



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

**Sustentabilidade: Avaliação da produção de biogás em um
biodigestor de pequena escala**

Carlos Emílio Vieira da Silva

Lajeado, Março de 2021

Carlos Emílio Vieira da Silva

Sustentabilidade: Avaliação da produção de biogás em um biodigestor de pequena escala

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, para a obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento na área de concentração Espaço, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa Tecnologia e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. mont. Odorico Konrad

Lajeado, Março de 2021

RESUMO

A grande evolução tecnológica emergiu com inúmeras soluções para problemas da nossa sociedade, mas concomitantemente gerou outros, e para estes se busca incessantemente alternativas. Dentro da agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, estruturantes do plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade, o uso do biodigestor escolhido para avaliação neste trabalho promove 12 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Como alternativa para os modelos convencionais e não renováveis a biomassa é uma das fontes para produção de energia renovável. A partir da decomposição anaeróbica de diversos tipos de biomassas e substratos temos o produto metabólico chamado biogás, uma mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases como o gás sulfídrico. Estudos apontam o uso de biorreatores de pequena escala em áreas urbanas e principalmente em áreas rurais sendo economicamente viável e eficientes. O biodigestor escolhido como objeto dessa pesquisa denominado Homebiogas é um sistema pequeno com reator de 1,2 m³ e capacidade de armazenamento de biogás em um gasômetro de 0,7 m³. Na primeira fase do experimento o foco foi avaliar a qualidade e a quantidade do biogás gerado com a utilização de resíduos orgânicos oriundos de ambiente universitário como substrato. Na segunda fase, após o consumo total da matéria orgânica, o sistema foi suplementado com óleo residual de cozinha com objetivo de potencializar a produção de biogás e avaliar separadamente o gás gerado com cada substrato. Na terceira e última fase se retornou a alimentação com os resíduos orgânicos alimentares. A temperatura ambiente influenciou diretamente a temperatura do reator, sendo esse um fator chave para o desempenho do sistema que demonstrou efetividade na conversão dos resíduos orgânicos em biogás, mas a conversão do óleo residual não foi representativa. As taxas de Metano (CH₄) na composição do biogás gerado foram em média 64,34%, bom resultado em termos de qualidade para a sua utilização energética. A média de produção de biogás com temperaturas acima de 28 C° e atividade plena das bactérias foi de 656 litros por dia, equivalente a 164 L.kgBiomassa⁻¹. Os resultados obtidos reforçam o uso de biodigestores de pequena escala como uma solução para a transformação descentralizada de resíduos orgânicos em biogás, mas advertem sobre a necessidade de instalação desses equipamentos em locais de plena incidência de luz solar e calor para um melhor desempenho na conversão da matéria orgânica e produção do biogás.

Palavras-chave: Biogás. Biorreatores de pequena escala. Resíduos orgânicos alimentares. Energia renovável.

ABSTRACT

The great technological evolution has emerged with innumerable solutions to our society's problems, but at the same time it has generated others, and for these, alternatives are constantly being sought. Within the 2030 Agenda for Sustainable Development, structuring the action plan to eradicate poverty, protect the planet and ensure that people achieve peace and prosperity, the use of the biodigester chosen for evaluation in this work promotes 12 of the 17 Development Goals of Sustainable Development (SDG). As an alternative to conventional and non-renewable models, biomass is one of the sources for the production of renewable energy. From the anaerobic decomposition of different types of biomass and substrates, we have the metabolic product called biogas, a mixture of methane, carbon dioxide and small amounts of other gases such as hydrogen sulphide. Studies indicate the use of small-scale bioreactors in urban areas and mainly in rural areas, being economically viable and efficient. The biodigester chosen as the object of this research called Homebiogas is a small system with a 1.2 m³ reactor and a biogas storage capacity in a 0.7 m³ gasometer. In the first phase of the experiment, the focus was to assess the quality and quantity of the biogas generated using organic waste from the university environment as a substrate. After the total consumption of organic matter, in the second phase the system was supplemented with residual cooking oil in order to enhance the biogas production. The evaluation of generated gas with each substrate occurred separately. The ambient temperature directly influenced the reactor temperature, which is a key factor for the performance of the system, which has not shown effectiveness in converting organic waste into biogas, but the conversion of residual oil was not representative. In the third and last phase returned the food waste input. Methane (CH₄) rates in the composition of the biogas generated were on average 65.34%, an excellent result in terms of quality for its energy use. The average production of biogas with temperatures above 28 ° C and full activity of the bacteria was 656 liters per day. The results obtained reinforce the use of small-scale biodigesters as a good solution for the decentralized transformation of organic waste into biogas, but warn about the need to install this equipment in places with full incidence of sunlight and heat for a better conversion performance of organic matter and biogas production.

Key words: Biogas. Small-scale bioreactors. Organic food waste. Renewable energy.

