh	Raio do Gasômetro com fator adicional de água [m]
Sd	Entrada Diária de Substrato no Reator [m ³ / dia]
STf	Fração de Sólidos Totais Final

STi	Fração de Sólidos Totais Inicial
SVT	Sólidos Voláteis Totais [kg]
UASB	Manta de Lodo Anaeróbio de Fluxo Ascendente
VFA	Ácidos Graxos Voláteis
Vg	Volume do Gasômetro [m ³]
Vop	Volume Operacional do Reator [m ³]
Vtot	Volume Total do Reator [m ³]
WRAP	Organização Britânica de Resíduos

LISTA DE SÍMBOLOS

m	metros
m ²	metros quadrados
m ³	metros cúbicos
N	Newtons
Pa	Pascal
Kg	quilogramas
kWh	Quilo Watts por hora
GJ	Giga Joules
CH ₄	Símbolo Químico que Representa o Gás Metano
Fe ₂ O ₃	Símbolo Químico que Representa o Óxido de Ferro
H ₂	Símbolo Químico que Representa o Gás Hidrogênio
H ₂ S	Símbolo Químico que Representa o Sulfeto de Hidrogênio ou Gás Sulfídrico
NaOH	Símbolo Químico que Representa o Hidróxido de Sódio
NH ₃	Símbolo Químico que Representa o Gás Amônia
P	Símbolo Químico que Representa o Fósforo
C	Símbolo Químico que Representa o Carbono
O ₂	Símbolo Químico que Representa o Gás Oxigênio
CO ₂	Símbolo Químico que Representa o Dióxido de Carbono
N ₂	Símbolo Químico que Representa o Gás Nitrogênio
S	Símbolo Químico que Representa o Enxofre
°C	Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivo Geral	17
3.2	Objetivos específicos	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Resíduos orgânicos	18
4.2	Biodigestores	19
4.3	Digestão anaeróbia	21
4.4	HRT	22
4.5	Biogás	23
4.5.1	Aplicações	24
4.5.2	Temperatura	25
4.5.3	pH	26
4.6	OLR	26
4.7	Pré-Tratamento	27
4.8	Pós-Tratamento	27
4.9	Agitadores Mecânicos	27
4.10	Nutrientes	28
4.11	Tanques – biodigestor e gasômetros	28
4.11.1	Proporção Carbono – Nitrogênio (C:N)	30
4.12	VFA	30
4.13	DQO	31

4.14	Pesquisa e Desenvolvimento	31
5	MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1	Quantidade (kg) de matéria-prima	32
5.2	Diagrama e Análise de Pareto	34
5.3	Características da matéria prima	36
5.4	Pré-tratamento da matéria prima	37
5.5	Pós-tratamento	39
5.6	Produção de biometano	39
5.7	Equivalência energética do metano – energia elétrica	41
5.8	Características do reator	42
5.8.1	Volume do reator	43
5.8.2	Volume operacional (Vop)	44
5.8.3	Volume total (Vtot)	45
5.8.4	COV	45
5.8.5	GPR	46
5.9	Consumo Diário de Biogás	46
5.10	Representação Biodigestor – SolidWorks	48
5.11	Desenvolvimento – Calculadora Biometano	52
5.11.1	Método de monitoramento	52
5.11.2	Planilha – “MonitoramentoTecnico”	52
5.11.3	Formatação Condicional	55
5.12	Layout da calculadora	57
5.13	Planilha “MonitoramentoOperacional”	62
5.14	Desenvolvimento Modelo Apresentação - Dashboard	63
5.15	Escolha do local de instalação do biodigestor	64

6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
7	CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética de um país é composta por fontes renováveis e fontes não renováveis e representa a totalidade de energia disponível para consumo (JESUS et al., 2021).

A bioenergia é uma energia renovável obtida a partir da biomassa, e seus principais benefícios são a redução de gases do efeito estufa e eliminação de resíduos (JESUS et al., 2021). O interesse em estudos que abordem a geração de bioenergia a partir de biomassa aumentou exponencialmente nos últimos anos porque a biomassa, quando utilizada como matéria-prima, possui características como estabilidade de preços, baixo custo e fonte de combustível potencialmente inesgotável (KONSTANTINOS et al., 2018).

Uma forma de gerar bioenergia é através de digestores anaeróbios (biodigestores) (JESUS et al., 2021), que possuem bactérias para decompor a matéria orgânica (biomassa), transformando-a em biogás e biofertilizante (GNAOUI et al., 2020; ZAREEI, 2018). A produção de energia proveniente de biomassa explora uma variedade de recursos, entre eles os resíduos de processamento de alimentos (KONSTANTINOS et al., 2018) que geralmente são incinerados, dispostos em lagoas de estabilização ou digeridos aerobicamente podendo causar danos ambientais e prejudiciais à saúde (NUHU et al., 2021). Diante deste cenário, os biodigestores atuam eliminando os resíduos alimentares do meio ambiente, geram o biometano e fornecem o biofertilizante contribuindo para alcançar o desenvolvimento sustentável (NUHU et al., 2021).

Diante do exposto, este estudo apresenta de forma teórica a viabilidade de instalação de um biodigestor em uma Indústria de Embalagens, utilizando como fonte de matéria prima os resíduos orgânicos gerados pelo restaurante industrial, quantificando a capacidade de produção de biometano e a economia estimada do projeto do biodigestor, apresentados através de um relatório gerencial de *dashboard*.

2 JUSTIFICATIVA

O atual uso irracional¹ de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás)² e o impacto dos gases do efeito estufa no meio ambiente estão impulsionando estudos sobre produção de energia renovável a partir de recursos e resíduos orgânicos (Achinas et al., 2017). Além disso, as maiores reservas de petróleo e gás encontram-se em regiões politicamente instáveis (Achinas et al., 2017). O processo de decomposição natural dos resíduos alimentares gera gases do efeito estufa contribuindo para o aquecimento global (NIU et al., 2013), por este motivo é importante criar um sistema para gerenciar o resíduo alimentar evitando que sejam mal administrados e descartados em aterros sanitários (NUHU et al., 2021). Pode acontecer a poluição do ambiente por microrganismos presentes no resíduo alimentar, que podem ser nocivos no ar, água e solos, ameaçando a saúde pública (FAN et al., 2015).

Uma molécula de CH₄ (gás metano) é capaz de contribuir para o efeito estufa 21 mais vezes quando comparada a molécula de CO₂ (dióxido de carbono) (NUHU et al., 2021). É considerado ecologicamente correto utilizar o CH₄ para cozinhar e gerar eletricidade pois reduz a emissão de metano na atmosfera (D' SILVA et al., 2021). Alguns países como China e Índia por exemplo já tem aproveitado a geração do biogás nas zonas rurais para minimizar a dependência de energias não renováveis, contribuindo positivamente com o meio ambiente (VELUSAMY et al., 2020).

No entanto o desafio está em como superar a dificuldade de gerenciar os resíduos alimentares determinando a melhor maneira de aproveitar seus benefícios, protegendo o meio ambiente e a água (NUHU et al., 2021).

Portanto o tema escolhido para o TCC teve como principal motivação estudar um processo capaz de administrar de maneira correta os resíduos alimentares provenientes de um restaurante industrial, contribuindo com o meio ambiente e capaz de gerar o biometano, fonte de energia sustentável, através de resíduos orgânicos que são descartados sem qualquer tipo de aproveitamento para o restaurante.

¹ 79% da energia produzida no planeta é baseada em combustíveis fósseis (IEA, 2021)

² Identificação de combustíveis fósseis conforme artigo de (KASINATH et al., 2021)

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar o potencial de geração de biometano a partir de um biodigestor que utiliza como substrato os resíduos alimentares provenientes de um restaurante industrial visando seu aproveitamento como fonte de energia térmica resultando em uma economia financeira.

3.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral, foram definidos 4 objetivos específicos descritos a seguir:

- I. Determinar o volume de produção de resíduos alimentares do restaurante industrial de uma empresa de embalagens e a partir deste número definir o dimensionamento do biodigestor;
- II. Selecionar, a partir de pesquisa bibliográfica, um método de pré-tratamento e pós-tratamento para os resíduos alimentares;
- III. Determinar o volume de produção de biometano a partir do biodigestor dimensionado e estimar seu potencial financeiro comparando com a despesa atual do restaurante com gás de cozinha GLP;
- IV. Desenvolver uma calculadora capaz de determinar os principais parâmetros do processo de biodigestão e transferir esses dados para planilhas de controle que auxiliem na gestão do projeto, apresentando os principais resultados através de um relatório gerencial (*Dashboard*).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Resíduos orgânicos

(CIESLIK et al., 2015) estima que uma tonelada de resíduos orgânicos pode produzir o equivalente a até 3,8 toneladas de CO₂. Também estima que uma tonelada desses resíduos orgânicos possa gerar 847 kWh de eletricidade e aproximadamente 90 GJ (Giga Joules – 10⁹) de calor (GAUR & SUTHAR, 2017).

Um estudo realizado em 2018 pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) aponta que uma família média brasileira desperdiça aproximadamente 130 kg de comida por ano uma média de 41,6 kg por pessoa. E os alimentos que mais vão para o lixo, por percentual do total desperdiçado, são arroz (22%), carne bovina (20%), feijão (16%) e frango (15%). Ainda, segundo o estudo da Embrapa, o alto índice de desperdício de alimentos no Brasil acontece pelos seguintes fatores comportamentais:

77% → Preferência por comida fresca à mesa;

68% → Importância de comprar em grandes quantidades para manter a despensa abastecida;

59% → Não importância se houver comida demais na despensa ou na mesa;

56% → Preparo de alimentos duas ou mais vezes por dia, reiterando a ideia de que ‘é melhor sobrar que faltar’.

(EMBRAPA, 2018)

Um relatório mais recente chamado “Índice de Desperdício de Alimentos 2021” divulgado pela ONU (Organização das Nações Unidas) em parceria com a WRAP (Organização Britânica de Resíduos) e com a PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) apresenta que em 2019, 931 milhões de toneladas de alimentos foram desperdiçados. Isso sugere que 17% da produção total de alimentos do mundo foram parar no lixo. Ainda de acordo com esse relatório liderado pela ONU, quem mais desperdiça os alimentos são as famílias com 61% dessa parcela. Restaurantes somam 26% e 13% é proveniente do comércio, como supermercados e pequenas lojas (ONU, 2021)

4.2 Biodigestores

Conforme citado pela empresa CHP Brasil Biogás, a definição de biodigestores e do biogás podem ser descritas da seguinte maneira:

Digestores Anaeróbios ou Biodigestores são tanques por onde resíduos como dejetos animais, restos de alimentos, esgotos e efluentes de alta carga orgânica são depositados, na ausência de ar atmosférico. Nestes biodigestores, micro organismos que naturalmente existem nos resíduos, se alimentam dos compostos orgânicos nele existentes. Por consequência, parte destes compostos se transformam em gases (biogás), enquanto outra parte se transforma em uma massa orgânica degradada, semelhante a um adubo, chamado de biofertilizante.” (CHP Brasil Biogás)

“Os gases em questão são uma mistura de metano, gás carbônico e gás sulfídrico, além de água na forma de umidade. Esta mistura de gases ganha o nome de biogás, e é um excelente combustível para gerar energia, devido à presença de metano. O biogás é então tratado para remover o gás sulfídrico e a umidade, já que esta combinação causa sérios problemas de corrosão em equipamentos. Em seguida, o biogás é comprimido e injetado em um grupo moto gerador, onde irá gerar energia elétrica e térmica. Esta energia pode suprir a demanda de uma fazenda, fábrica ou, até mesmo, ser vendida.” (CHP Brasil Biogás)

Uma ampla gama de resíduos pode ser utilizada no processo de digestão anaeróbica, porém as formas mais típicas de resíduos são o estrume animal, lodo de esgoto, resíduos municipais sólidos e resíduos alimentares (ACHINAS et al., 2017). Na prática atual, co-substratos são adicionados para aumentar o conteúdo orgânico para alcançar maior rendimento de gás, esses co-substratos geralmente são resíduos orgânicos industriais relacionados com a agricultura, resíduos alimentares e resíduos biológicos municipais (ACHINAS et al., 2017).

Tabela 1 - comparação entre os tipos de resíduos utilizados na digestão anaeróbica e seu potencial de geração de biogás

Tipo de substrato	Rendimento de biogás por tonelada de matéria fresca (m ³)
Estrume de gado	55-68
Esterco de frango	126
Gordura	826-1200
Resíduos alimentares (desinfetado)	110
Resíduos de frutas	74
Estrume de cavalo	56
Silagem de milho	200-220
Resíduos sólidos municipais	101,5
Estrume de porco	11-25
Lodo de esgoto	47

Fonte: Adaptado de (Achinas et al., 2017)

Um biodigestor bem planejado e dimensionado otimiza a geração do biometano fornecendo energia verde e contribuem com a redução de emissão de carbono indo de encontro aos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) da ONU para combater os fatores que afetam nas mudanças climáticas (NUHU et al., 2021). As pesquisas para desenvolver sistemas mais simples e ecologicamente equilibrados de biodigestores ainda estão sendo exploradas para garantir técnicas mais fáceis na geração do biogás, podendo beneficiar indústrias, fazendas, comunidades urbanas e comunidades rurais (NUHU et al., 2021). Alguns exemplos de biodigestores mais simples são construídos a partir de tambores, latas, concreto ou tanques plásticos e seu volume varia com base na capacidade de produção e demanda de substrato, podendo ser operados em lote (batelada) ou maneira contínua (NUHU et al., 2021).

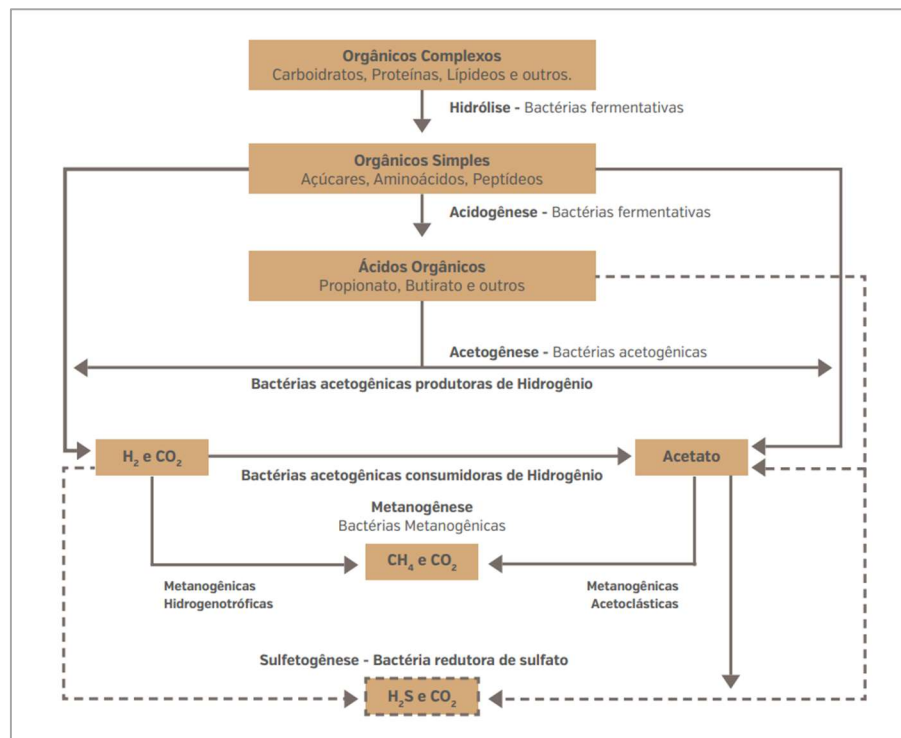
Um biodigestor pode fornecer produtos úteis e valiosos como o biofertilizante que contém muitos nutrientes e pode ser comercializado para agricultores na forma de adubo / fertilizante e também é capaz de gerar o biogás (biocombustível), podendo atender a demanda energética dos proprietários do biodigestor. (THOMPSON et al., 2013). São

exemplos de alguns biodigestores tradicionais mais complexos e com custo elevado devido aos materiais empregados em sua construção o CSTR (Reator de Tanque Agitado Contínuo) (NUHU et al., 2021), CMAB (Biodigestor Anaeróbico Completamente Misturado) e o UASB (Manta de Lodo Anaeróbico de Fluxo Ascendente) (KEVIN E SULEIMAN et al., 2018) e (NUHU et al., 2021). Estes sistemas anaeróbicos contam com um HRT (Tempo de Retenção Hidráulica) variando entre 15 a 40 dias (KEVIN E SULEIMAN et al., 2018).

4.3 Digestão anaeróbia

Os estágios da digestão anaeróbica são divididos 4 etapas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (ACHINAS E EUVERINK, 2016). Em cada estágio ocorre a ação de microrganismos específicos que atuam decompondo a matéria orgânica, como por exemplo *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Aminobacterium* e *Methanobacter* (TUFANER E AVSAR, 2016). O fluxo das etapas do processo pode ser observado na figura 1.