Carlos Emílio Vieira da Silva

Sustentabilidade: Avaliação da produção de biogás em um biodigestor de pequena escala

A Banca examinadora abaixo aprova a Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento na área de concentração Tecnologia e Ambiente:

Prof. Dr. mont. Odorico Konrad – Orientador
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Prof. Dr. Rodrigo Spinelli
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Prof. Dr. Josmar Almeida Flores
Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Eduardo Miranda Ethur
Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES

AGRADECIMENTOS

Primeiro a toda minha família, meus Pais, Marion e Renato, minha irmã Camila e minha namorada, Elisa, que SEMPRE acreditaram em mim e me deram força para seguir em frente! Para trás só se for para pegar impulso e ir mais pra frente, sempre de cabeça erguida no caminho do bem! Ter uma empresa de granola, uma produção de orgânicos, e trabalhar em outra empresa além de fazer o mestrado, não foi algo simples, mas com dedicação e empenho tudo é capaz de ser conquistado.

Ao programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, a todos os Professores, queridos e atenciosos que compartilharam seus conhecimentos e principalmente ao meu querido Orientador Odorico Konrad!

O Professor Odorico é um presente para a Univates e para todos que têm o privilégio de conviver com ele! Obrigado por acreditar nas minhas loucuras e por me acolher como pupilo e amigo!

A Univates por toda estrutura, e todos os colegas e amigos com os quais tive o privilégio de conviver durante esses dois anos! Como foi maravilhoso compartilhar momentos, conhecimentos, alegrias, angústias, viagens a campo, aulas presenciais sem pandemia e com muito chimarrão, levarei essas lembranças para o resto da minha vida!

A CAPES pela bolsa e conseqüente apoio financeiro!

A todos os Deuses desse Universo, que tornam esse mundo tão lindo e espetacular, com uma natureza exuberante com seus processos de transformação da vida! Afinal de contas, como disse Lavoisier, na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se TRANSFORMA!

Beijos e abraços de amor!

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PROMOVIDOS POR UM SISTEMA DE BIODIGESTÃO	17
FIGURA 2 - FONTES DE ENERGIA – REPARTIÇÃO INTERNA BRASIL	19
FIGURA 3 - ESQUEMA DAS FONTES DE BIOMASSA E DAS TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA.	21
FIGURA 4 – ETAPAS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA.	23
FIGURA 5 – QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COLETADA NAS REGIÕES E NO BRASIL.	28
FIGURA 6 – GRÁFICO DA DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR TIPO DE DESTINAÇÃO (TONELADAS/DIA)	28
FIGURA 7 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BIODIGESTOR FIXO DE DOMO CONSTRUÍDO.	31
FIGURA 8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM MODELO DE BIODIGESTOR DO TIPO BARRIL FLUTUANTE.	32
FIGURA 9 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BIODIGESTOR DO TIPO PLUG FLOW.	33
FIGURA 10 - IMAGEM DO BIODIGESTOR HOME BIOGAS 2.0 DESENVOLVIDO PELA EMPRESA HOME BIOGAS DE ISRAEL.	33
FIGURA 11 – FUNCIONAMENTO DO BIODIGESTOR HOME BIOGAS 2.0.	34
FIGURA 12 – BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E SOCIAIS DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS.	36
FIGURA 13 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO COMPLEXO DE RESÍDUOS.	37
FIGURA 14 - ETAPAS DA MONTAGEM.	38
FIGURA 15 - SEGUNDA ETAPA DA MONTAGEM DO SISTEMA.	39
FIGURA 16 – SISTEMA BIODIGESTOR HOME BIOGAS 2.0.	40
FIGURA 17 - COLETA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS NO RESTAURANTE DA UNIVATES. ..	40
FIGURA 18 - QUARTEAMENTO DA AMOSTRA.	41
FIGURA 19 - HOMOGENEIZAÇÃO DA AMOSTRA	42
FIGURA 20 - ÓLEO RESIDUAL USADO NA ALIMENTAÇÃO.	42
FIGURA 21 - ESPECIFICAÇÕES DO MEDIDOR DE GÁS, GASÔMETRO E DETALHE DA INSTALAÇÃO.	43
FIGURA 22 - EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS GERADO.	44
FIGURA 23 – DISPLAY DE LEITURA INSTALADO NO LABORATÓRIO MÓVEL COM RESULTADOS EM TEMPO REAL	45
FIGURA 24 – BAG PARA COLETA DE AMOSTRA DO BIOGÁS.	45
FIGURA 25 - AQUECEDOR, DATALOGGER E PT100	46
FIGURA 26 - PHMETRO DE BANCADA.	46
FIGURA 27 - ANÁLISE CROMATOGRÁFICA DE GASES.	51
FIGURA 28 -LACRE HIDRÁULICO.	57
FIGURA 29 - BIODIGESTOR INSTALADO NA ÁREA EXTERNA COM O GASÔMETRO CHEIO DE GÁS	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNIVATES	Universidade do Vale do Taquari
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Kg	Quilograma
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ S	Gás sulfídrico
GN	Gás Natural
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
RO	Resíduos Orgânicos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
SF	Sólidos Fixos
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro quadrado
L	Litros
NL	Normal Litro
NL/Kg SV (0°C,1013hPa)	Normal Litro por Quilograma de Sólidos Voláteis
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
pH	Potencial Hidrogênionico
mL	Mililitro
L.kgBiomassa ⁻¹	Litros por Quilograma de Biomassa

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPOSIÇÃO DE METANO DAS AMOSTRAS.....	52
GRÁFICO 2 - FAIXAS DO PH NA FASE 1.....	53
GRÁFICO 3 - CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS, VOLÁTEIS E FIXOS	54
GRÁFICO 4 - COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS GERADO NA FASE 3.....	61
GRÁFICO 5 - PH DO DIGESTATO NA FASE 3.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROTOCOLO DE ALIMENTAÇÃO INDICADO	47
TABELA 2 - QUANTIDADE DE BIOGÁS	50
TABELA 3 - POTENCIAL HIDROGÊNIONICO E CONCENTRAÇÃO DE METANO NA FASE 2	56
TABELA 4 - PARÂMETROS AFERIDOS NA FASE 3	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.2. Tema	13
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo geral	13
1.4. Justificativa	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. Ciências Ambientais	15
2.2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	16
2.3. Matriz energética	17
2.4. Biomassa	20
2.5. Biogás	23
2.6. Resíduos Sólidos	25
2.7. Biorreatores de pequena escala	30
2.8. Benefícios do uso dos biodigestores	35
3. METODOLOGIA	37
3.1. Instalação do sistema biodigestor	38
3.2. Caracterização dos substratos	40
3.2.1 Resíduos orgânicos alimentares	40
3.2.2 Óleo residual	42
3.3. Equipamentos para medição da qualidade e quantidade do biogás e da temperatura	43
3.3.1 Medição da quantidade de biogás	43
3.3.2. Medição da qualidade do biogás	44
3.3.3. Bag de coleta	45
3.3.4. Aquecedor e data logger	45
3.3.5. Potencial Hidrogênionico - pH	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1. Quantidade do biogás a partir dos resíduos orgânicos - Fase 1	49
4.2. Qualidade do Biogás a partir dos resíduos orgânicos Fase 1	50
4.3. Potencial Hidrogênionico – pH do digestato	52
4.4. Concentração de Sólidos	53
4.5. Alimentação com óleo residual – Fase 2	54
4.6. Segunda alimentação com resíduos orgânicos fase 3	58
5. CONCLUSÃO	64

6. REFERÊNCIAS	65
-----------------------------	----

1. INTRODUÇÃO

Vivemos com maior conforto, o que demanda mais fontes energéticas e acaba por gerar problemas à medida que em sua maioria, as principais fontes de obtenção de energia não são renováveis e geram um impacto negativo para o meio-ambiente (SILVA et al., 2009). O uso de combustíveis fósseis é um dos responsáveis pela emissão atmosférica dos Gases de Efeito Estufa (GEE), por origem antrópica. Os impactos negativos associados a essa fonte de energia poderiam ser reduzidos através de uma melhor utilização de energias renováveis. (DI MARIA et al., 2015)

Além disso, conforme (SILVA et al., 2009) as fontes atuais de energia já não são suficientes para sustentar o processo de crescimento de uma economia capitalista com altos padrões de vida em processos complexos que compartilham da necessidade de um abastecimento adequado e confiável de energia, que se origina do meio-ambiente. A instabilidade socioeconômica e ambiental frequentemente tem sua origem na busca ou disputa por novas fontes energéticas, por ser considerado item relevante para a soberania nacional.

Como alternativa para os modelos convencionais e não renováveis a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado interno quanto internacional, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina (ANEEL, 2008).

A partir da decomposição anaeróbica de diversos tipos de biomassas e substratos temos o produto metabólico chamado biogás, uma mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases como o gás sulfídrico. O biogás é uma fonte renovável de energia que pode ser usado como substituto do gás natural (GN) e gás liquefeito de petróleo (GLP) (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

É possível comparar o nível de energia contido nas diferentes formas de energia, seja por teste da água fervendo, teste controlado de cocção ou teste de performance na cozinha (VITA, 1985). A energia contida em 1.0 m³ de biogás purificado é igual a 1.1L de gasolina, 1,7L de bioetanol, ou 0,97 m³ de gás natural (MARTINS DAS NEVES, L.C.; CONVERTI, A.; VESSONI PENNA, 2009).

A produção de biogás em áreas rurais e no aproveitamento dos resíduos das áreas urbanas é uma realidade mundial. Um dos desafios para cientistas e engenheiros é a construção de um modelo de biodigestor que tenha uma vida útil considerável, usando materiais acessíveis e de baixo custo levando em consideração a economia de cada local. Podemos ter produção de biogás em reatores de 100mL dentro de um laboratório e reatores de 10.000 m³ como em muitas cidades da Europa (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

A questão fundamental é que reatores de pequena escala ajudam na transformação dos resíduos no local diminuindo custos com o transporte dos resíduos até o aterro sanitário. A segregação dos resíduos e os processos de biodigestão acontecem na fonte geradora e toda cadeia é beneficiada. O gás metano é um dos causadores do efeito estufa; é gerado quando a matéria orgânica (resíduos animais e vegetais) sofre decomposição na ausência de oxigênio. Este processo gera biogás, gás do lixo e gás natural. Isso reforça a importância da viabilização deste tipo de cadeia, mostrando apenas a necessidade de reaproveitamento de todos os recursos (SILVA et al., 2009).

A gestão inadequada de resíduos orgânicos leva a uma infinidade de problemas, como poluição ambiental, eutrofização, danos estéticos à paisagem urbana, emissão de gases de efeito estufa e efeitos na saúde humana. O descarte imprudente de resíduos não apenas representa uma grave ameaça à qualidade ambiental, mas também resulta na perda do valor econômico dos resíduos (SHARMA et al., 2019).