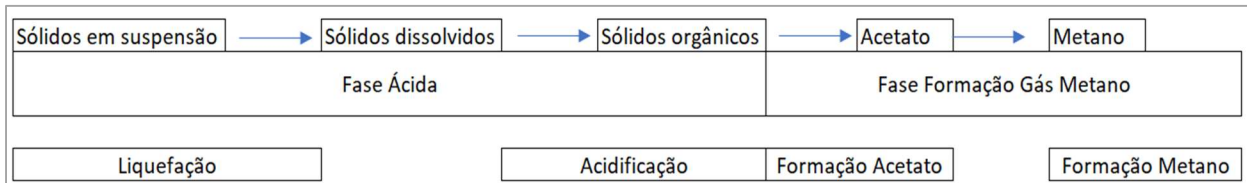
Figura 1 - Etapas da digestão anaeróbica



Fonte: Chernicharo (2007)

O fluxo resumido da digestão anaeróbia pode ser descrito de forma sucinta conforme figura 2.

Figura 2 - Fluxo de processos da digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de (WILSON, SHIELDS, *et al.*, 2006)

A complexa digestão anaeróbica depende de seis principais parâmetros operacionais: temperatura, pH, OLR (Taxa de Carregamento Orgânico), velocidade de agitação (se houver), pressão e HRT (ZHAI *et al.*, 2015), havendo mudanças no valor ideal de fermentação do substrato, o processo todo pode parar (HOUTMEYERS *et al.*, 2014).

4.4 HRT

Significa o período médio de tempo que o substrato permanece no biodigestor para produzir o biogás (NUHU *et al.*, 2021). Este cálculo do tempo médio é realizado através da relação entre o volume do reator e o fluxo da entrada do material orgânico no reator (NUHU *et al.*, 2021). É o tempo gasto pelo substrato para passar (sistema contínuo) ou permanecer (sistema em batelada) na câmara digestora, isto é, o tempo entre a entrada e a saída dos diferentes materiais do digestor. O tempo de retenção ou de digestão varia em função do tipo de biomassa, granulometria da biomassa, temperatura do digestor, pH do substrato, agitação, etc., mas, de modo geral, situa-se na faixa de 4 a 60 dias (BATISTA, 1981) e (ALISSON BORGES *et al.*, 2010).

Um HRT prolongado leva a diminuição das bactérias responsáveis pela degradação dos compostos orgânicos enquanto um HRT curto dificilmente será capaz de produzir metano (YADAV *et al.*, 2016). Considera-se um HRT de 15 a 30 dias suficiente para a digestão de resíduos no estado mesofílico (KWIETNIEWSKA & TYS, 2014).

4.5 Biogás

O volume de biogás produzido por quilograma de matéria-prima varia em função do tipo do biodigestor, e sua eficiência está relacionada a fatores como temperatura, pH e relação carbono-nitrogênio (C:N) dos substratos utilizados (ISHA et al., 2021).

Segundo (ATELGE et al., 2018) a composição do biogás pode ser descrita conforme a tabela 2.

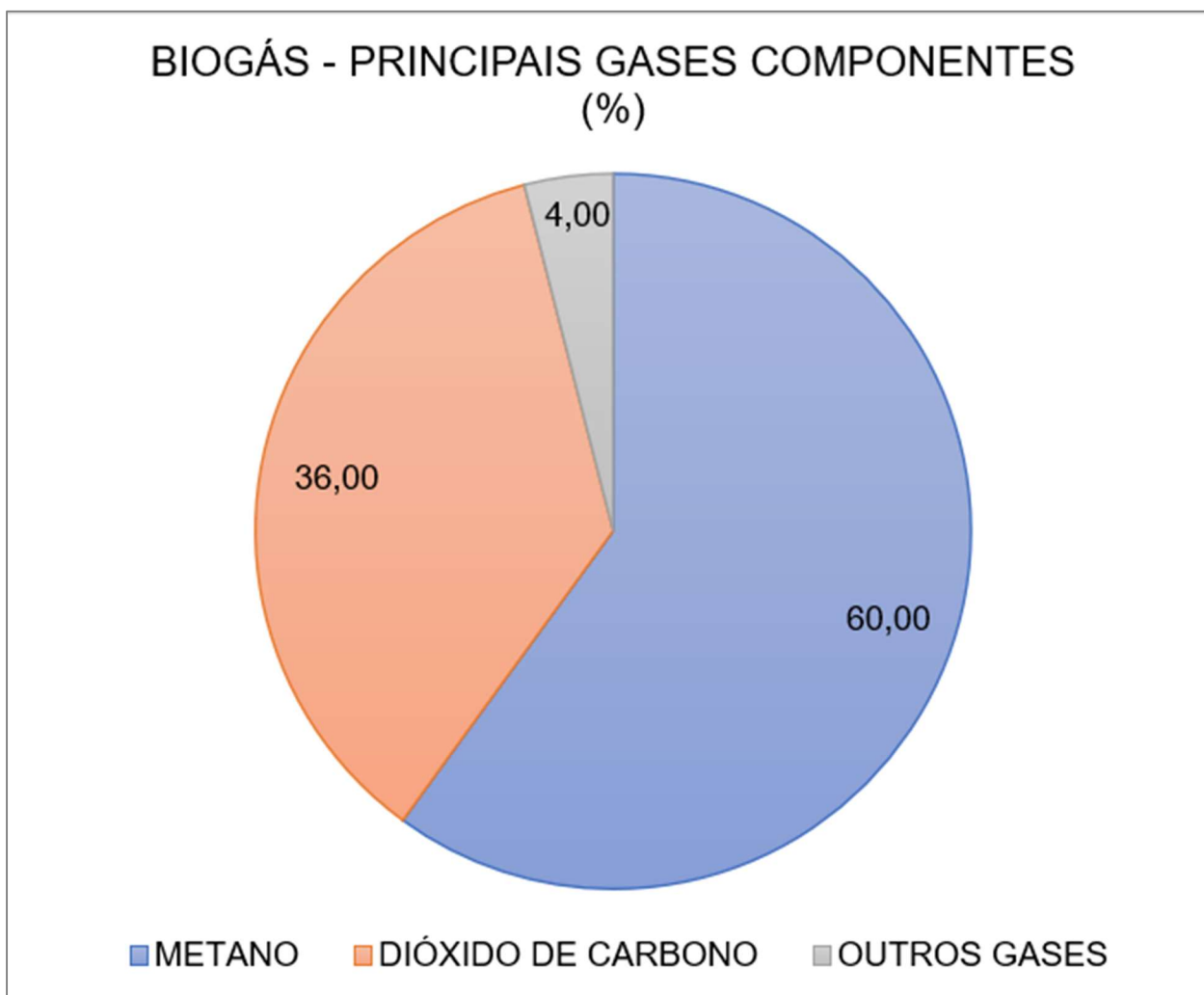
Tabela 2 - Média da composição do biogás

Substância	Fórmula	Quantidade (%)	Média aproximada (%)
Metano	CH ₄	50 a 75	60
Dióxido de carbono	CO ₂	25 a 50	36
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	01 a 02	1
Amônia	NH ₃	01 a 02	1
Hidrogênio	H ₂	01 a 02	1
Oxigênio	O ₂	Não informado	0,5
Nitrogênio	N ₂	Não informado	0,5

Fonte: (ATELGE et al., 2018)

Simplificando de forma mais visual e evidenciando os principais gases de sua composição figura 3.

Figura 3 - Percentual dos principais gases do biogás



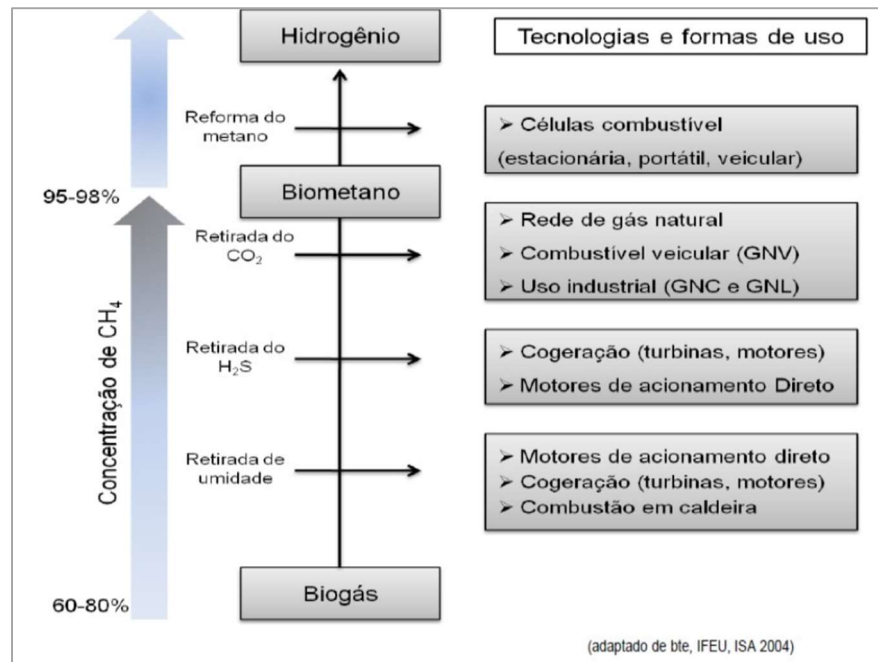
Fonte: (ATELGE et al., 2018)

4.5.1 Aplicações

A geração de eletricidade é a aplicação preferencial, correspondendo a 86% do biogás produzido. A maioria dessas usinas está conectada a rede elétrica por meio de esquemas de compensação, que permitem consumidores para gerar eletricidade e serem compensados pelo excedente eletricidade que injetam na rede. Esses agentes que tanto consomem quanto produzem energia são chamados de geradores. A geração de calor é o segundo uso mais comum do biogás. Para ser usado como combustível veicular ou

adicionado aos gasodutos, o biogás precisa ser atualizado para biometano, atingindo um teor mínimo de 95% de metano. Em 2019, apenas 3% do biogás produzido no Brasil foi convertido para biometano (KANDA, 2022). As principais aplicações do biometano estão representadas através da figura 4.

Figura 4 - Possíveis aplicações para biogás e biometano



Fonte: (PORTAL DO BIOGÁS, 2004)

4.5.2 Temperatura

A temperatura de operação no biodigestor é de extrema importância, uma vez que os microrganismos presentes no reator são sensíveis a mudanças de temperatura, então uma variação pequena de 2°C fora da faixa de operação pode representar uma perda de até 30% na produção do biogás (DEUBLEIN, 2011) e (ADAMCZUK et al., 2021).

Entre os parâmetros operacionais, destaca-se o papel fundamental da temperatura. A temperatura é um parâmetro chave que afeta a estabilidade e desempenho da digestão anaeróbica (RUIZ-HERNANDO et al., 2014). De acordo com duas faixas distintas de temperatura, pode-se caracterizar dois processos chamados Mesofílico e Termofílico por onde a digestão anaeróbica ocorre, sendo Mesofílico (25°C – 40°C) e Termofílico (>45°C) (SERRANO et al., 2013).

Trabalhar sob o efeito de altas temperaturas pode melhorar o desempenho da digestão anaeróbia (SUN et al., 2015), porém em faixas mais elevadas de temperaturas percebe-se maior geração de biogás com menor parcela de metano em sua composição (LO et al., 2019).

4.5.3 pH

O pH é uma escala numérica adimensional utilizada para determinar se uma solução é ácida ou alcalina e para a digestão anaeróbia considera-se uma faixa ótima de operação entre 6,8 e 7,2 (NING et al., 2019), se o pH estiver inferior a 6,8 o desenvolvimento de microrganismos metanogênicos é comprometido diminuindo a taxa de produção de metano (NUHU et al., 2021), e se o pH for superior a 7,2, atingindo uma maior alcalinidade, ocorre a destruição dos grânulos cristalinos também afetando negativamente a produção de metano (LI et al., 2012).

Em casos de desenvolvimento de um pH muito ácido no reator, pode-se adicionar hidróxidos ou compostos alcalinos visando equilibrar o pH para a faixa neutra (CHRISTODOULOU e STAMATELATOU, 2016) ou parar de alimentar o composto orgânico no reator para que bactérias acetoclásticas absorvam a acidez e aumentem o pH dos ácidos graxos voláteis (PILLI et al., 2016). O Hidróxido de Sódio é amplamente utilizado para tratamento do pH nos biodigestores devido seu custo benefício e sua capacidade de diminuir o pH (ABUDI et al., 2020).

4.6 OLR

Encher o sistema com uma quantidade muito grande de matéria orgânica irá dificultar a decomposição pelos microrganismos responsáveis pela metanogênese (LI, 2016).

(RUFFINO et al., 2016) notaram uma tendência comum em que, à medida que a OLR aumenta, o Sólidos Voláteis (SV) também aumentam tendo por consequência um aumento da produção de metano.

4.7 Pré-Tratamento

Quando o substrato orgânico contém celulose é recomendado um pré-tratamento químico para a quebra da camada de lignina que protege a celulose e a hemicelulose, tornando a biomassa mais acessível para a digestão, o que otimiza o processo (NUHU et al., 2021). É possível também realizar o ajuste da relação Carbono-Nitrogênio do substrato através da adição de ureia em substratos de caule de sorgo junto com esterco de gado para aumentar a geração de biogás (Zhikai Zhang et al., 2016). Importante revelar que substratos como o esterco de vaca contém Ferro, Níquel, Zinco e Cálcio em sua composição o que também pode contribuir com o aumento da produção de biogás se este substrato for adicionado ao reator (Zhikai Zhang et al., 2016).

Na maior parcela dos substratos utilizados na digestão anaeróbia, o nitrogênio e o fósforo geralmente se apresentam em valores insuficientes (CHENG E ZONG, 2014) podendo ser adicionados no reator para obter maior produção de biogás (RICO et al., 2015).

4.8 Pós-Tratamento

O biogás gerado passa por um suporte fixo, cilíndrico e fechado contendo chips de ferro (Fe_2O_3) para retirar o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e na sequência segue para um tanque contendo água responsável por separar o metano do dióxido de carbono (CO_2) purificando o biogás em biometano, que por fim é filtrado por uma etapa que consiste em um recipiente de carvão ativado para eliminar quaisquer gases associados que possam ter escapado das filtragens anteriores resultando em um biometano com grau estimado de pureza aproximado de 99% (NUHU et al., 2021)

4.9 Agitadores Mecânicos

Considerando um mecanismo de agitação mecânica do substrato dentro do reator, pode-se afirmar que uma pequena agitação aumentaria a fermentação (ALBUQUERQUE

et al., 2012), enquanto uma agitação mais forte e vigorosa pode diminuir a taxa de fermentação (CHIU et al., 2013).

4.10 Nutrientes

Os nutrientes mais importantes exigidos pelos microrganismos são o carbono (C), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), fósforo (P) e enxofre (S) pois fornecem substâncias importantes para manutenção da vida microbiana (NUHU, 2021). O nitrogênio e o fósforo geralmente se apresentam em valores insuficientes (CHENG E ZONG, 2014) podendo ser adicionados no reator para obter maior produção de biogás (RICO et al., 2015).

4.11 Tanques – biodigestor e gasômetros

O material utilizado nos tanques do biodigestor e para os gasômetros pode ser o polietileno e recomenda-se uma base de fixação feita de concreto e um quadro guia fixado ao solo para que os tanques não corram o risco de se movimentar e cair (NUHU et al., 2021). Ainda contam com uma espessura da parede de polietileno de 10 a 20 polegadas que é capaz de suportar as pressões internas exercidas pelo biogás, e tem vida útil aproximada de 15 anos para regiões consideradas de clima quente (NUHU et al., 2021).

O volume operacional (Vop) equação (1) e o volume total (Vtot) equação (2) observa-se que o volume total será sempre maior que o volume operacional, uma vez que o volume total considera a ascensão do biogás e da lama produzida (NUHU et al., 2021)

Cálculos baseados no artigo de (Stewen Kuba Nuhu et al., 2021)

Volume operacional = Vop ou volume de operação do reator ou digestor

$$V_{op} = Sd \times HRT \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: Vop = m³/dia;

Sd = entrada diária de substrato (m³/dia);

HRT = tempo (em dias) de retenção hidráulica (intervalo de tempo durante o qual a biomassa se decompõe no digestor).

Volume total do digestor é sempre maior que o volume operacional, para dar espaço a ascensão do biogás e lama produzida.

$$V_{tot} = \frac{V_{op}}{0,8} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde: V_{tot} = Volume total (m^3).

V_{op} = Volume operacional (m^3).

0,8 = Margem de segurança de 20% devido volatilidade do gás.

Os gasômetros são tanques por onde o biogás passa para ser filtrado e armazenado e geralmente possuem formato cilíndrico, podendo ser dimensionado segundo equação (3) e (4) (NUHU et al., 2021)

Tanque gasômetro (após chips de ferro Fe_2O_3)

$$Vg = \pi \times Rg^2 \times Hg \quad \text{Equação (3)}$$

$$Vg = \pi \times (Rwgh)^2 \times Hg$$

$$Rwgh = Rg + Ad \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: Vg = Volume gasômetro (m^3);

Rg = raio gasômetro (m);

Hg = altura gasômetro (m);

$Rwgh$ = raio do gasômetro com fator adicional de água (m);

Ad = fator de segurança para adicional de água (m).

A fórmula 4 deve ser calculada da mesma forma que a fórmula 3, porém substituindo o Rg por $Rwgh$. O $Rwgh$, é o Rg mais o adicional de água, levando em consideração que o tanque não contém só biogás, mas sim biogás + água.

Devido a pressão que o gás pode exercer, a força sobre o biodigestor e os gasômetros podem ser estimadas conforme equação (5) (NUHU et al., 2021)

Força de pressão do gás nos tanques

$$Pg = \frac{Fg}{Ag} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde: P_g = pressão no gasômetro (Pa);

F_g = Força exercida na parede do gasômetro (N);

A_g = Área seção transversal do gasômetro - comprimento x largura de um cilindro (m^2).

4.11.1 Proporção Carbono – Nitrogênio (C:N)

É um fator muito importante para se obter a melhor produção de metano, pois o carbono e o nitrogênio são necessários para os microrganismos presentes na digestão anaeróbica (ZHANG et al., 2016). A relação Carbono: Nitrogênio fora do valor ideal de (25-30 : 1) pode causar deficiência na digestão diminuindo o crescimento dos microrganismos, o que reduz a produção de metano (SUBHABRATA et al., 2019). Casos onde o teor de nitrogênio excede o de carbono, forma-se amônia reduzindo o pH dentro do reator (ZHEN et al., 2017). A escassez de carbono e/ou de nitrogênio afeta os microrganismos responsáveis pelo processo de metanogênese, inibindo a produção de metano (LI et al., 2019)

4.12 VFA

São os responsáveis por regular a digestão anaeróbica, o que os torna importantes precursores de biocombustíveis, executando a quebra da matéria orgânica e produzindo gases como metano CH_4 e carbônico CO_2 , desempenhando um papel vital no fornecimento de energia para a produção do biogás (NUHU et al., 2021). Quanto menor o teor de VFA maior será a produção de metano (HO & CHU, 2019).

(JINGURA & KAMUSOKO, 2017) relataram que o acúmulo de VFA de 1500 – 2000 mgO_2/L reduziu o pH inferior a 6, resultando em um estado de inatividade dos microrganismos.

4.13 DQO

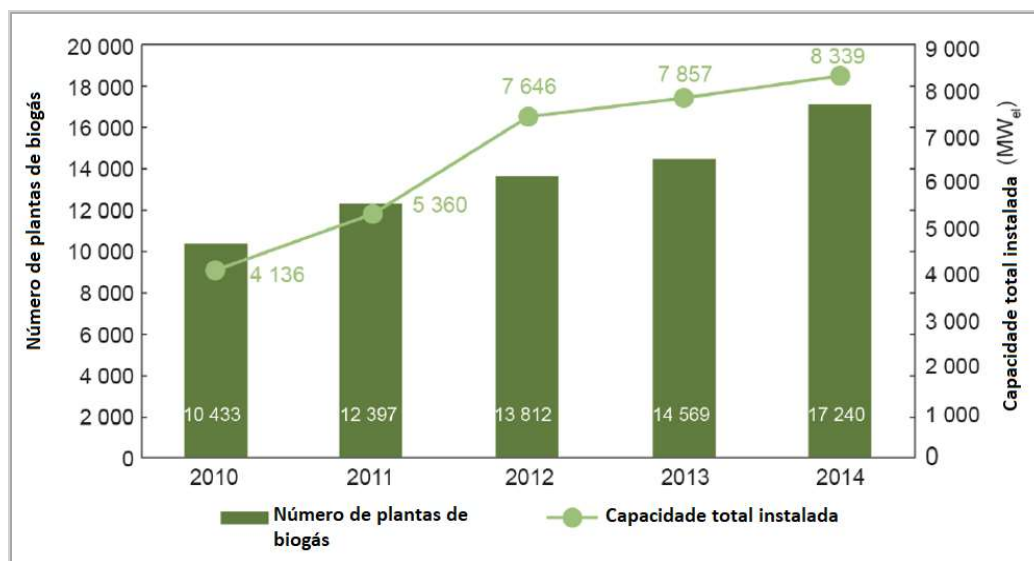
Esse indicador é utilizado também para saber o quão poluente um substrato pode ser ao meio ambiente pois o aumento da DQO significa um aumento na quantidade de orgânicos oxidáveis no substrato, o que leva a um aumento da poluição (TUCKER, 2018).

Após a conclusão do processo de decomposição da matéria orgânica e consequentemente produção do biogás, a demanda química de oxigênio diminui (JINGURA E KAMUSOKO, 2017)

4.14 Pesquisa e Desenvolvimento

As partes interessadas do setor de biogás previram uma combinação de programas federais para fundos de pesquisa e investimentos industriais privados para acelerar a introdução de combustíveis no mercado com preço competitivo (ACHINAS et al., 2017). A Europa conta com mais de 17.000 usinas instaladas, sendo aproximadamente 8.000 no território alemão, e o desenvolvimento se demonstra crescente com o passar dos anos figura 5. (ACHINAS et al., 2017)

Figura 5 - Número de usinas de biogás e capacidade total instalada entre os anos de 2010 e 2014 no continente europeu



Fonte: Adaptado de (ACHINAS et al., 2017).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Quantidade (kg) de matéria-prima

Os dados para a quantificação das sobras de alimentos produzidos foram fornecidos diretamente pelo restaurante através de um relatório estratificado contendo a quantidade (em quilogramas) de sobra ingesta de alimentos entre os meses de janeiro/20 até Novembro/22. O termo sobra ingesta remete a quantidade de alimentos desperdiçados nos pratos dos colaboradores que estão realizando a refeição, já o termo sobra limpa significa a quantidade de alimento que é jogado fora proveniente do preparo dos alimentos, ou seja, cascas da batata, cascas da banana, bagaço de laranja entre outros exemplos de alimentos que após seu preparo gera esse tipo de resíduo.

O restaurante não possui um sistema para quantificar a sobra limpa, apenas a sobra ingesta que tem suas quantidades controladas através do sistema ITFoods³. Entretanto, os colaboradores responsáveis pelo restaurante estimam que a quantidade em quilogramas de sobra limpa seja equivalente ou superior a quantidade em quilogramas de sobra ingesta. Mesmo levando em consideração a *expertise* dos colaboradores do restaurante, optou-se por considerar um valor menor de sobra limpa em relação a sobra ingesta a fim de evitar uma projeção superestimada de biometano.

O valor considerado de sobra limpa foi de 50% em relação ao valor da sobra ingesta, isto é, a cada 1kg de sobra ingesta tem-se 0,5kg de sobra limpa.

O volume de resíduos orgânicos gerado pelo restaurante no ano de 2020 e 2021 foi abaixo do esperado devido ao impacto da pandemia de Covid-19 porque a maioria dos funcionários não compareciam à fábrica, cumprindo o regime de *home office*. Por esta razão os cálculos teóricos que foram realizados neste trabalho levaram em conta o ano base de 2022 pois já havia amenizado os impactos da Covid-19 e os colaboradores da empresa retornado a rotina de comparecer na fábrica. Baseado nestas informações foi possível determinar a tabela 3 e plotar o gráfico representado através da figura 6.

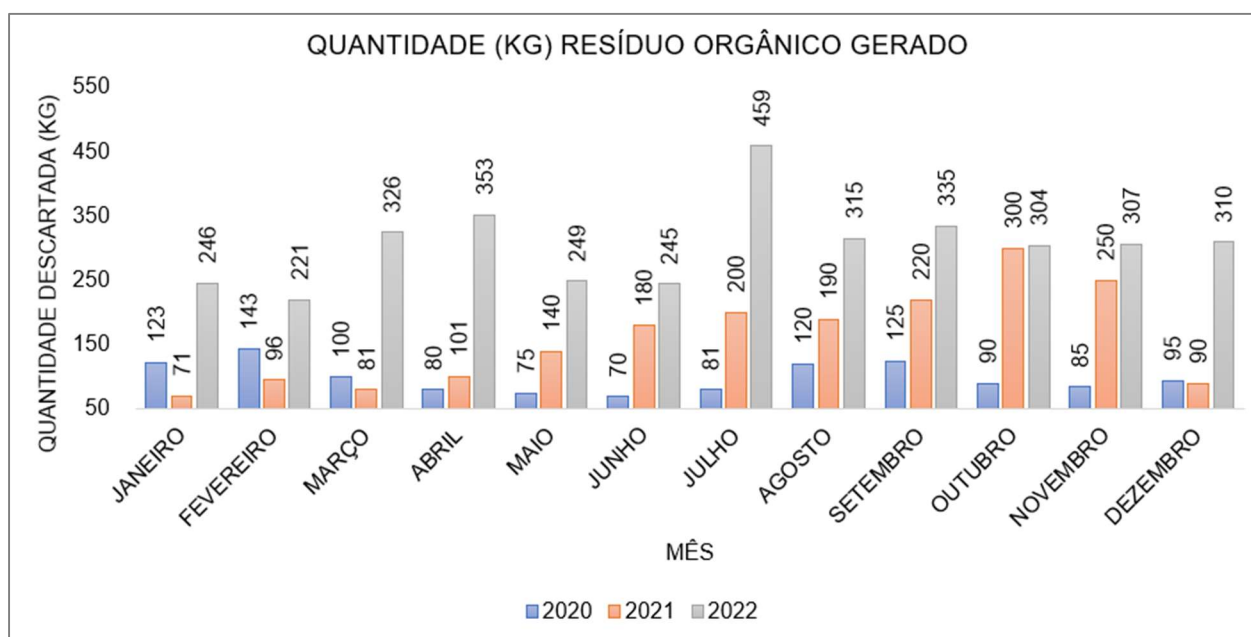
³ Sistema automatizado utilizado para o planejamento do cardápio e controle dos descartes de alimentos (UCR Risotolândia, 2022)

Tabela 3 - sobra de alimentos (KG) – 2020 até 2022

Mês	2020	2021	2022
Janeiro	123	71	246
Fevereiro	143	96	221
Março	100	81	326
Abril	80	101	353
Maio	75	140	249
Junho	70	180	245
Julho	81	200	459
Agosto	120	190	315
Setembro	125	220	335
Outubro	90	300	304
Novembro	85	250	307
Dezembro	95	90	310
Total	1187	1919	3667

Fonte: autoria própria.

Figura 6 - Gráfico de sobra de alimentos (KG) – 2020 até 2022



Fonte: autoria própria.

Através da soma entre sobra ingesta e sobra limpa foi possível chegar na quantidade em quilogramas de sobra total de alimentos referente ao ano de 2022, o que representa uma média mensal equivalente a 305 kg.

$$\text{Média diária} = \text{Média mensal} \div 30 \text{ dias}$$

$$\text{Média diária} = 305 \text{ kg} \div 30 \text{ dias}$$

$$\text{Média diária} = 10,160 \text{ kg/dia}$$

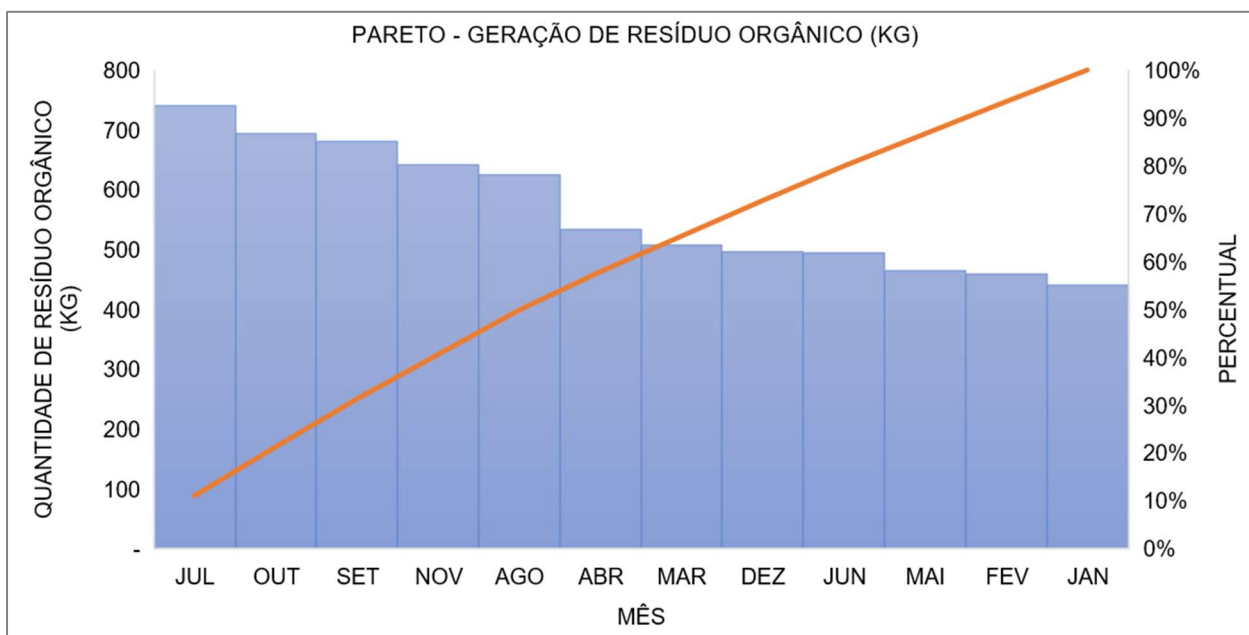
A média diária de descarte total de alimentos equivale a aproximadamente 10,16 kg.

5.2 Diagrama e Análise de Pareto⁴

Através dos relatórios e informações compiladas sobre a quantidade de sobras de alimentos provenientes do restaurante, foi gerado um diagrama de Pareto, representado através da figura 7, para identificar quais os meses que mais representam volume de sobras de alimentos e em seguida foi realizada uma análise do diagrama e apresentados algumas hipóteses que talvez contribuíram para esse aumento na geração de resíduos orgânicos.

⁴ O diagrama de Pareto é um gráfico de colunas ordenado em frequências, da maior para a menor, de algum dado em questão. Esse conceito afirma que aproximadamente 80% dos efeitos vêm de 20% das causas (Hashtag, 2019)

Figura 7 - Diagrama de Pareto



Fonte: autoria própria.

Através desta análise o restaurante pode verificar os motivos pelos quais os meses de Julho, Outubro, Setembro e Novembro foram os que mais geraram resíduos orgânicos entre os anos de 2020 a 2022:

- Alguns alimentos específicos que foram preparados e geraram muita sobra limpa devido suas cascas (banana, mamão, laranja, batata, etc);
- Aumento no volume de pessoas no refeitório que pode ser contabilizado através da catraca de entrada do restaurante;
- Identificar qual o cozinheiro chefe que estava responsável por cozinhar nestes meses, tentando avaliar se o motivo pode ter sido a qualidade da comida fornecida;
- Entender se houve descarte de comida estragada devido a um armazenamento incorreto;

- e) Se houve muita sobra limpa no *rechaud*, isso talvez signifique um mal planejamento do restaurante que está comprando mais comida que o necessário, gerando despesas extras.

5.3 Características da matéria prima

Por se tratar de sobras de alimentos a matéria prima é caracterizada como resíduo alimentar e este tipo de matéria prima conta com a presença de resíduos fibrosos que contém microrganismos que demoram até 2 dias para começar a produzir o biogás por sua degradação ser mais lenta (NASIR & GHAZI, 2015).

Tabela 3 - Média para determinação do percentual dos STi (sólidos totais iniciais)

Autor	ZHANG ET AL (2006)	LI ET AL (2011)	ZHANG ET AL (2011)	BROWNE ET AL (2012)	ZHANG ET AL (2013)
Sólidos totais (%)	30,900	24,000	18,100	29,400	23,100
Média (%) = Sti	25,100				

Fonte: (DA ROCHA, 2016)

Foi considerado o valor médio de STi de 25% para os cálculos abaixo.

$$CST(Carga\ sólida\ total) = Pd \times STi$$

Equação (6)

$$CST = 10,16 \times 0,25 \rightarrow CST = 2,550\ kg/dia$$

$$CSTmensal = 2,55 \times 30dias = 76,500\ kg/mês$$

$$CST_{anual} = 2,55 \times 365 \text{ dias} = 930,750 \text{ kg/ano}$$

Onde: CST = carga sólida total (kg/dia);

Pd = produção diária de resíduos alimentares (kg/dia);

STi = Fração de sólidos totais inicial de 25% (adimensional).