Uma das maneiras de tornar esses equipamentos mais permeáveis em nossa sociedade é utilizando eles como uma ferramenta de educação ambiental, em escolas e universidades. Em estudo onde alunos do ensino superior do curso de engenharia ambiental, passaram por uma experiência no âmbito de um

projeto de análise gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares no município de Juazeiro do Norte, onde foram coletados os resíduos gerados de porta em porta de residências escolhidas ao acaso. Essa prática pedagógica de educação ambiental mostrou-se enriquecedora para a formação acadêmica dos alunos, que tiveram a oportunidade de participar de discussões e vivências, capazes de contribuir significativamente com o desenvolvimento de suas habilidades profissionais (FEITOSA; BARDEN; KONRAD, 2017).

1.2. Tema

Biodigestor de pequena escala e seu comportamento quantitativamente e qualitativamente na produção de biogás, a partir da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos alimentares do ambiente universitário e doméstico, suplementado com óleo residual de cozinha.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a quantidade e a qualidade da produção de biogás de um sistema biodigestor em pequena escala.

1.3.2. Objetivos específicos

- Instalar um sistema de biodigestão em pequena escala;
- Coletar e caracterizar os substratos para alimentação do sistema de biodigestão;
- Avaliar a produção do biogás quantitativamente e qualitativamente dos substratos alimentados;

1.4. Justificativa

A aplicação de metodologias e tecnologias que diminuam o impacto ambiental em atividades antrópicas permeia nossa sociedade com uma premissa básica rumo ao desenvolvimento sustentável. Seguindo este objetivo, o presente trabalho buscou avaliar a quantidade e qualidade do biogás produzido em um biodigestor de pequena escala, alimentado com resíduos orgânicos domésticos e do restaurante da Univates. Resíduos orgânicos e óleo residual de cozinha devem ter o destino correto após o seu uso e o sistema biodigestor possibilita a geração de energia (biogás e biofertilizante) a partir da decomposição desses materiais e diminui o aporte deles no aterro sanitário. Além disso o HomeBiogas 2.0, biodigestor escolhido para avaliação neste trabalho promove 12 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estruturantes do plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade, conforme a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Isso solidifica a importância de uma avaliação mais minuciosa de seu funcionamento, corroborando para sua permeabilidade em nossa sociedade. Além disso o sistema pode ser implementado em escolas, se tornando uma ferramenta de educação de extrema relevância.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado estudo para justificar a pesquisa, demonstrando a importância de sistemas de pequena escala para decomposição de resíduos orgânicos e óleo residual de cozinha com a geração de biogás e biofertilizante. Realizou-se a pesquisa em legislações, livros, artigos, atlas, e dissertações.

2.1 Ciências Ambientais

Segundo (CUNHA, 2001) a partir de uma análise dos diálogos entre saberes de Leff, os problemas socioambientais só existem em decorrência das formas de apropriações do mundo e da natureza a partir das relações sociais e de poder, que se materializam por meio da economia, da política, da ciência, da religião e assim por diante. A complexidade das questões que se colocam ao mundo contemporâneo tem levado pesquisadores a ver que tais questões não podem mais ser tratadas apenas no âmbito disciplinar e que para a obtenção de respostas que possam ser mais efetivas e duradouras são necessários conhecimentos de variadas áreas (FERNANDES et al., 2013).

O estabelecimento da interdisciplinaridade acontece, como procura-se demonstrar, a partir do surgimento de contradições que a lógica disciplinar não pode solucionar, e se consolida com a resolução de questões concretas do cotidiano.(LOUREIRO; CLAUDEISE; SILVEIRA, 2019)

A reflexão das ciências sociais deve ser tão importante quanto a objetividade da engenharia. Não é por acaso que a interdisciplinaridade é entendida essencialmente como uma forma ativa para processos de inovação. É a inovação que surge quando diferentes perspectivas se somam e revelam muito mais nuances da temática estudada do que a simples soma de perspectivas (FERNANDES et al., 2013).

Assuntos do cotidiano, da vida prática, mas também perspectivas de futuro são os principais objetos das abordagens interdisciplinares. A própria

compreensão de sustentabilidade da vida humana depende, no sistema de conhecimento científico, da reunião de saberes provenientes de diferentes áreas disciplinares. A interdisciplinaridade é uma dessas novidades pós-modernas, e as suas perspectivas parecem sugerir os melhores rumos a serem seguidos na produção de conhecimento para o futuro. (LOUREIRO; CLAUDEISE; SILVEIRA, 2019)

2.2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável – aprovada na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável (25-27 de setembro 2015) – consiste em uma Declaração com 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas a eles relacionadas, uma seção sobre meios de implementação e de parcerias globais, e um arcabouço para acompanhamento e revisão. (PNUD, 2016)

O conjunto de objetivos e metas demonstram a escala e a ambição desta nova Agenda universal. Os ODS aprovados foram inspirados nas bases estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), e construídos de maneira a completar o trabalho deles e responder a novos desafios. São integrados e indivisíveis, e mesclam, de forma equilibrada, as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. (PNUD, 2016)