5.4 Pré-tratamento da matéria prima

Recomenda-se que folhas, saladas e podas de árvores⁵ não sejam abastecidas no reator devido a necessidade de um pré-tratamento químico ou térmico para resíduos que contenham celulose em sua composição, pois somente o pré-tratamento químico é capaz de quebrar a lignina, expondo a parede de celulose para ser digerida pelos microrganismos (NUHU et al., 2021) e (ACHINAS et al., 2017). Recomenda-se também que ossos não sejam inseridos no reator (Eco Circuito, 2021). Não se sabe ao certo qual a melhor matéria-prima para a formação do biometano, em geral recomenda-se carboidratos, gorduras e proteínas (ACHINAS ET AL., 2017).

O pré-tratamento mais comum em biodigestores ligados a resíduos alimentares é a adição de água um pouco antes de ser abastecido no biodigestor (NUHU et al., 2021).

$$MT_{diário} = \frac{CST}{STf} \quad \text{Equação (7)}$$

$$MT_{diário} = \frac{2,55}{0,15} = \frac{17 \text{ kg}}{\text{dia}}$$

$$MT_{mensal} = 17 \times 30 \text{ dias} = \frac{510 \text{ kg}}{\text{mês}}$$

$$MT_{anual} = 17 \times 365 \text{ dias} = \frac{6205 \text{ kg}}{\text{ano}}$$

Onde: MT = massa total a ser abastecido no biodigestor (massa do resíduo alimentar + massa de água a ser adicionada) (kg); - (DA ROCHA, 2016)

⁵ Apesar do estudo ser direcionado ao restaurante, existe uma área verde grande na empresa que gera resíduos de poda de árvore.

STf = Fração de sólidos totais final de 15% porque recomenda-se que o substrato entre no tanque com 15% dos sólidos totais diluído (adimensional). - (DA ROCHA, 2016)

MT = 17 kg / dia. Desse montante, 10,16 kg é proveniente dos resíduos do restaurante, o restante (6,84 kg) será a massa necessária a ser adicionada de água para diluição.

Considerando que a densidade da água é de 1000 kg/m³.

$$1000 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ m}^3$$

$$6,84 \text{ kg} \rightarrow X \text{ m}^3$$

$$1000 X = 6,84$$

$$X = \frac{6,84}{1000}$$

$$X = 0,00684 \text{ m}^3$$

O volume de água que precisará ser adicionada diariamente será de 0,00684 m³.

Como forma de constatar o valor registrado acima, efetua-se o cálculo de proporção entre o resíduo alimentar e a água adicionada:

$$10,16 \text{ kg} \rightarrow 100\%$$

$$6,84 \text{ kg} \rightarrow X \%$$

$$10,16 X = 684$$

$$X = \frac{684}{10,16}$$

$$X = 67,3 \%$$

Então a relação pode ser interpretada como (1:0,67), ou seja, a cada 1kg de alimento, precisa ser adicionado 0,67kg de água. Cálculo que se aproxima muito do cálculo de MT:

Cálculo pela fórmula MT = necessidade de adição de 0,00684 m³ de água ou 6,840 Litros de água

Cálculo por Proporção = necessidade de adição de 0,0068072 m³ de água ou 6,807 Litros de água.

5.5 Pós-tratamento

Durante o processo de digestão anaeróbica ocorre a formação do biogás que contém metano e outros gases em sua composição, portanto é importante garantir um processo de filtragem que elimine os outros gases e consiga isolar o metano, por esta razão que ao final da filtragem o biogás é conhecido como biometano.

Não realizar o processo de filtragem pode resultar em problemas para os equipamentos onde o biogás será utilizado. A presença de H₂S por exemplo, é capaz de corroer equipamentos metálicos, outra característica crítica do biogás é a umidade que precisa ser retirada também.

Este estudo sugere um pós-tratamento de 3 etapas, assim como sugere o estudo de (Nuhu et al., 2021)

1ª Etapa = Recipiente fechado Fe₂O₃, que pode ser a palha de aço comumente utilizada para limpeza de louças. O objetivo dessa etapa é retirar o H₂S presente no biogás;

2ª Etapa = Recipiente contendo água com NaOH (Hidróxido de Sódio) para separar o CO₂. O hidróxido de sódio é popularmente conhecido como soda cáustica.

3ª Etapa = Mesmo após as 2 etapas anteriores, alguns gases podem permanecer na composição do biometano, então um recipiente com carvão ativado pode ser aplicado para retirar as impurezas restantes. A terceira é a última etapa de filtragem antes do biometano ser armazenado no gasômetro.

5.6 Produção de biometano

O percentual de sólidos voláteis totais foi o primeiro fator considerado. Através desse percentual foi possível estimar a produção de biometano.

Uma média foi realizada baseada em 5 artigos de 3 autores distintos, resultando no valor de 22,940% de SVT (Sólidos Voláteis Totais).

Tabela 4 - Média para determinação do percentual de sólidos voláteis totais

Autor	ZHANG ET AL (2006)	LI ET AL (2011)	ZHANG ET AL (2011)	BROWNE ET AL (2012)	ZHANG ET AL (2013)
Sólidos voláteis (%)	26,40	22,60	17,10	27,60	21,00
Média (%)	22,940				

Fonte: Camila Marçal (2016)

A produção diária de resíduos do restaurante equivale a 10,16kg, então:

$$10,16 \text{ kg} \rightarrow 100\%$$

$$SVT \text{ kg} \rightarrow 22,94\%$$

$$100 \text{ SVT} = 10,16 \times 22,94$$

$$SVT_{diário} = \frac{233,070}{100} \rightarrow SVT_{diário} = 2,331 \text{ kgSVT}/dia$$

$$SVT_{mensal} = 2,331 \times 30 \text{ dias} = 69,93 \text{ kgSVT}/mês$$

$$SVT_{anual} = 2,331 \times 365 \text{ dias} = 850,815 \text{ kgSVT}/ano$$

Segundo Ferreira (2015), 1000 kg de sólidos voláteis produz em média um volume de 400 m³ de CH₄ em CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão). Portanto calcula-se a PDM (Produção Diária de Metano), conforme equações abaixo:

$$1000 \text{ kgSVT} \rightarrow 400 \text{ m}^3 \text{ de metano}$$

$$2,331 \text{ kgSVT} \rightarrow PDM \text{ m}^3 \text{ de metano}$$

$$Produção Diária Metano (PDM) = \frac{2,331 \times 400}{1000} \rightarrow PDM = \frac{0,932 \text{ m}^3}{dia}$$

$$Produção Mensal Metano (PMM) = 0,932 \times 30 \text{ dias} \rightarrow PMM = \frac{27,968 \text{ m}^3}{mês}$$

$$Produção Anual Metano (PAM) = 0,932 \times 365 \text{ dias} \rightarrow PAM = \frac{340,180 \text{ m}^3}{ano}$$

5.7 Equivalência energética do metano – energia elétrica

O comparativo energético elétrico do metano foi realizado com referências em consumos mensais residenciais e não industriais devido a quantidade estimada de metano produzido pelo biodigestor não ser tão expressiva a ponto de suprir de forma significativa uma demanda energética industrial.

O metano em CNTP tem um PCI (Poder Calorífico Inferior) de 9,9 kWh/m³ (COLDEBELLA *et al.*, 2006), portanto:

$$1\text{m}^3 \text{ de metano} \rightarrow 9,9 \text{ kWh}$$

$$0,932\text{m}^3 (\text{PDM} - \text{produção diária metano}) \rightarrow X \text{ kWh}$$

$$X = 9,2268 \text{ kWh/dia}$$

Como a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica com grupos geradores (motores ciclo Otto) é de aproximadamente 25% (CCE, 2000), a produção real de energia é equivalente a:

$$X_f = 9,2268 \times 0,25$$

$$X_f = 2,307 \text{ [kWh/dia]}$$

$$\text{Equivalente energético elétrico diário} = 2,307 \text{ kWh/dia}$$

$$\text{Equivalente energético elétrico mensal} = 2,307 \times 30 \text{ dias} = 69,21 \text{ kWh/mês}$$

$$\text{Equivalente energético elétrico anual} = 2,307 \times 365 = 842,055 \text{ kWh/ano}$$

De acordo com o estudo realizado pelos alunos da Universidade Federal de Santa Catarina (FEDRIGO *et al.*, 2022) o consumo médio de energia elétrica nas residências brasileiras equivale a 152,2 kWh/mês.

$$69,21 \div 152,2 = 0,45481 = 45,481\%$$

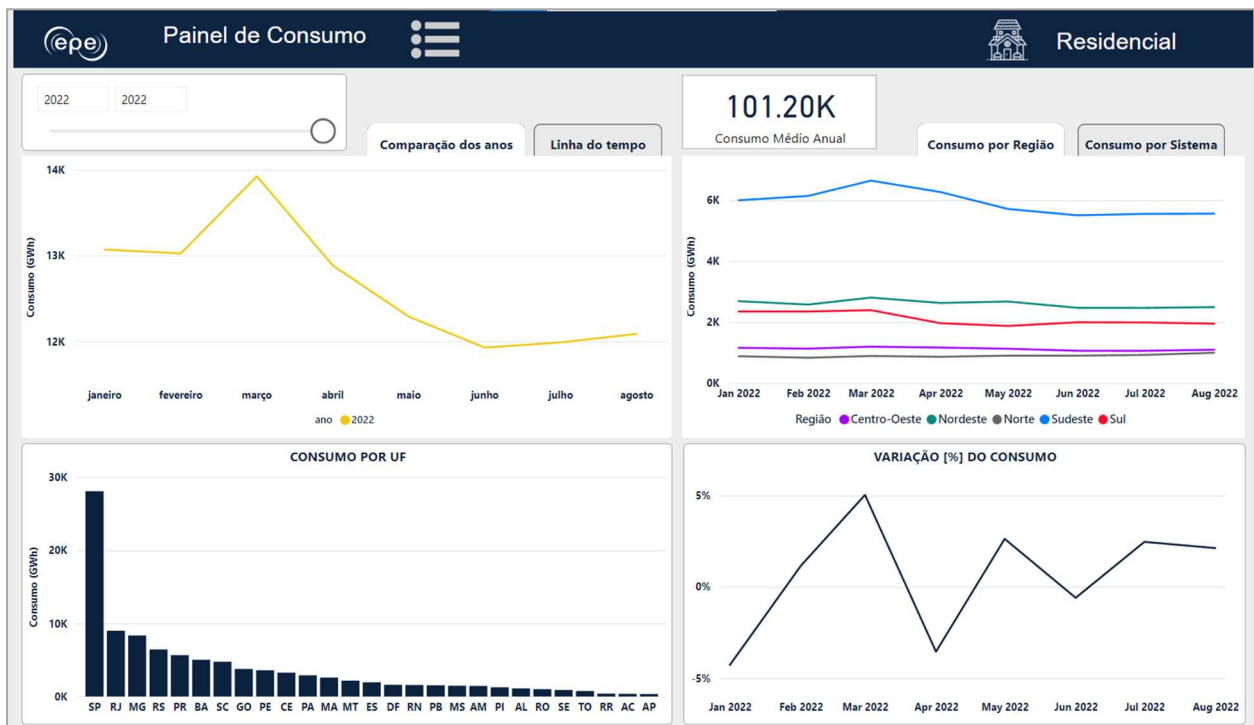
$$30 \text{ dias} \rightarrow 100\% \text{ mês}$$

$$X \text{ dias} \rightarrow 45,481\% \text{ mês}$$

$$X = 14 \text{ dias}$$

Com a produção estimada de 69,21 kWh por mês seria possível suprir a demanda de 1 residência por um período aproximado de 14 dias. Interpreta-se que esta perspectiva de 14 dias pode variar de acordo com a região e com o estado devido a variação no consumo de energia elétrica conforme evidenciado na figura 8, relatório de Power BI (Microsoft) disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022)

Figura 8 - Painel de consumo de energia elétrica residencial no Brasil



Fonte: (EPE, 2022).

5.8 Características do reator

Optou-se por um reator de corpo cilíndrico de polietileno de 3.000 litros devido a facilidade de encontrar tanques cilíndricos no mercado varejista e pela facilidade de encontrar fórmulas e métodos para o cálculo geométrico de estruturas cilíndricas. A cor escolhida preferencialmente deve ser preta para que o reator absorva o máximo da

radiação solar durante o dia e consiga manter a operação na faixa de temperatura mesofílica (25°C – 40°C) durante o período noturno (NUHU et al., 2021).

5.8.1 Volume do reator

Foram considerados 2 tipos específicos de volume para o reator: o volume operacional (Vop) e o volume total (Vtot).

Conforme o estudo de (Camila Marçal, 2016), os seguintes autores adotaram valores diferentes de densidade para os resíduos alimentares:

De acordo com Tchobanoglous e Vigil (1993), a massa específica do resíduo orgânico varia entre 131,0 kg/m³ e 481,0 kg/m³, sendo 291,0 kg/m³ um valor típico. Os estudos de Tavares (2011) indicaram um valor de 504,70 kg/m³ para esta propriedade do resíduo orgânico e, Albertoni (2013), 481,56 kg/m³. (CAMILA MARÇAL, 2016)

Portanto, aplica-se uma média, entre os valores adotados pelos autores anteriormente citados, de 399,6 kg/m³.

$$Média = [(131 + 481 + 504,7 + 481,56) \div 4]$$

$$Média = (1598,26 \div 4)$$

$$Média = 399,6 \text{ kg/m}^3$$

Para os seguintes cálculos, adotou-se o valor de 399,6 kg/m³ para a densidade de resíduos alimentares, portanto a quantidade de 10,16 kg de resíduos alimentares equivale a um volume de 0,0254254 m³.

$$399,6 \text{ kg} \text{ à } 1\text{m}^3$$

$$10,16 \text{ kg} \text{ à } X\text{m}^3$$

$$X = 0,0254254 \text{ m}^3$$

Contudo, o valor de 10,16 é uma média baseada na produção de resíduos alimentares no ano de 2022 e este número pode sofrer alterações, por este motivo um

fator de segurança deve ser levado em conta uma vez que a geração dos resíduos dispare em algum mês, por exemplo por motivos de contratação de mais funcionários. Diante do exposto, considera-se um fator de segurança de 2,0.

$$\text{Volume Resíduo Alimentar} = 0,0254254 \text{ m}^3 \times 2,0 \text{ (fator segurança)}$$

$$\text{Volume Resíduo Alimentar} = 0,0508 \text{ m}^3$$

$$399,6 \text{ kg} \text{ à } 1 \text{ m}^3$$

$$X \text{ kg} \text{ à } 0,0508 \text{ m}^3$$

$$X = 20,320 \text{ kg}$$

Ou seja, o volume calculado para o reator pode atender a demanda de resíduos alimentares do restaurante até uma média diária de 20,320 kg.

Respeitando a proporção calculada na etapa de pré-tratamento (1:0,67), é necessário adicionar:

$$1 \text{ kg Resíduo Alimentar} \rightarrow 0,67 \text{ L água}$$

$$20,320 \text{ kg Resíduo Alimentar} \rightarrow X \text{ L água}$$

$$X = 13,614 \text{ L água} \rightarrow \text{Volume água} = 0,0136 \text{ m}^3$$

5.8.2 Volume operacional (Vop)

$$(Vop) = Sd \times HRT \quad \text{Equação (1)}$$

Entende-se por Sd (entrada diária de substrato) o equivalente ao volume de resíduo alimentar + volume água pois foram as matérias-primas adicionadas diariamente no reator, portanto $Sd = (\text{Volume Resíduo Alimentar} + \text{Volume Água})$

$$Sd = (\text{Volume Resíduo Alimentar} + \text{Volume Água}) \quad \text{Equação (8)}$$

$$Sd = 0,0508 + 0,0136$$

$$Sd = 0,0644 \text{ m}^3$$

$$Vop = Sd \times HRT$$

Para definição do HRT, conforme abordado no estudo de (KEVIN AND SULEIMAN et al., 2018) um período aceitável está entre 15 a 40 dias. Foi considerado uma média desse período e os cálculos seguiram com o valor de 28 dias para o HRT.

$$V_{op} = 0,0644 \times 28 \text{ dias}$$

$$V_{op} = 1,805 \text{ m}^3$$

5.8.3 Volume total (V_{tot})

O volume total do digestor é sempre maior que o volume operacional pois considera um espaço a mais para a ascensão do biogás e geração do biofertilizante (NUHU et al., 2021) e para tanto uma margem de segurança superior a 20% é considerada para garantir a volatilidade do biogás (MOSET et al., 2015).

$$V_{tot} = V_{op} \div 0,8$$

Equação (2)

$$V_{tot} = 1,805 \div 0,8$$

$$V_{tot} = 2,256 \text{ m}^3$$

Onde: V_{tot} = Volume total (m^3).

5.8.4 COV

Descreve a quantidade de substrato afluyente introduzido por volume de reator em determinado tempo. A medida do substrato pode ser dada pela DQO, ST ou STV (Camila Marçal, 2016)

$$COV = SVT \div V_{tot}$$

Equação (10)

$$COV = 2,331 \div 2,256$$

$$COV = 1,033244 \text{ kg/m}^3 \times \text{dia}$$

Onde: COV = Carga orgânica volumétrica ($\text{kg/m}^3 \times \text{dia}$);

SVT = Sólidos voláteis totais (kgSVT/dia).

O valor obtido está de acordo com Zhang et al., 2006, que sugere que reatores operados em via úmida esteja com a COV entre 1 e 4.

5.8.5 GPR

Esse parâmetro indica a taxa de produção do biometano em razão do volume do reator.

$$GPR = PDM \div V_{tot} \quad \text{Equação (11)}$$

$$GPR = 0,932 \div 2,256$$

$$GPR = 0,41312 [(m^3 \text{ de metano} / \text{dia}) / m^3 \text{ reator}]$$

Ou seja, a cada 1 m³ do meu reator, equivale a produção de 0,41312 m³ de biometano diariamente.

Este não é um parâmetro muito intuitivo, entretanto é calculado como fonte de informação técnica adicional ao projeto.

5.9 Consumo Diário de Biogás

Segundo informações fornecidas no manual da empresa BGS Equipamentos para biogás, um fogão para uso de biogás com queimador duplo possui uma taxa de consumo de 0,45 m³/h de biogás por queimador. Com o volume de 0,932 m³ de biometano produzidos diariamente, é possível estimar a quantidade de horas que o queimador do fogão permanecerá aceso utilizando como fonte combustível o gás biometano gerado no reator.

$$1 \text{ hora} \rightarrow \text{consome } 0,45 m^3 \text{ de biometano}$$

$$X \text{ hora} \rightarrow \text{consome } 0,932 m^3 \text{ de biometano}$$

$$X = (0,932 \times 1) \div 0,45$$

$$X = 2 \text{ horas aproximadamente}$$

Ou seja, com a produção diária de biometano, 1 fogão com queimador duplo conseguirá permanecer com a chama acesa durante 2 horas por dia, somente utilizando como fonte combustível o biometano proveniente do biodigestor.

Segundo informações cedidas pela empresa (Ultragaz, 2022), pode-se calcular a quantidade volumétrica que há em um botijão de gás GLP P45:

$1\text{m}^3 \text{ GLP} = 2,50 \text{ kg GLP}$ (Densidade de $2,50 \text{ kg/m}^3$ - informação cedida pela Ultragaz)

$X \text{ m}^3 = 45 \text{ kg GLP}$ (peso do botijão P45)

$$X \times 2,50 = 1 \times 45$$

$$X = 45 \div 2,5$$

$X = \text{Densidade Média GLP} = 18 \text{ m}^3$ de GLP contém um botijão P45.

O custo de cada botijão P45 de GLP é de aproximadamente R\$ 470,00, informação cedida pelo Restuarante.

$$18 \text{ m}^3 = \text{R\$ } 470$$

$$1 \text{ m}^3 = \text{R\$ } X$$

$$X = 470 \div 18$$

$$X = 26$$

Isto significa que a cada 1m^3 de GLP utilizado pelo restaurante, gera um custo de 26 reais.

$$\text{Considerando a produção mensal de metano} = \text{PMM} = \frac{27,968 \text{ m}^3 \text{ de metano}}{\text{mês}}$$

Então:

$$1 \text{ botijão P45 GLP} = 18\text{m}^3$$

$$X \text{ botijão P45 GLP} = 27,968 \text{ m}^3 = \text{aproximadamente } 28 \text{ m}^3$$

$$X = 28 \div 18$$

$$X = \text{Conversão Biometano para P45} = 1,55$$

Ou seja, com a produção estimada de aproximadamente 28 m^3 de biometano por mês, será capaz de substituir aproximadamente 1 botijão e meio de P45.

Como 1 botijão GLP P45 = R\$ 470, então:

$$1,55 \text{ botijão GLP P45} * \text{R\$ } 470 = \text{Economia Estimada} = \text{R\$ } 731 \text{ reais.}$$

A produção estimada de biometano mensal corresponde a uma economia mensal de aproximadamente 731 reais.

Devido a densidade do biometano ser inferior ao do GLP, para um mesmo volume ocupado dentro do cilindro / botijão, tem-se pesos diferentes:

$$1 \text{ m}^3 \text{ de metano} = 0,66 \text{ kg}$$

$$18 \text{ m}^3 \text{ de metano} = X \text{ kgs}$$

$$X = 18 \times 0,66$$

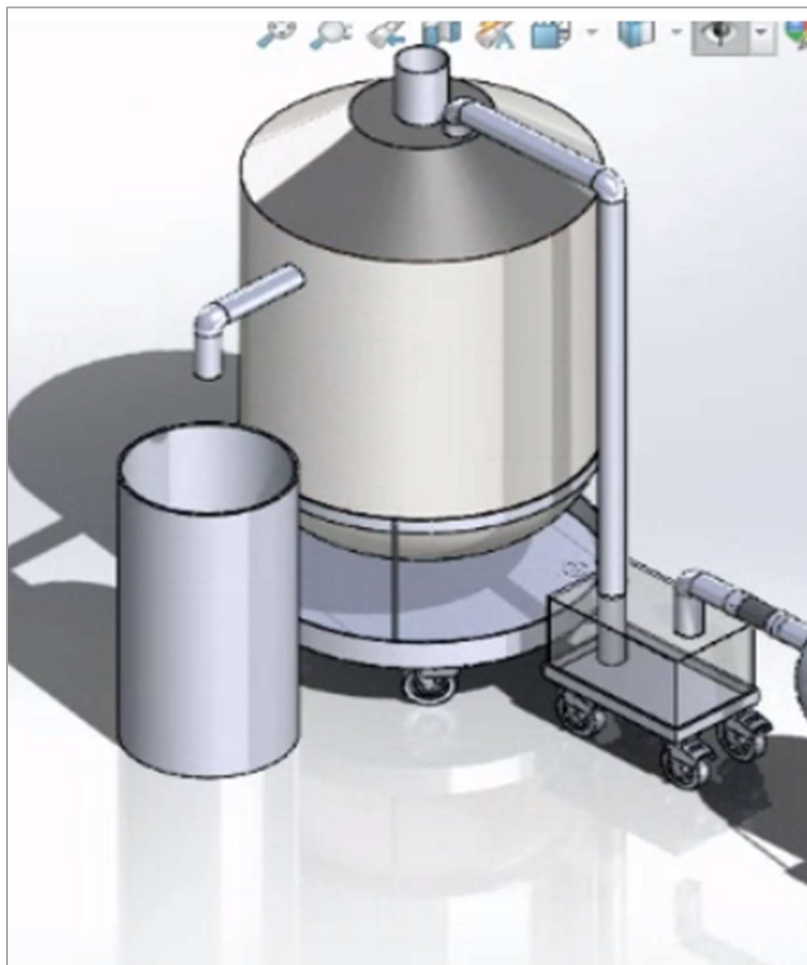
$$X = 11,88 \text{ kg}$$

Ou seja, 1 botijão GLP P45 pesa 45 kg, preenchendo o mesmo botijão de biometano o peso seria equivalente a aproximadamente 12 kg.

5.10 Representação Biodigestor – SolidWorks

Uma ilustração simplificada do biodigestor e das etapas de pós tratamento podem ser visualizadas na figura 9. A ilustração foi construída utilizando o software de engenharia SolidWorks.

Figura 9 - Representação simplificada do biodigestor

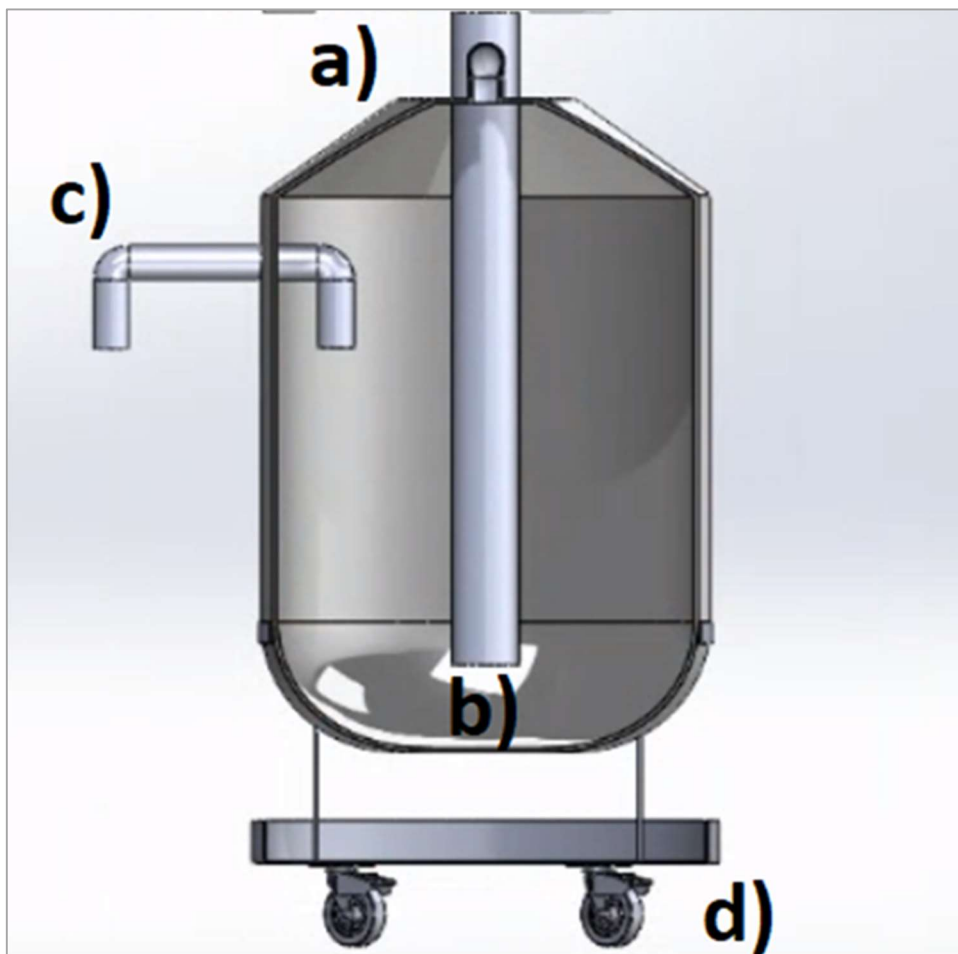


Fonte: autoria própria.

Uma vista em corte do reator está representada na figura 10, onde há uma divisão em 4 partes:

- a) Tubo com saída do biogás (parte superior do reator);
- b) Tubo para entrada do substrato;
- c) Canalização com registro para regular a saída do biofertilizante;
- d) Sistema móvel com rodas para facilitar a logística e a movimentação.

Figura 10 - Representação dos sistemas do reator



Fonte: autoria própria.

A tubulação responsável por guiar o biogás adiante é acoplada diretamente à primeira etapa do pós tratamento (Chips de Ferro). Conforme tubulação destacada na figura 11, esse tubo contém palhas de aço internamente.

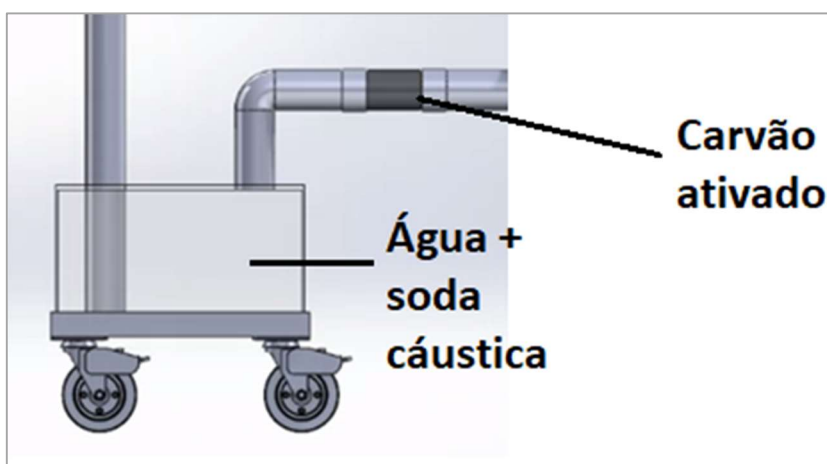
Figura 11 - Identificação no SolidWorks da tubulação contendo chips de ferro (1ª etapa de pós tratamento)



Fonte: autoria própria.

Após a primeira etapa de pós tratamento a tubulação segue para o recipiente com água e soda cáustica (2ª etapa pós tratamento) e depois passa pelo último estágio de filtragem que é a tubulação acoplada com cartuchos de carvão ativado figura 12.

Figura 12 - Representação no SolidWorks para a segunda e terceira etapa de pós tratamento



Fonte: autoria própria.

5.11 Desenvolvimento – Calculadora Biometano

Com o objetivo de deixar um legado deste trabalho, desenvolveu-se uma calculadora de biometano para que ela possa auxiliar futuros estudos e projetos na área dos biodigestores.

A ferramenta utilizada para a construção da calculadora foi o Microsoft Excel 365.

5.11.1 Método de monitoramento

Para a elaboração de um controle de monitoramento, o presente estudo considerou um método que conseguisse unir uma ferramenta prática, acessível e de baixo custo, então a planilha do Excel foi escolhida como ferramenta para implementação dos dados de monitoramento, controle e gestão do processo de biodigestão.

Como este trabalho é de caráter teórico, os dados de monitoramento apresentados na tabela são fictícios e tiveram como objetivo ilustrar um cenário real de monitoramento dos parâmetros operacionais do biodigestor e do processo de biodigestão.

5.11.2 Planilha – “MonitoramentoTecnico”

Esta planilha foi elaborada com o objetivo de manter o controle das variáveis do processo e exibi-los no formato de gráfico na planilha Dashboard. Com a informação gráfica desses valores é possível identificar se há algum *gap* no processo, ou seja, tanto o pH como a temperatura são parâmetros que influenciam diretamente na produção do biometano, então valores fora da faixa ideal precisam ser notados com antecedência e de forma prática. Em razão disso, o cabeçalho da tabela teve o layout elaborado conforme a figura 13.

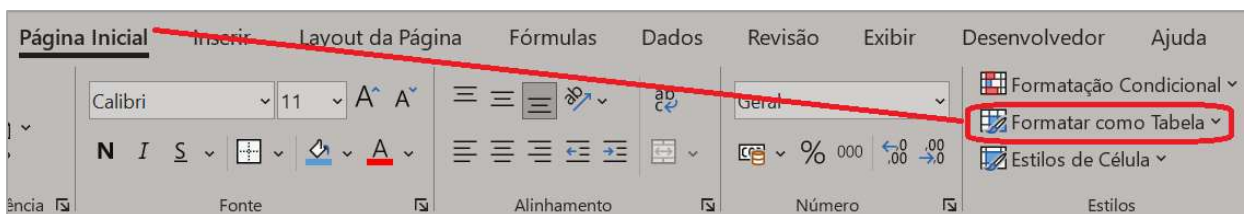
Figura 13 - Planilha de monitoramento

PLANILHA PARA CONTROLE E MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO									
Data	▼	Temperatura (°C)	▼	Templdeal (°C)	▼	pH	▼	pHIdeal	▼

Fonte: autoria própria.

É importante manter a formatação como tabela para que os novos dados adicionados na planilha sejam considerados nos relatórios do Dashboard. Para realizar essa configuração, utiliza-se a ferramenta do Excel “Formatar como Tabela”, que está acessível na guia Página Inicial, assim como é possível observar na figura 14.

Figura 14 - Instrução para formatar como tabela no Excel



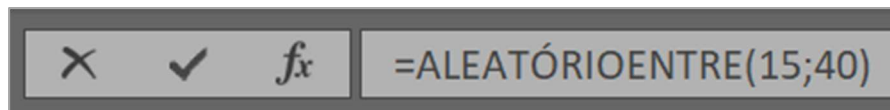
Fonte: autoria própria.

Data – é a data em que foi inserido os dados. Como este estudo consiste em um modelo teórico, foram inseridas datas com intervalos de 7 dias (01/jan – 07/jan – 21/jan – 28/jan...) exemplificando que os dados adicionados na planilha fossem extraídos semanalmente.

Temperatura (°C) – o preenchimento dos campos de temperatura foi realizado utilizando a fórmula ALEATÓRIOENTRE(15;40), como é demonstrado na figura 15.

O valor 15 simboliza o menor número e 40 o maior número, então o Excel definiu medições de temperatura aleatoriamente entre os valores de 15°C e 40°C, simulando as medições semanais em graus Celsius.

Figura 15 - Demonstração da fórmula ALEATÓRIOENTRE

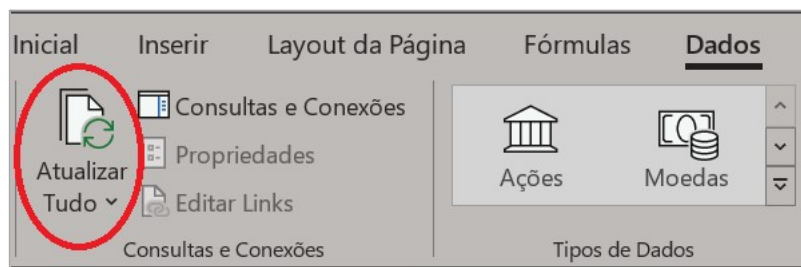


Fonte: autoria própria.