Desde a década de 1960, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) transformou-se no maior programa da ONU, fazendo-se presente em mais de 170 países e desempenhando papel transformador no combate à pobreza, na erradicação de doenças, na redução da fome, na criação de empregos, no empoderamento de mulheres, no controle da mortalidade infantil e na proteção do meio ambiente. (PNUD, 2016)

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável promovidos por um sistema de biodigestão



O uso de biodigestores, independentemente de sua escala, pode ser usado para promover ao menos 12 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estruturantes do plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

2.3. Matriz energética

Diante a evolução vivenciada pela sociedade, a energia passou a ser um recurso imprescindível na rotina dos agentes econômicos. A grande dependência em relação a este insumo e a predominante utilização de recursos não renováveis como fontes energéticas na matriz mundial, vêm despertando preocupações na atualidade e nas projeções do futuro, perante a perspectiva de crescimento cada vez maior da demanda por energia. Neste sentido, a busca por recursos alternativos que tenham menor impacto ambiental, e que funcionem de maneira complementar entre si tornou-se um dos maiores desafios do setor energético mundial. (DE MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019)

A partir da percepção da sociedade de que os recursos naturais são finitos surge a preocupação com o desenvolvimento sustentável, acentuada na década de 70 com a crise do petróleo, que até o momento era considerado abundante e inesgotável, o que suscitou questionamentos a respeito dos modelos de desenvolvimento adotados (FERNANDES et al., 2013).

O mundo e o Brasil utilizam majoritariamente no seu suprimento energético, as fontes energéticas primárias não renováveis, em particular, os combustíveis fósseis – petróleo, carvão mineral e gás natural. Estes combustíveis são grandes emissores de CO₂, um dos gases relacionados com o “efeito estufa”, causador de elevação da temperatura do planeta e de mudanças climáticas. Este tema tem sido amplamente discutido em eventos nacionais e internacionais relacionados com a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais do planeta, estando entre as prioridades e as preocupações atuais da comunidade mundial (PROCÓPIO FILHO; VAZ, 1997).

A maior motivação para o uso de biocombustíveis é seu potencial de reduzir a emissão de gases de efeito estufa de uma forma sustentável. A importância da agroenergia para a matriz energética brasileira de combustíveis exige uma definição de objetivos estratégicos nacionais de médio e longo prazo. Dessa forma seria possível subscrever um pacto entre a sociedade e o Estado, para que juntos promovam a redução do uso de combustíveis fósseis, a ampliação da produção e consumo de biocombustíveis, a proteção do meio ambiente, o domínio do mercado internacional, e, por fim, a contribuição para a inclusão social (FRANCISCO et al., 2011).

Nos últimos anos, as discussões em torno da importância da renovação da matriz energética, não apenas nacional, mas também mundial, têm sido cada vez mais recorrentes. Segundo a (ANEEL, 2008), a matriz energética corresponde aos recursos energéticos disponíveis em um determinado país ou região, e por ser representada quantitativamente, serve como embasamento para o planejamento do setor energético.

A figura 2 ilustra a matriz energética brasileira conforme o balanço energético nacional, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética no ano de 2020 com dados base do ano de 2019. Na repartição da oferta interna de energia no Brasil, há uma predominância das fontes não renováveis e nocivas ao meio ambiente, sendo essencial a diversificação da matriz, para que se consiga mitigar os impactos ambientais gerados pela utilização destes recursos (MAMBELI BARROS; TIAGO FILHO; DA SILVA, 2014)

Figura 2 - Fontes de Energia – Repartição interna Brasil



Fonte: Balanço energético nacional de 2019 – Empresa de Pesquisa Energética.

No que diz respeito às vantagens econômicas, além da geração de receita local, pode-se destacar que a biomassa possui vantagens comparativas (como a exuberância de biodiversidade, e a agroindústria sólida e produtiva), conforme a (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019), que no futuro podem contribuir com a expansão do comércio internacional do setor, através da venda do excedente de energia produzido, para países que não possuem tantas características que facilitem a produção da biomassa. Já em relação aos impactos socioambientais, a biomassa é considerada uma fonte sustentável, devido ao baixo nível de emissões de CO₂ na atmosfera, e além de contribuir para a geração de empregos, influencia na redução do êxodo rural, apresentando-se como uma excelente opção de fonte complementar à matriz energética atual. (DE MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019)

A renovação da matriz energética nacional é um tema que instiga novas pesquisas, devido à urgência que se tem em fomentar a utilização de fontes ambientalmente favoráveis. Para isso, torna-se imprescindível a realização de projetos e pesquisas aprofundados para comprovar o potencial energético de demais fontes renováveis, como a eólica e solar, para posteriormente mensurar a viabilidade econômica e socioambiental das mesmas. (DE MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019)

2.4. Biomassa

Como parte do fluxo natural e cíclico dos processos da natureza, a biomassa é considerada um recurso renovável, com a obtenção da energia solar através do processo de fotossíntese que acontece dentro das organelas chamadas de cloroplastos, presentes nas plantas, essa energia acumulada na biomassa ao entrar em combustão é liberada na forma de calor. Além disso ocorre a liberação de dióxido de carbono, que novamente é absorvido pelas plantas fechando o ciclo do carbono (KONRAD et al., 2016).

Culturas energéticas vem sendo reportadas em artigos sobre o seu alto potencial de contribuição na produção de energia renovável (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2007). Em virtude da disponibilidade de terra não ser abundante em todos os locais do mundo como é no Brasil, e o foco prioritário das produções é a alimentação, o uso eficiente dessas terras com culturas de alto rendimento energético é de extrema importância (FAO, 2019). Hoje os países com maior potencial econômico consomem a maior parte da energia obtida das fontes de biomassas principalmente por possuírem maior acesso as tecnologias de transformação das biomassas, que cada vez mais têm papel importantíssimo no suprimento da demanda energética mundial. (BILGILI et al., 2017).

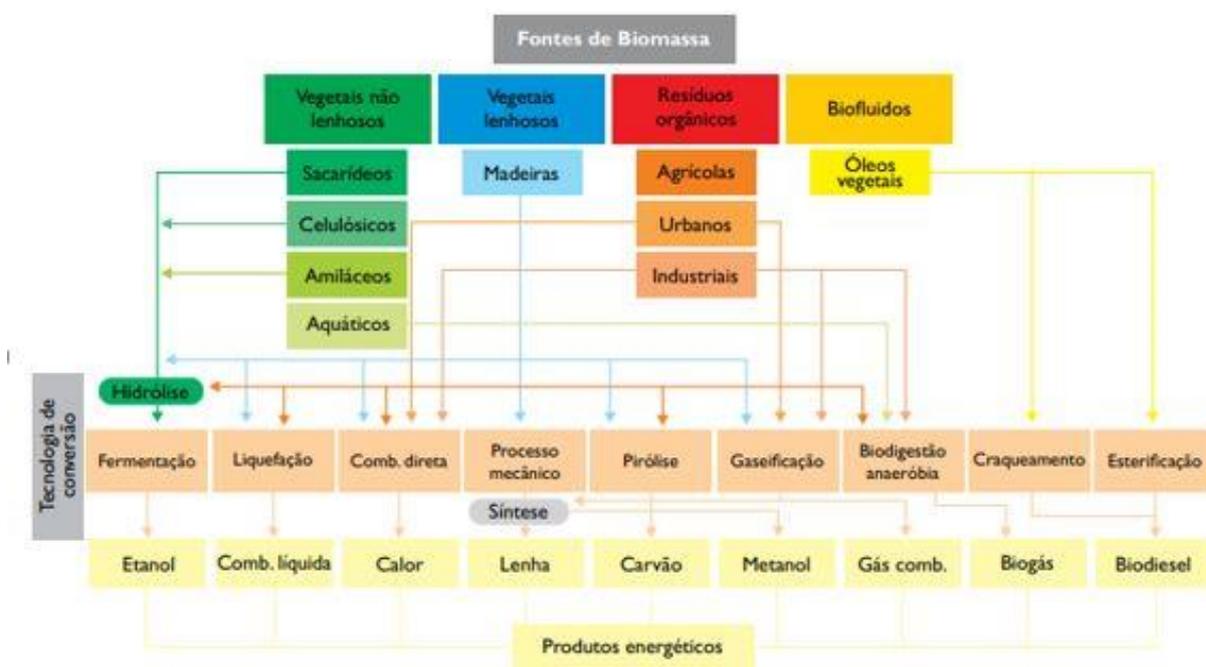
Para suprir a demanda energética crescente e funcionar de maneira complementar na matriz energética atual, a biomassa apresenta vantagens importantes, principalmente ao conciliar o âmbito econômico e o socioambiental. A biomassa, além de contribuir para a geração de empregos, aumentando a receita local, também auxilia na: (I) redução do êxodo rural, (II) redução das emissões de gases nocivos ao meio ambiente, e (III) possui vantagens comparativas (como as características naturais do solo, e temperatura tropical, além da grande biodiversidade disponível) que podem possibilitar expansão do comércio internacional do setor. Assim, ao verificar a potencialidade energética desta fonte, foi possível constatar que a mesma depende diretamente da disponibilidade e da produção das matérias-primas que servem como base para

geração de energia, que no país, são extremamente elevadas. (DE MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019)

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, entre outras), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo, resíduos de frigoríficos, etc.). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (ANEEL, 2008).

Conforme (KONRAD et al., 2016) as opções tecnológicas para a conversão da energia contida nas biomassas são variadas e podem ocorrer com a liberação da energia diretamente sob a forma de calor ou eletricidade, ou pode ser feita de outra forma como o biocombustível líquido ou biogás. Dependendo o tipo da biomassa uma ou mais tecnologias podem ser aplicadas, conforme esquema apresentado no Atlas das Biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano adaptado de uma publicação da ANEEL de 2005 e elucidado na figura 3.

Figura 3 - Esquema das fontes de biomassa e das tecnologias para conversão energética.



Fonte: Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano.

No momento, frequentemente, apenas os grãos ou sementes de culturas alimentares convencionais são utilizados para produção de energia como o etanol de grãos de trigo e cana de açúcar ou biodiesel de soja, canola e girassol. A busca por cultivares que seja possível o aproveitamento total da planta se torna interessante para potencializar o uso da terra e a geração de energia. (RUANE; SONNINO; AGOSTINI, 2010). O cânhamo industrial (*Cannabis sativa L.*) consegue suprir esses requerimentos possuindo uma alta eficiência no uso da terra, alto crescimento e rendimento, baixa necessidade de pesticidas, boa supressão de ervas daninhas e incremento na qualidade e saúde do solo (PRADE et al., 2011).