Toda vez que essa fórmula está ativa, ao clicar em atualizar tudo, que foi demonstrado na figura 16, os valores são novamente sorteados e modificados, então é

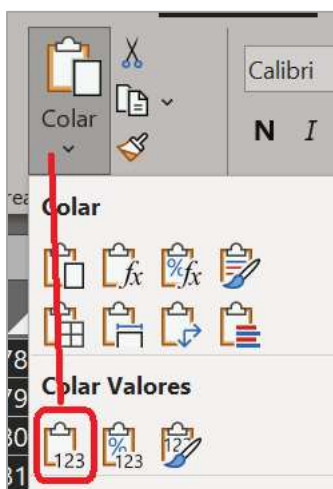
importante que após a aplicação da fórmula os números sejam convertidos como valores, conforme foi mencionado na figura 17, seleciona as células em que a fórmula está aplicada, pressiona CTRL+C e cola como valores.

Figura 16 - Ferramenta utilizada para atualizar o dashboard



Fonte: autoria própria.

Figura 17 - Ferramenta utilizada para retirar fórmulas e colar como valores



Fonte: autoria própria.

Templdeal (°C): A temperatura ideal foi definida em 28°C, que é uma faixa dentro da temperatura mesofílica (15°C – 40°C). É também uma faixa de temperatura comum de se registrar em muitas regiões do Brasil (BrasilEscola, 2022)

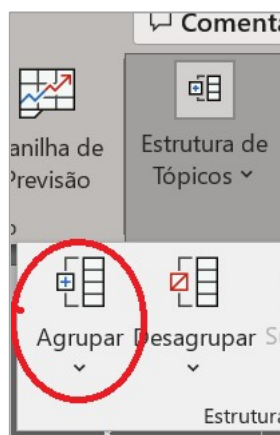
pH: o preenchimento dos campos de pH foi realizado utilizando a fórmula ALEATÓRIOENTRE(4;9).

04 simboliza o menor número (pH ácido) e 09 o maior número (pH alcalino), então o Excel definiu medições de pH aleatoriamente entre os valores de 04 e 09, simulando as medições semanais.

pH_{Ideal}: Com base nas literaturas apresentadas no referencial bibliográfico deste estudo, o pH considerado ideal está entre 6,8 e 7,2. Para estabelecer um valor único de pH_{Ideal} optou-se por 7, pois está dentro da faixa ideal.

Tanto a Temp_{Ideal} quanto o pH_{Ideal} podem ser ocultados da planilha para deixá-la com menos informações, visto que esses valores ideais não irão sofrer alterações com o passar do tempo. A ferramenta “Agrupar”, indicada na figura 18, foi utilizada para ocultar as duas colunas (Temp_{Ideal} e pH_{Ideal}).

Figura 18 - Ferramenta de agrupamento de colunas



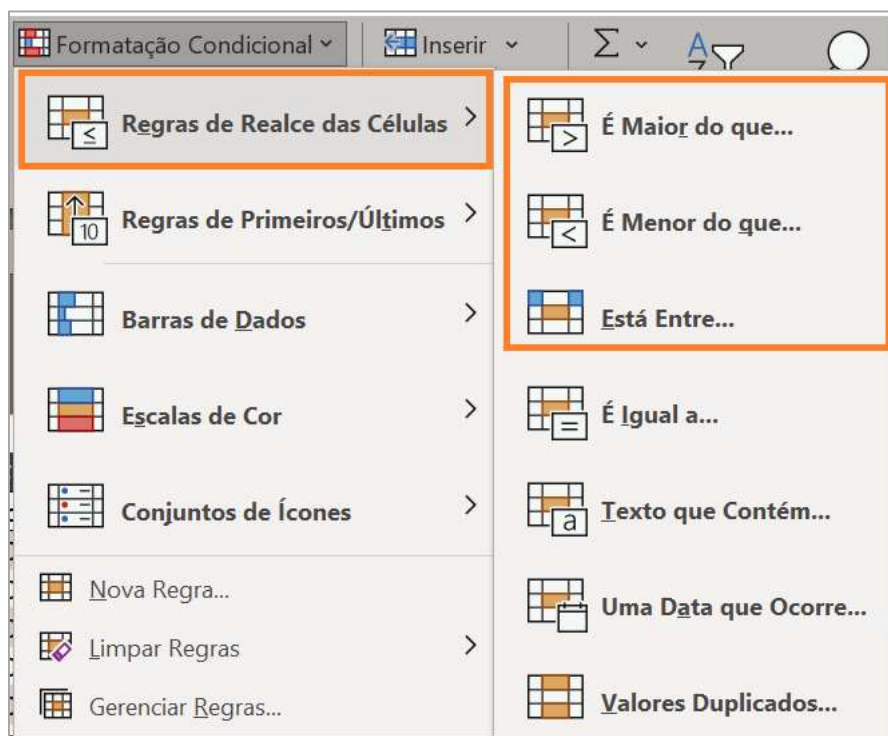
Fonte: autoria própria.

Com essa ferramenta aplicada, é possível ocultar e mostrar de forma mais prática, clicando nos botões simbolizados por “+” e “-”.

5.11.3 Formatação Condicional

Nas colunas de Temperatura e pH, é possível perceber que as células estão coloridas entre verde e vermelho. Esse modelo é criado devido a formatação condicional, apresentado na figura 19, das células que fica disponível na guia “Página Inicial” > “Formatação Condicional” > “Regras de Realce das Células” > “É Maior do que...” / “É Menor do que...” / “Está Entre...”.

Figura 19 - Ferramenta para inserir formatação condicional



Fonte: autoria própria.

A cor verde simboliza que os valores inseridos para a temperatura e o pH estão dentro da faixa boa de operação baseado nos valores que a literatura orienta e a cor vermelha simboliza que os valores medidos estão fora da faixa boa de operação, colocando em risco a eficiência de produção do biogás, isto é:

Temperatura entre 25 – 40 graus Celsius – COR VERDE

Temperatura inferior a 25°C – COR VERMELHA

pH entre 6 e 7 – COR VERDE

pH abaixo de 6 – COR VERMELHA

pH acima de 7 – COR VERMELHA

Por mais que a literatura oriente que até 7,2 o pH é considerado ideal, o Excel através da fórmula ALEATÓRIOENTRE não permite inserir números com casas decimais, apenas números inteiros, por este motivo o número maior após o 7 será imediatamente o 8, que está fora da faixa ideal e precisa ser simbolizado com a cor vermelha, assim como na figura 20.

Figura 20 - Gerenciador de regras da formatação condicional

Regra (aplicada na ordem mostrada)	Formato	Aplica-se a
Valor da Célula > 40	AaBbCcYyZz	= \$C\$4:\$C\$99
O valor da célula está entre 25 e 40	AaBbCcYyZz	= \$C\$4:\$C\$99
Valor da Célula < 25	AaBbCcYyZz	= \$C\$4:\$C\$99
O valor da célula está entre 6 e 7	AaBbCcYyZz	= \$E\$4:\$E\$99
Valor da Célula > 7	AaBbCcYyZz	= \$E\$4:\$E\$99
Valor da Célula < 6	AaBbCcYyZz	= \$E\$4:\$E\$99

Fonte: autoria própria.

5.12 Layout da calculadora

O processo de biodigestão é complexo e muitas equações são necessárias para quantificar os parâmetros técnicos e operacionais. Portanto a elaboração de uma ferramenta capaz de agregar agilidade e dinamismo aos cálculos foi desenvolvida, a Calculadora do Projeto.

Com um layout simples demonstrado na figura 21, essa ferramenta realizou os cálculos dos parâmetros do projeto mediante os valores que foram considerados nas células de dados de entrada.

Figura 21 - Layout da calculadora do projeto

CALCULADORA DE BIOGÁS		Produção Estimada Biometano	27,968	m ³ CH ₄ /Mês	Tempo para o projeto ser pago	1,712	Anos	% Mensal Consumo Na Cozinha	GLP	92,23	%
Economia Estimada Após Instalação do Biodigestor		R\$	730,29	/mês				Biometano	7,77	%	
IR PARA O DASHBOARD											
DADOS DE ENTRADA				DADOS DE SAÍDA				DADOS DO REATOR			
Produção Diária Substrato				Carga Sólida Total (CST)				Volume Operacional			
10,160 kg/dia				2,550 kg/dia				1,805 m ³			
Proporção (WF:H ₂ O) 1:				Sólidos Voláteis Totais				Volume Total			
0,67 Adimensional				2,331 kg SVT/dia				2,256 m ³			
TDH (Tempo Detenção Hidráulica)				Necessário Adicionar Água				Capacidade Massa Add WF			
28 Dias				6,807 Litros/dia				20,320 kg/dia			
Eficiência Motogerador				Massa Total Abastecimento Reator				Capacidade Litros Add Água			
25 %				17,001 kg/dia				13,614 Litros/dia			
Consumo Mensal Eletricidade Residência				Potencial Energético				Capacidade Massa Total Add			
152,2 kWh/mês				9,230 kWh/dia				33,934 kg/dia			
Consumo de GLP no Restaurante				Conversão Através Motogerador				COV			
20 Botijões / mês				2,307 kWh/dia				1,033 kg/m ³ *dia			
Custo de GLP na sua Cidade				Capaz de Suprir Eletricidade na Residência				Gas Production Rate			
470 R\$/unidade				13,644 Dias				0,413 [(m ³ CH ₄ / dia) /			
Taxa Consumo Fogão				Despesa GLP Sem Biodigestor							
0,45 m ³ /hora				9.400,00 R\$							
Valor Investimento no Biodigestor (Budget)				Despesa GLP Com Biodigestor							
R\$ 15.000,00 Reais				8.669,71 R\$							
				Biometano Capaz de Suprir Fogão De 2 Bocas Aceso Por							
				2,072 Horas / Dia							

Fonte: autoria própria.

Basicamente a calculadora foi projetada contendo 4 regiões distintas, conforme divisão em quadrantes representada na figura 22.

1ª Região: Dados principais

2ª Região: Dados de entrada

3ª Região: Dados de saída

4ª Região: Dados do reator

Figura 22 - Distribuição das quatro regiões da calculadora do projeto

CALCULADORA DE BIOGÁS

1ª região

Produção Estimada Biometano: 27,968 m³CH₄/Mês

Economia Estimada Após Instalação do Biodigestor: R\$ 730,29 /mês

Tempo para o projeto ser pago: 1,712 Anos

% Consumo Na Cozinha: GLP 92,23%, Biometano 7,77%

2ª região

DADOS DE ENTRADA

Produção Diária Substrato: 10,160 kg/dia

Proporção (WF:H₂O): 0,67 Adimensional

TDH (Tempo Detenção Hidráulica): 28 Dias

Eficiência Motogerador: 25 %

Consumo Mensal Eletricidade Residência: 152,2 kWh/mês

Consumo de GLP no Restaurante: 20 Botijões / mês

Custo de GLP na sua Cidade: 470 R\$/unidade

Taxa Consumo Fogão: 0,45 m³/hora

Valor Investido no Biodigestor: R\$ 15.000,00 Reais

3ª região

DADOS DE SAÍDA

Carga Sólida Total (CST): 2,55016 kg/dia

Sólidos Voláteis Totais: 2,330704 kg SVT/dia

Necessário Adicionar Água: 6,8072 Litros/dia

Massa Total Abastecimento Reator: 17,00106667 kg/dia

Potencial Energético: 9,230 kWh/dia

Conversão Através Motogerador: 2,307 kWh/dia

Capaz de Suprir Eletricidade na Residência: 13,644 Dias

Despesa GLP Sem Biodigestor: 9.400,00 R\$

Despesa GLP Com Biodigestor: 8.669,71 R\$

Biometano Capaz de Suprir Fogão De 2 Bocas Aceso Por: 2,072 Horas / Dia

4ª região

DADOS DO REATOR

Volume Operacional: 1,805027 m³

Volume Total: 2,256 m³

Capacidade Massa Add WF: 20,320 kg/dia

Capacidade Litros Add Água: 13,614 Litros/dia

Capacidade Massa Total Add: 33,934 Litros/dia

COV: 1,033 kg/m³*dia

Gas Production Rate: 0,413 [(m³ CH₄ / dia) / m³ reator]

Fonte: autoria própria.

1ª Região figura 23: Neste quadrante foram considerados os cálculos para a produção estimada de biometano, Economia Estimada Após Instalação do Biodigestor, Tempo para o projeto ser pago (*payback*) e o % Consumo Na Cozinha.

Figura 23 - Primeira região

CALCULADORA DE BIOGÁS

Produção Estimada Biometano: 27,968 m³CH₄/Mês

Economia Estimada Após Instalação do Biodigestor: R\$ 730,29 /mês

Tempo para o projeto ser pago: 1,712 Anos

% Consumo Na Cozinha: GLP 92,23%, Biometano 7,77%

Fonte: autoria própria.

2ª Região figura 24: Esse quadrante foi projetado pensando nas informações que são necessárias para iniciar o projeto. É somente nesta região que os dados foram

inseridos manualmente, para as demais células da calculadora, o preenchimento é automático baseado em fórmulas de Excel que foram referenciadas mediante os cálculos e literaturas apresentadas no TCC.

Figura 24 - Segunda região

DADOS DE ENTRADA		
Produção Diária Substrato	10,160	kg/dia
Proporção (WF:H2O) 1:	0,67	Adimensional
TDH (Tempo Detenção Hidráulica)	28	Dias
Eficiência Moto gerador	25	%
Consumo Mensal Eletricidade Residência	152,2	kWh/mês
Consumo de GLP no Restaurante	20	Botijões / mês
Custo de GLP na sua Cidade	470	R\$/unidade
Taxa Consumo Fogão	0,45	m³/hora
Valor Investimento no Biodigestor	R\$ 15.000,00	Reais

Fonte: autoria própria.

Não há obrigatoriedade em preencher todos os campos disponíveis, entretanto o não preenchimento de alguma célula desse quadrante (ou se preenchida com valor zero) resulta no preenchimento de algum campo dos demais quadrantes com valores de erro ou valores nulos, como visto na figura 25.

Figura 25 - Correlação entre os dados de entrada e saída

Eficiência Moto gerador 0	%	Massa Total Abastecimento Reator 17,00106667	kg/dia
Consumo Mensal Eletricidade Residência 0	kWh/mês	Potencial Energético 9,230	kWh/dia
Consumo de GLP no Restaurante 20	Botijões / mês	Conversão Através Moto gerador 0,000	kWh/dia
Custo de GLP na sua Cidade 470	R\$/unidade	Capaz de Suprir Eletricidade na Residência #DIV/0!	Dias

Fonte: autoria própria.

A última célula de entrada é o Valor Investimento no Biodigestor que corresponde ao valor que há disponível para ser investido no equipamento. Há muitas opções no mercado cujos preços podem variar muito dependendo do tamanho, material e sensores do reator. Então, mediante ao orçamento previsto do projeto, é neste campo que a informação do *Budget* será inserida.

Os 3 primeiros campos dos dados de entrada foram formatados utilizando a ferramenta formatação condicional. Valores em verde estão dentro da faixa recomendada pela literatura e valores em vermelho não atendem os requisitos da literatura conforme exposto na revisão bibliográfica do TCC.

3ª Região: Representada pela figura 26, os dados de saída são informações que a calculadora irá fornecer após os dados de entrada serem preenchidos. Nesse quadrante foram contemplados alguns valores respectivos a informação técnica do substrato, conversão do motogerador, um comparativo da despesa considerando o consumo de GLP antes e após a implementação do biodigestor e também sua capacidade térmica medida em horas para manter um fogão de 2 bocas aceso.

Figura 26 - Terceira região

DADOS DE SAÍDA		
Carga Sólida Total (CST)	2,55016	kg/dia
Sólidos Voláteis Totais	2,330704	kg SVT/dia
Necessário Adicionar Água	6,8072	Litros/dia
Massa Total Abastecimento Reator	17,00106667	kg/dia
Potencial Energético	9,230	kWh/dia
Conversão Através Motogerador	2,307	kWh/dia
Capaz de Suprir Eletricidade na Residência	13,644	Dias
Despesa GLP Sem Biodigestor	9.400,00	R\$
Despesa GLP Com Biodigestor	8.669,71	R\$
Biometano Capaz de Suprir Fogão De 2 Bocas Aceso Por	2,072	Horas / Dia

Fonte: autoria própria.

4ª Região: Representada através da figura 27, as células destinadas para o último quadrante fornecem informações inerentes a geometria do reator e seu limite de capacidade volumétrica, considerando fatores de segurança já mostrados neste trabalho (Metodologia – a) Volume do Reator)

Figura 27 - Quarta região

DADOS DO REATOR	
Volume Operacional	1,805 m ³
Volume Total	2,256 m ³
Capacidade Massa Add WF	20,320 kg/dia
Capacidade Litros Add Água	13,614 Litros/dia
Capacidade Massa Total Add	33,934 kg/dia
COV	1,033 kg/m ³ *dia
GPR(taxa prod gas)	0,413 [(m ³ CH ₄ / dia) / m ³ reator]

Fonte: autoria própria.

5.13 Planilha “MonitoramentoOperacional”

A planilha usada como base de dados para criar o Dashboard foi a planilha MonitoramentoOperacional, que contém 10 colunas com as informações mais importantes do processo de biodigestão. O preenchimento desta tabela usou a Calculadora do Projeto para calcular os valores de Produção Biometano, Retorno Financeira, %GLP e %Biometano, e foi cadastrado a média do pH e da Temperatura com base nas informações da planilha MonitoramentoTecnico, com cabeçalho demonstrado na figura 28.

Figura 28 - Cabeçalho planilha MonitoramentoOperacional

Data	Mês	Ano	Sobra Alimentos (kg)	Produção Biometano	DespesaGLPSemBiodige	DespesaGLPComBiodige	Retorno Financeiro	%GLP	%Biometano	pH	Temp
------	-----	-----	----------------------	--------------------	----------------------	----------------------	--------------------	------	------------	----	------

Fonte: autoria própria.

Com o objetivo de destacar uma busca específica nesta planilha, foram utilizadas as ferramentas do Excel: Caixa de Listagem (Controle de Formulário) e formatação Condicional, como é apresentada na figura 29.

Ao pesquisar a data e qual o parâmetro operacional que se deseja a resposta, o Excel destaca a célula em verde com escrita em branco para melhor visualização da informação.

Figura 29 - Caixa de Listagem aplicada junto com formatação condicional

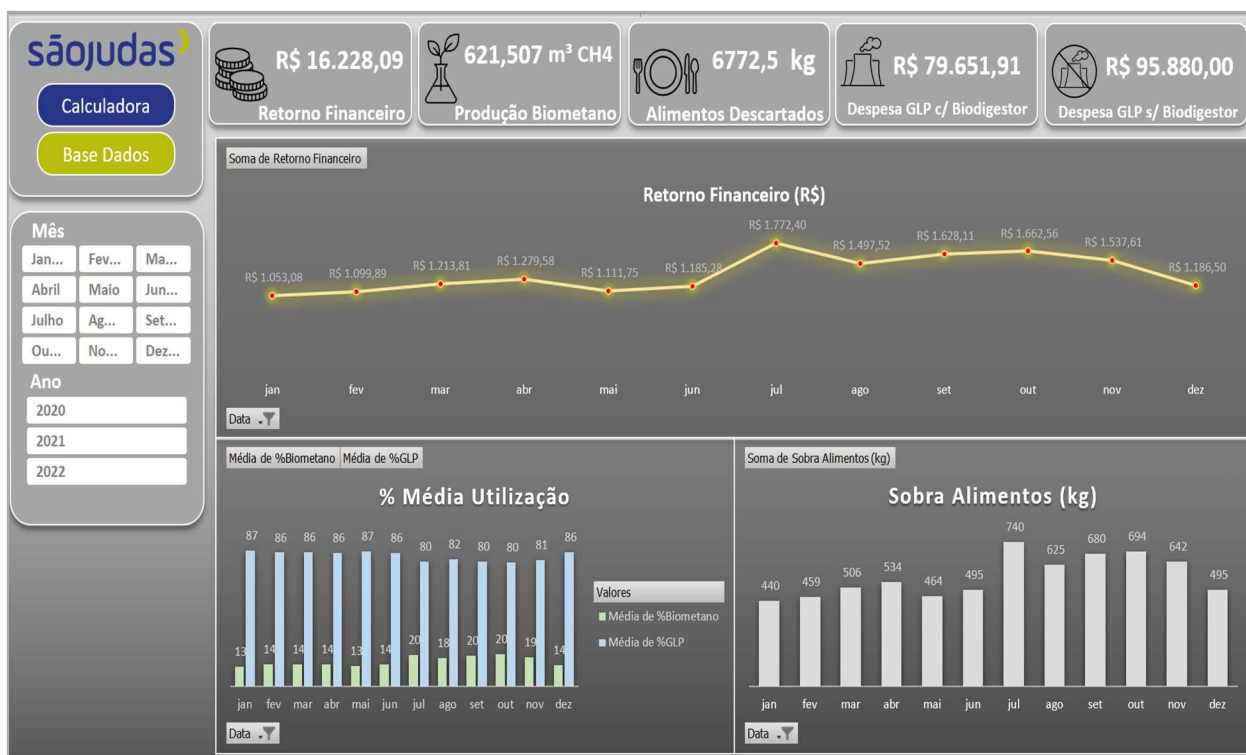
H	I	J	K	L	M	N	R	S	T
DespesaGLPComBiodige	Retorno Financeiro	%GLP	%Biometano	pH	Temp				
R\$ 1.585,30	R\$ 294,70	84,324	15,676	7,3	32,3		01/01/2020		
R\$ 1.537,64	R\$ 342,36	81,789	18,211	6,8	27,3		01/02/2020		
R\$ 1.639,93	R\$ 240,07	87,230	12,770	8,0	26,5		01/03/2020		
R\$ 1.688,08	R\$ 191,92	89,791	10,209	5,8	33,2		01/04/2020		
R\$ 1.700,30	R\$ 179,70	90,441	9,559	7,1	32,6		01/05/2020		
R\$ 1.711,80	R\$ 168,20	91,053	8,947	6,2	27,6		01/06/2020		
R\$ 1.686,77	R\$ 193,23	89,722	10,278	7,1	33,3		01/07/2020		
R\$ 1.592,49	R\$ 287,51	84,707	15,293	5,8	31,5		01/08/2020		
R\$ 1.580,50	R\$ 299,50	84,069	15,931	6,3	25,6		01/09/2020		
R\$ 1.664,36	R\$ 215,64	88,530	11,470	6,0	24,6		01/10/2020		
R\$ 1.676,34	R\$ 203,66	89,167	10,833	6,0	25,1		01/11/2020		
R\$ 1.652,38	R\$ 227,62	87,893	12,107	5,7	29,8				
R\$ 2.181,03	R\$ 168,97	92,810	7,190	6,1	23,7				
R\$ 2.120,78	R\$ 229,22	90,246	9,754	5,0	30,2				
R\$ 2.156,14	R\$ 193,86	91,751	8,249	6,8	29,5				
R\$ 2.106,91	R\$ 243,09	89,656	10,344	5,8	24,2				

Fonte: autoria própria.

5.14 Desenvolvimento Modelo Apresentação - Dashboard

O Microsoft Excel foi o software escolhido para o desenvolvimento do modelo de apresentação. Através das ferramentas de formatar como tabela e tabela dinâmica foi possível gerenciar os dados coletados com a administração do restaurante e compilar em apenas 1 painel de *Dashboard*, visto na figura 30, na aba chamada ControleDigestaoAnaerobica.

Figura 30 - Dashboard contendo o relatório gerencial do projeto



Fonte: autoria própria.

Com o objetivo de disponibilizar a calculadora do projeto e os relatórios gerenciais (planilhas e dashboard), o arquivo em Excel está disponível para download através do link: https://drive.google.com/drive/folders/1_7JjB-r4DCQBntfNpYlxSYhh6WYMLIPD?usp=sharing

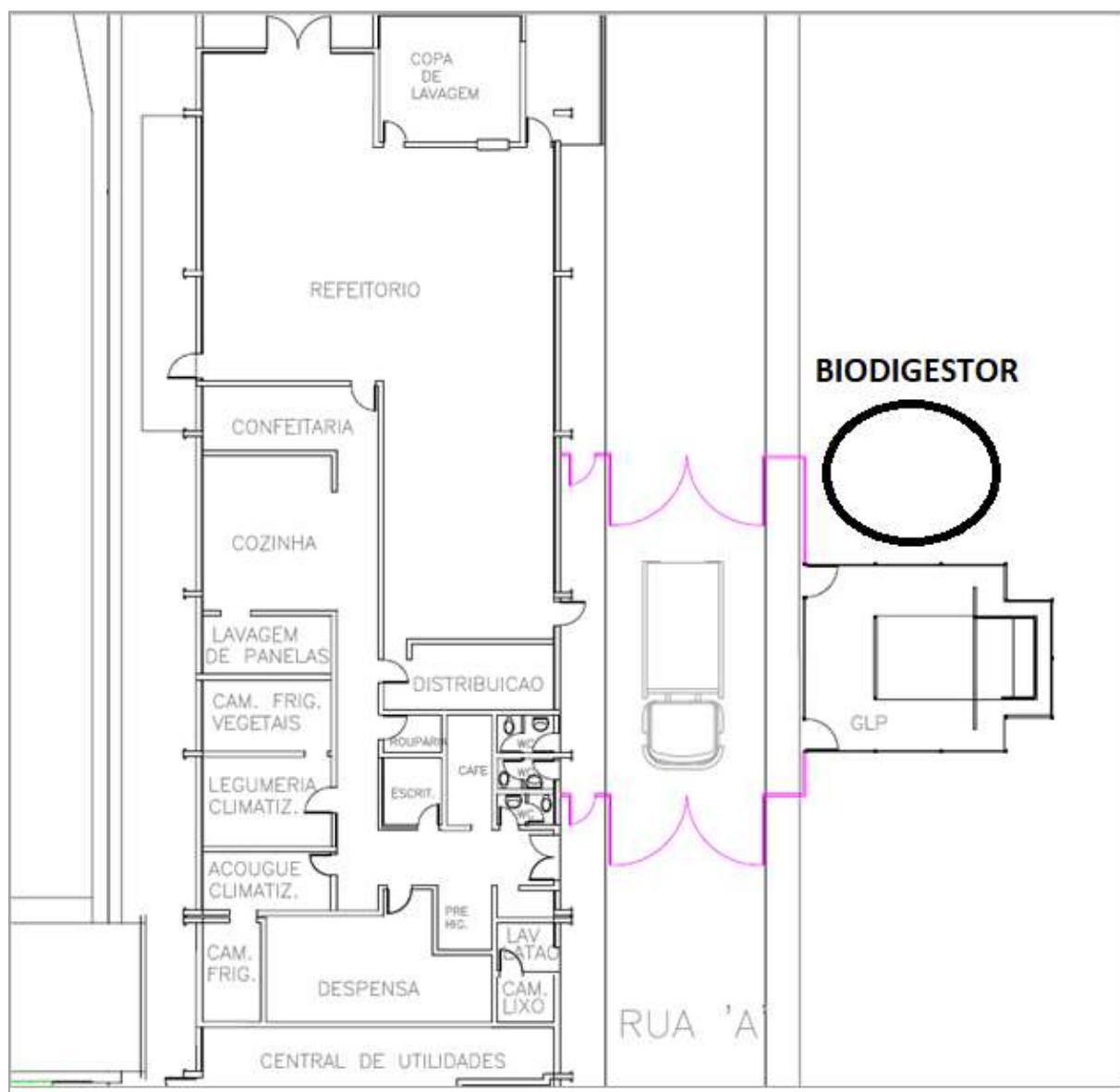
Assim, outros grupos de pesquisas sobre biodigestores que acessarem este TCC poderão utilizar a calculadora e o dashboard como auxílio para o projeto deles.

5.15 Escolha do local de instalação do biodigestor

Conforme a planta baixa cedida pelo setor de engenharia da empresa onde o restaurante está situado, foi possível sugerir um local para a instalação do biodigestor.

A figura 31 sugere o local de instalação do biodigestor próximo à região onde atualmente encontra-se o armazenamento dos cilindros GLP. A figura 32 representa o local sugerido para a instalação do biodigestor em uma perspectiva 3D.

Figura 31 - Sugestão do local de instalação do biodigestor 2D



Fonte: autoria própria

Figura 32 - Sugestão do local de instalação do biodigestor 3D (imagem disponibilizada através do Google Earth)



Fonte: autoria própria

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento deste projeto atingiu os objetivos propostos através das etapas estipuladas, sendo apresentados a seguir.

- I. Volume de produção de resíduos alimentares pelo restaurante equivale a 10,16 kg/dia, no ano referência de 2022;
Reator cilíndrico de polietileno (3.000 litros) dimensionado capaz de atender a geração de resíduos alimentares provenientes do restaurante com volume operacional (1,805 m³) e volume total (2,256 m³);
- II. Pré-tratamento definido através da adição de água calculado no formato de proporção, 0,67 litros de água a cada 1 kg de resíduo alimentar;
Pós-tratamento definido e segmentado em 3 etapas: chips de ferro, água com soda cáustica e carvão ativado;
- III. Capacidade de geração do biometano definida em 27,968 m³ CH₄/mês;
A estimativa de geração do biometano é capaz de substituir parcialmente (17%) o uso de GLP no restaurante, garantindo uma economia de R\$ 16.228,00;
- IV. Um dos legados desenvolvidos por este estudo foi a Calculadora do Projeto, ferramenta capaz de apresentar valores econômicos e operacionais do projeto de biodigestão;
Duas planilhas foram desenvolvidas para garantir a gestão de monitoramento do processo de biodigestão, as planilhas “MonitoramentoTecnico” e “MonitoramentoOperacional”;
Relatório em formato *dashboard* desenvolvido para apresentação dos principais resultados obtidos com o projeto do biodigestor.

7 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos propósitos deste TCC foi contribuir para futuras pesquisas, estudos e projetos no campo de biodigestores utilizados em restaurantes, cozinhas domésticas e bancadas experimentais. A proposta de implementação do biodigestor se mostrou eficaz financeiramente, capaz de agregar valor ao resíduo alimentar e contribuir para um maior engajamento sustentável do planeta.

Entre os desafios encontrados durante o desenvolvimento do TCC, destaca-se:

- **Escassez de informações:** Durante o desenvolvimento deste estudo foi observado uma certa dificuldade para conseguir informações confiáveis sobre biodigestores que operam com carga orgânica proveniente de restaurantes. Nota-se que a grande maioria dos estudos voltados ao processo de biodigestão têm como foco de atuação as zonas agropecuárias. Como consequência disso menos projetos e estudos são desenvolvidos para biodigestores com foco em restaurantes e as poucas empresas com *know-how* nesta área não compartilham suas informações.
- **Informações Divergentes:** muitos artigos que foram revisados para complementar o referencial teórico deste trabalho apresentavam informações divergentes, então valores apresentados nestes artigos se diferenciavam muito dependendo do autor.
- **Estudo direcionado e restrito:** pode-se considerar que não existe uma padronização na composição dos resíduos alimentares descartados diariamente pelos restaurantes, isto é, cada restaurante apresenta um cardápio próprio, baseado em seus clientes, em suas necessidades e na região onde estão localizados. Isto significa que as sobras entre os restaurantes serão de alimentos diferentes e em quantidades diferentes, podendo resultar em valores diferentes de geração do biometano.
- **Modelo não automatizado:** o modelo apresentado nesse estudo teve como referência a utilização da ferramenta Excel para o monitoramento e projeção dos dados. Deste modo, a gestão da informação foi realizada de forma manual, o que

pode resultar em algum erro de digitação e consequente estimativa incorreta nas projeções produtivas e financeiras.

No aspecto de considerações finais, alguns possíveis estudos futuros são propostos:

- **Aplicação para automóveis:** A calculadora teórica desenvolvida nesse estudo contempla projeções do potencial de biometano para duas aplicações (energia térmica e energia elétrica), então um próximo estudo poderá desenvolver cálculos teóricos que projetem o potencial do biometano em sua aplicação como combustível veicular, mostrando a autonomia conseguida pelo automóvel com a quantidade de biometano produzida pelo biodigestor.
- **Biofertilizante:** além do biometano, o biofertilizante também é um subproduto resultante da digestão anaeróbica. Futuros estudos podem focar em métodos de agregar mais valor sustentável e financeiro ao projeto baseado na comercialização do biofertilizante para o setor do agronegócio.
- **Elaboração de um desenho técnico e simulações:** o presente estudo desenvolveu uma ilustração simplificada do biodigestor e das etapas do pós-tratamento, que futuramente pode ser melhorada através do detalhamento do desenho, como a inclusão de elementos de cotas, apresentação no formato de desenho técnico e simulações fluidodinâmicas do biometano (pressão nas paredes internas do reator e cilindros de armazenagem).
- **Sensoriamento:** conforme foi apresentado neste trabalho, dois dos principais parâmetros do processo de biodigestão são a temperatura e o pH. Próximos estudos podem direcionar seus esforços no desenvolvimento, comparação e identificação de sensores ideais para a coleta desses dados.

- **Válvula Corta-Fogo:** Estudar e dimensionar um sistema capaz de inibir uma possível explosão no reator, proveniente de uma chama / fagulha vinda do fogão. Essa possibilidade existe porque o biometano atua sob baixa pressão. A etapa de pós tratamento que contém água com soda cáustica pode ser um dispositivo de sistema ante explosão, uma vez que a fagulha vinda do fogão não conseguiria chegar ao reator pois não passaria pela caixa com água e soda caustica.