A produção em larga escala da energia elétrica e dos biocombustíveis está relacionada à biomassa agrícola e à utilização de tecnologias eficientes. A pré-condição para a sua produção é a existência de uma agroindústria forte e com grandes plantações, sejam elas de soja, arroz, milho ou cana-de-açúcar. A biomassa é obtida pelo processamento dos resíduos dessas culturas. Assim, do milho é possível utilizar, como matéria-prima para energéticos, sabugo, colmo, folha e palha. Da soja e arroz, os resíduos que permanecem no campo, tratados como palha. Na cana-de-açúcar, o bagaço, a palha e o vinhoto (ANEEL, 2008)

A biomassa de algas como matéria-prima para a produção de biogás é uma alternativa. Os biocombustíveis derivados de algas são vistos como uma das soluções mais promissoras para mitigar as mudanças climáticas e como alternativa para o esgotamento rápido dos combustíveis fósseis e reservas de petróleo. As principais vantagens das algas são: nenhuma competição com culturas alimentares por terras aráveis, altas taxas de crescimento, baixas frações de lignina (MONTINGELLI; TEDESCO; OLABI, 2015)

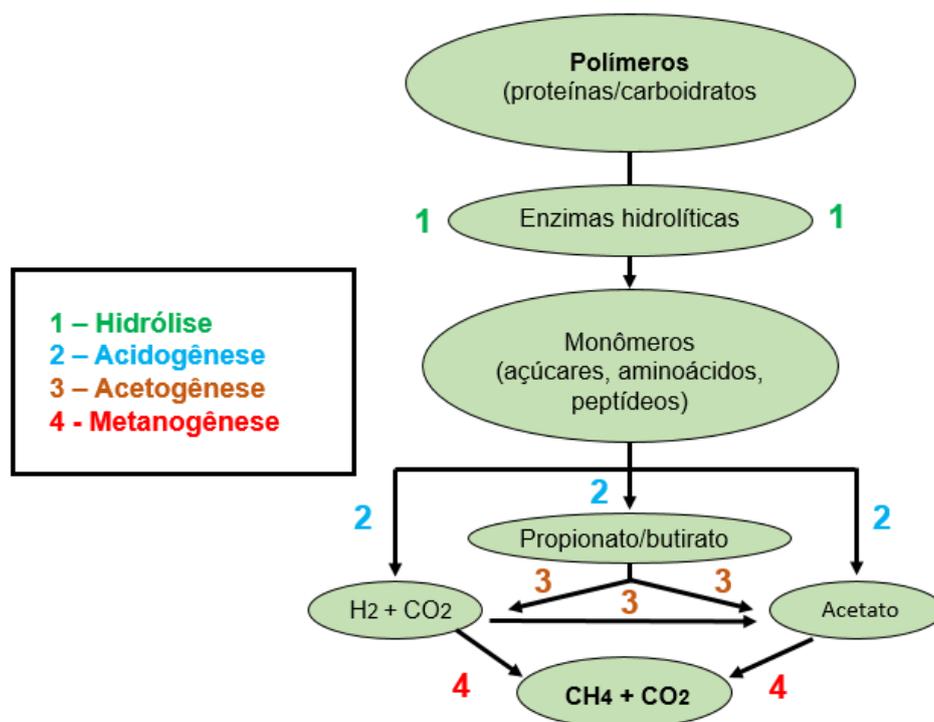
A bioenergia é uma reserva perpétua de energia disponível universalmente. Pode ser convertida em energia elétrica e o desenvolvimento de tecnologias avançadas de conversão de energia é atualmente necessário para reduzir a desordem das mudanças climáticas e mitigar as emissões de GEE no meio ambiente (JOSELIN HERBERT; UNNI KRISHNAN, 2016)

2.5. Biogás

O termo biogás é comumente usado como referência a um gás produzido a partir da quebra biológica de matéria orgânica na ausência de oxigênio. É um dos produtos formados durante a decomposição anaeróbica e consiste na grande maioria de Metano (CH_4 ; 50-60%), dióxido de carbono (CO_2 ; 50-40%), gás sulfídrico (H_2S ; <1%), hidrogênio (H_2), água (H_2O) e pequenos traços de outras substâncias dependendo da composição do substrato. (RAMATSA et al., 2014)

A decomposição anaeróbica é caracterizada por uma série de transformações bioquímicas a partir da degradação de matéria orgânica. Todo o processo envolve diferentes etapas sendo elas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese (Figura 4). (KONRAD et al., 2016)

Figura 4 – Etapas do processo de biodigestão anaeróbica.



Fonte: Adaptado do Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano. 2016.