8 REFERÊNCIAS

ABUDI, Z. N., HU, Z., ABOOD, A. R., *et al.* "Effects of Alkali Pre-treatment, Total Solid Content, Substrate to Inoculum Ratio, and pH on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Mango Leaves", **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 3, p. 887–897, 3 mar. 2020. DOI: 10.1007/s12649-018-0437-0. .

ACHINAS, S., ACHINAS, V., EUVERINK, G. J. W. "A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste", **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299–307, jun. 2017. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.03.002. .

ACHINAS, S., EUVERINK, G. J. W. "Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste", **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 3, p. 143–147, set. 2016a. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.08.001. .

ACHINAS, S., EUVERINK, G. J. W. "Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste", **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 3, p. 143–147, set. 2016b. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.08.001. .

ALBURQUERQUE, J. A., DE LA FUENTE, C., BERNAL, M. P. "Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils", **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 160, p. 15–22, out. 2012. DOI: 10.1016/j.agee.2011.03.007. .

ALVES, E., INOUE, K., BORGES, A. "Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais", **II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL**, dez. 2010. .

ATELGE, M. R., KRISA, D., KUMAR, G., *et al.* "Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives", **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 3, p. 1019–1040, 19 mar. 2020. DOI: 10.1007/s12649-018-00546-0. .

Biogas: a necessary solution to foster EU's energy transition | European Biogas Association. [S.d.]. Disponível em: <https://www.europeanbiogas.eu/biogas-a-necessary-solution-to-foster-eus-energy-transition/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

Biogás - CHP Brasil | Geradores a gás. [S.d.]. Disponível em: <https://chpbrasil.com.br/biogas>. Acesso em: 13 set. 2022.

BROWNE, J. D., MURPHY, J. D. "Assessment of the resource associated with biomethane from food waste", **Applied Energy**, v. 104, p. 170–177, abr. 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.017. .

BRUNO SILVEIRA, CARLOS CHERNICHARO, CAROLINA CABRAL, *et al.* **GUIA**

TECNICO DE APROVEITAMENTO ENERGETICO DE BIOGAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO. 2ª Edição ed. Brasília, [s.n.], 2017.

CHENG, X.-Y., ZHONG, C. "Effects of Feed to Inoculum Ratio, Co-digestion, and Pretreatment on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Cotton Stalk", **Energy & Fuels**, v. 28, n. 5, p. 3157–3166, 15 maio 2014. DOI: 10.1021/ef402562z. .

CHIU, S.-F., CHIU, J.-Y., KUO, W.-C. "Biological stoichiometric analysis of nutrition and ammonia toxicity in thermophilic anaerobic co-digestion of organic substrates under different organic loading rates", **Renewable Energy**, v. 57, p. 323–329, set. 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2013.01.054. .

CHRISTODOULOU, A., STAMATELATOU, K. "Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide", **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 453–462, 15 fev. 2016. DOI: 10.2166/wst.2015.521. .

CIEŚLIK, B. M., NAMIEŚNIK, J., KONIECZKA, P. "Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods", **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 1–15, mar. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.031. .

Clima brasileiro. Subdivisões do Clima brasileiro - Brasil Escola. [S.d.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/clima-brasileiro.htm>. Acesso em: 6 nov. 2022.

Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). [S.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 24 out. 2022.

CRISTINA COSTA, K., DARA PEREIRA DA SILVA, J., ROSANOVA, C. **Viabilidade da geração de energia elétrica com biogás em propriedades rurais de exploração leiteira no Tocantins.** . [S.l: s.n.], [S.d.].

D' SILVA, T. C., ISHA, A., CHANDRA, R., *et al.* "Enhancing methane production in anaerobic digestion through hydrogen assisted pathways – A state-of-the-art review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 111536, nov. 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111536. .

DA ROCHA, C. M. **PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DE RESÍDUOS ALIMENTARES.** 2016. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Juiz de Fora, 2016.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources.** 2ª ed. [S.l: s.n.], 2011.

DEV, S., SAHA, S., KURADE, M. B., *et al.* "Perspective on anaerobic digestion for

biomethanation in cold environments", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 85–95, abr. 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.034. .

Eco Circuito - Biodigestor ECO-PRO. [S.d.]. Disponível em: <https://ecocircuito.com.br/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

Eco energia do brasil - biogas e biomethano - Biometano. [S.d.]. Disponível em: <https://www.eco-energia-brasil.com/topico/biometano.html>. Acesso em: 6 nov. 2022.

ELANGO VAN, S., PANDIAN, S. B. S., S. J., G., *et al.*, "Biogas: An Effective and Common Energy Tool – Part I". [S.l.: s.n.], 2020. p. 65–104. DOI: 10.1007/978-981-13-8637-4_3.

FAN, L., ZHANG, S., ZHANG, X., *et al.* "Removal of arsenic from simulation wastewater using nano-iron/oyster shell composites", **Journal of Environmental Management**, v. 156, p. 109–114, jun. 2015. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.03.044. .

FEDRIGO, N. S., GONÇALVES, G., LUCAS, P. F. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. [S.d.]. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/480>. Acesso em: 24 out. 2022.

FERREIRA, B. O. **AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE METANIZAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES COM VISTAS AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS**. 2015. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2015.

GAUR, R. Z., SUTHAR, S. "Anaerobic digestion of activated sludge, anaerobic granular sludge and cow dung with food waste for enhanced methane production", **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 557–566, out. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.201. .

GNAOUI, Y. EI, KAROUACH, F., BAKRAOUI, M., *et al.* "Mesophilic anaerobic digestion of food waste: Effect of thermal pretreatment on improvement of anaerobic digestion process", **Energy Reports**, v. 6, p. 417–422, fev. 2020. DOI: 10.1016/j.egy.2019.11.096. .

GUARES, S. A., LIMA, J. D. de, OLIVEIRA, G. A. "Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer", **Biomass and Bioenergy**, v. 150, p. 106107, jul. 2021. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106107. .

HO, K. S., CHU, L. M. "Characterization of food waste from different sources in Hong Kong", **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 69, n. 3, p. 277–288, 4 mar. 2019. DOI: 10.1080/10962247.2018.1526138. .

HOUTMEYERS, S., DEGRÈVE, J., WILLEMS, K., *et al.* "Comparing the influence of low power ultrasonic and microwave pre-treatments on the solubilisation and semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge", **Bioresource Technology**, v. 171, p. 44–49, nov. 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.08.029. .

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2021**. [S.l: s.n.], 2021.

IOANNOU, K., TSANTOPOULOS, G., ARABATZIS, G., *et al.* "A Spatial Decision Support System Framework for the Evaluation of Biomass Energy Production Locations: Case Study in the Regional Unit of Drama, Greece", **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 531, 16 fev. 2018. DOI: 10.3390/su10020531. .

ISHA, A., D'SILVA, T. C., SUBBARAO, P. M. V., *et al.* "Stabilization of anaerobic digestion of kitchen wastes using protein-rich additives: Study of process performance, kinetic modelling and energy balance", **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125331, out. 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125331. .

ITFoods – Planejamento de Cardápio. [S.d.]. Manual-ITFoods-Planejamento-de-Cardapio.pdf. Disponível em: <https://ucr.risotolandia.com.br/wp-content/uploads/2022/08/Manual-ITFoods-Planejamento-de-Cardapio.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2022.

JEONG, J., RAMÍREZ-GÓMEZ, Á. "A Multicriteria GIS-Based Assessment to Optimize Biomass Facility Sites with Parallel Environment—A Case Study in Spain", **Energies**, v. 10, n. 12, p. 2095, 11 dez. 2017. DOI: 10.3390/en10122095. .

JESUS, R. H. G. de, SOUZA, J. T. de, PUGLIERI, F. N., *et al.* "Biodigester location problems, its economic–environmental–social aspects and techniques: Areas yet to be explored", **Energy Reports**, v. 7, p. 3998–4008, nov. 2021. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.06.090. .

JINGURA, R. M., KAMUSOKO, R. "Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: a review", **Biofuel Research Journal**, v. 4, n. 2, p. 573–586, 1 jun. 2017. DOI: 10.18331/BRJ2017.4.2.3. .

JORDÃO, E. P. "Reatores Anaeróbios", **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 239–239, set. 2007. DOI: 10.1590/S1413-41522007000300001. .

KANDA, W., ZANATTA, H., MAGNUSSON, T., *et al.* "Policy coherence in a fragmented context: the case of biogas systems in Brazil", **Energy Research & Social Science**, v. 87, p. 102454, maio 2022. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102454. .

KASINATH, A., FUDALA-KSIAZEK, S., SZOPINSKA, M., *et al.* "Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion", **Renewable and Sustainable Energy**

Reviews, v. 150, p. 111509, out. 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111509. .

KWIETNIEWSKA, E., TYS, J. "Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 491–500, jun. 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.041. .

LI, H., LI, C., LIU, W., *et al.* "Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion", **Bioresource Technology**, v. 123, p. 189–194, nov. 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.08.017. .

LI, P., LI, W., SUN, M., *et al.* "Evaluation of Biochemical Methane Potential and Kinetics on the Anaerobic Digestion of Vegetable Crop Residues", **Energies**, v. 12, n. 1, p. 26, 22 dez. 2018. DOI: 10.3390/en12010026. .

LI, W. "High-Solid Anaerobic Codigestion of Horse Manure and Grass in Batch and Semi-continuous Systems", **Energy & Fuels**, v. 30, n. 8, p. 6419–6424, 18 ago. 2016. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b00551. .

LI, Y., PARK, S. Y., ZHU, J. "Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 821–826, jan. 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.042. .

LO, F., LIN, K., PAI, T., *et al.* "Biogas production from most agricultural organic wastes by anaerobic digestion in Taiwan", **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 38, n. 6, 22 nov. 2019. DOI: 10.1002/ep.13242. .

MOSET, V., POULSEN, M., WAHID, R., *et al.* "Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology", **Microbial Biotechnology**, v. 8, n. 5, p. 787–800, 4 set. 2015. DOI: 10.1111/1751-7915.12271. .

MUHAMMAD NASIR, I., MOHD GHAZI, T. I. "Pretreatment of lignocellulosic biomass from animal manure as a means of enhancing biogas production", **Engineering in Life Sciences**, v. 15, n. 7, p. 733–742, out. 2015. DOI: 10.1002/elsc.201500019. .

NARAN, E., TOOR, U. A., KIM, D.-J. "Effect of pretreatment and anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge on stabilization and methane production", **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 113, p. 17–21, set. 2016. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.04.011. .

NING, J., ZHOU, M., PAN, X., *et al.* "Simultaneous biogas and biogas slurry production from co-digestion of pig manure and corn straw: Performance optimization and microbial community shift", **Bioresource Technology**, v. 282, p. 37–47, jun. 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.122. .

NIU, Q., QIAO, W., QIANG, H., *et al.* "Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery", **Bioresource Technology**, v. 137, p. 358–367, jun. 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.080. .

NUHU, S. K., GYANG, J. A., KWARBAK, J. J. "Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance", **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, p. 100298, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100298. .

O DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS NO MUNDO E NO BRASIL. [S.d.]. Disponível em: <https://akatu.org.br/novopf/wp-content/uploads/2020/02/desperdicio-de-alimentos-no-brasil-e-no-mundo.pdf>. Acesso em: 21 set. 2022.

OLHOFF, A., CHRISTENSEN. JOHN, LAMB, W. F., *et al.* **The Closing Window - Climate crisis calls for rapid transformation of societies.** . Nairobi, [s.n.], 2022. Disponível em: https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022?gclid=CjwKCAiAjs2bBhACEiwALTBWZQ8FJw4g5l52egdDfb7Tf9VqaTCFaaoFb4SKqGy4k3GXO1IYR7gbPBoCyegQAvD_BwE. Acesso em: 15 nov. 2022.

PAÚL, F. "Os efeitos do desperdício chocante de alimentos no mundo - BBC News Brasil", **BBC NEWS BRASIL**, 20 mar. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-56377418>. Acesso em: 21 set. 2022.

PILLI, S., YAN, S., TYAGI, R. D., *et al.* "Anaerobic digestion of ultrasonicated sludge at different solids concentrations - Computation of mass-energy balance and greenhouse gas emissions", **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 374–386, jan. 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.10.041. .

REGENERAÇÃO GLOBAL. **Gestão sustentável de resíduos de alimentos | BIODIGESTOR ECO-PRO | CONEXÃO INOVATIVA #38.** . [S.l: s.n.]. , 4 nov. 2021

RIAU, V., DE LA RUBIA, M. A., PÉREZ, M. "Upgrading the temperature-phased anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment", **Chemical Engineering Journal**, v. 259, p. 672–681, jan. 2015. DOI: 10.1016/j.cej.2014.08.032. .

RICO, C., MUÑOZ, N., FERNÁNDEZ, J., *et al.* "High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate", **Chemical Engineering Journal**, v. 262, p. 794–802, fev. 2015. DOI: 10.1016/j.cej.2014.10.050. .

RUFFINO, B., CAMPO, G., CERUTTI, A., *et al.* "Preliminary Technical and Economic Analysis of Alkali and Low Temperature Thermo-alkali Pretreatments for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge", **Waste and Biomass Valorization**, v.

7, n. 4, p. 667–675, 24 ago. 2016. DOI: 10.1007/s12649-016-9537-x. .

SERRANO, A., SILES, J. A., CHICA, A. F., *et al.* "Agri-food waste valorization through anaerobic co-digestion: fish and strawberry residues", **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 125–132, set. 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.05.002. .

SULEIMAN, A. I., KEVIN, L. W. H., AJAYI, A. S. "AZOJETE-CIGR Section VI Special Issue: Innovation & Technologies for Sustainable Agricultural Production & PERFORMANCE OF A SIMPLIFIED MODEL INNER-TUBE BIODIGESTER FOR BIOMETHANE PRODUCTION FOR HOUSEHOLD USE IN NIGERIA", **Food Sufficiency AZOJETE**, v. 14, p. 168–184, 2018. Disponível em: www.azojete.com.ng.

SUN, L., POPE, P. B., EIJSINK, V. G. H., *et al.* "Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure", **Microbial Biotechnology**, v. 8, n. 5, p. 815–827, 8 set. 2015. DOI: 10.1111/1751-7915.12298. .

THOMPSON, E., WANG, Q., LI, M. "Anaerobic digester systems (ADS) for multiple dairy farms: A GIS analysis for optimal site selection", **Energy Policy**, v. 61, p. 114–124, out. 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.035. .

TUFANER, F., AVŞAR, Y. "Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review", **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 13, n. 9, p. 2303–2312, 20 set. 2016. DOI: 10.1007/s13762-016-1069-1. .

Ultragaz | O que você precisa saber sobre seu botijão de gás. [S.d.]. Disponível em: <https://www.ultragaz.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-botijao-de-gas/>. Acesso em: 6 nov. 2022.

VELUSAMY, M., SPEIER, C. J., MICHEALAMMAL, B. R. P., *et al.* "Bio-reserves inventory—improving substrate management for anaerobic waste treatment in a fast-growing Indian urban city, Chennai", **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 24, p. 29749–29765, 21 ago. 2020. DOI: 10.1007/s11356-019-07321-1. .

WILSON, T., SHIELDS, P., THOMPSON, D. "Biosolids Technology Fact Sheet ", **EPA - U.S. Environmental Protection Agency**, set. 2006. .

WITARSA, F., LANSING, S. "Quantifying methane production from psychrophilic anaerobic digestion of separated and unseparated dairy manure", **Ecological Engineering**, v. 78, p. 95–100, maio 2015. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.05.031. .

YADAV, D., BARBORA, L., RANGAN, L., *et al.* "Tea waste and food waste as a potential feedstock for biogas production", **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 35, n. 5, p. 1247–1253, set. 2016. DOI: 10.1002/ep.12337. .

ZAREEI, S. "Evaluation of biogas potential from livestock manures and rural wastes using GIS in Iran", **Renewable Energy**, v. 118, p. 351–356, abr. 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.11.026. .

ZHAI, N., ZHANG, T., YIN, D., *et al.* "Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure", **Waste Management**, v. 38, p. 126–131, abr. 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.12.027. .

ZHANG, C., SU, H., TAN, T. "Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system", **Bioresource Technology**, v. 145, p. 10–16, out. 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.030. .

ZHANG, L., LEE, Y.-W., JAHNG, D. "Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements", **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5048–5059, abr. 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.082. .

ZHANG, R., ELMASHAD, H., HARTMAN, K., *et al.* "Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion", **Bioresource Technology**, v. 98, n. 4, p. 929–935, mar. 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.02.039. .

ZHANG, Z., ZHANG, G., LI, W., *et al.* "Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 21, p. 9153–9158, jun. 2016. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.042. .

ZHEN, G., LU, X., KATO, H., *et al.* "Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 559–577, mar. 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.187. .