Para produzir biogás, a matéria orgânica fermenta no biodigestor com a ajuda de comunidades bacterianas. Quatro estágios de fermentação, que ocorrem simultaneamente, movem o material orgânico de sua composição inicial para o estado de biogás (VÖGELI et al., 2014)

1. O primeiro estágio do processo de digestão é o estágio de hidrólise. No estágio de hidrólise, polímeros orgânicos insolúveis (como os carboidratos) são decompostos, tornando-os acessíveis ao próximo estágio de bactérias chamadas bactérias acidogênicas.
2. As bactérias acidogênicas convertem açúcares e aminoácidos em dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e ácidos orgânicos.
3. No terceiro estágio, as bactérias acetogênicas convertem os ácidos orgânicos em ácido acético, hidrogênio, amônia e dióxido de carbono, permitindo o estágio final – os metanogênicos.
4. Os metanogênicos convertem esses componentes finais em metano e dióxido de carbono – que podem então ser usados como uma energia renovável e inflamável. (VÖGELI et al., 2014)

A ótima performance de um biodigestor está no equilíbrio e na estabilidade do biorreator. Fatores como pH, temperatura, carga orgânica de alimentação diária, tempo de retenção hidráulica e a razão carbono/nitrogênio (C/N) desempenham um papel significativo na biodegradação da matéria orgânica. A digestão anaeróbica pode acontecer em três diferentes taxas de temperaturas, psicrófilico (10-20°C), mesófilico (20-45°C) e termófilico (45-68°C). Porém o mais comum para o melhor desempenho de um reator anaeróbico é na faixa termofílica com temperatura ótima em 35°C (COLLINS et al., 2006).

Uma questão importante para o desenvolvimento futuro e implementação mais ampla do mercado de tecnologia de biogás exige o desenvolvimento de políticas, subsídios e apoio governamental. Atualmente, a produção de biogás está emergindo rapidamente apenas nos países com ambiente regulatório confiável e conveniente. (KAPOOR et al., 2019) Além disso, fornecer incentivos para coleta esquematizada, a correta segregação e transporte de resíduos

orgânicos para usinas de biogás, com o estabelecimento de centros de treinamento para a criação de futuros profissionais qualificados para esse setor em mercados emergentes também deve ser considerado. (KAPOOR et al., 2019)

As condições e ações contextuais brasileiras do biogás possibilitaram e/ou restringiram o desenvolvimento do campo de biogás. Isso abre um novo caminho para ações privadas e políticas para o biogás no Brasil, recomendações de políticas, concentrando-se em contextos como o alinhamento e a interação das condições macroeconômicas e setoriais, ou concentrando-se em questões específicas do biogás, como baixo número de novos projetos, falta de mecanismos de criação de mercado e poucos desenvolvimentos institucionais. (DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019)

2.6. Resíduos Sólidos

Resíduos sólidos e semissólidos são os resíduos resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas e de serviço de varrição. São incluídos também nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, bem como aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição. Líquidos cujas particularidades tornem inviável o lançamento na rede de tratamento de esgoto, ou exijam soluções técnicas economicamente inviáveis para seu tratamento, também são considerados resíduos sólidos, de acordo com a norma. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., 2004)

Em estudo da caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos domésticos do município de Lajeado/ RS, constatou-se que, na coleta regular, o resíduo de maior participação em percentual é o material orgânico (46% em peso) e que o percentual de materiais potencialmente recicláveis na coleta seletiva é de 51% em peso (KONRAD; CASARIL; SCHMITZ, 2010).

Por haver uma carência de estudos referentes a resíduos sólidos domésticos no município e na região onde ele está inserido, o Vale do Taquari.

Com a ajuda dessas análises é possível avaliar as políticas públicas de gestão de resíduos sólidos domésticos pela composição gravimétrica e, com base nestes dados, subsidiar melhoras no gerenciamento desses resíduos (KONRAD; CASARIL; SCHMITZ, 2010).

A análise da composição gravimétrica ou caracterização quanti-qualitativa Constitui-se na determinação dos tipos e quantidades de resíduos, valorados em porcentagem com relação a sua massa. A importância desse tipo de estudo, está em acompanhar a realidade local com relação aos resíduos gerados, servindo estes dados de base para os planos de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos e domésticos (KONRAD; CALDERAN, 2014).

A caracterização gravimétrica surge como uma importante ferramenta, pois, demonstra os tipos e quantidades de resíduos coletados, valorando-os em porcentagem com relação a sua massa, no caso do estudo que caracterizou os resíduos de um grupo de 30 municípios, abrangendo cerca de 95.000 habitantes, foi constatado que a matéria orgânica correspondia a 60,3% em peso do total de resíduos destinados a central de triagem, compostagem e disposição final, 18,2% destes resíduos eram materiais recicláveis e 21,5% rejeitos (KONRAD; CALDERAN, 2014).

A reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos. O resíduo orgânico, como resíduo sólido reciclável, é um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda, e promotor de cidadania. (BRASIL, 2010)

Resíduos orgânicos são constituídos basicamente por restos de animais ou vegetais descartados de atividades humanas. Sua origem pode ser doméstica ou urbana (restos de alimentos e podas), agrícola ou industrial (resíduos de agroindústria, indústria madeireira, frigoríficos, de processamento de alimentos, etc), de saneamento básico (dejetos humanos ou lodos de estações de tratamento de esgotos), entre outras. No caso de resíduos orgânicos alimentares, estes são gerados nos desperdícios de todas as etapas de manejo dos produtos alimentares, desde a produção, passando pela comercialização, até o consumo nos restaurantes e domicílios. (ABRELPE, 2018)

Os resíduos orgânicos são materiais que, em ambientes naturais equilibrados, se degradam espontaneamente e reciclam os nutrientes nos processos da natureza. No entanto, quando gerados em grande volume, armazenados e dispostos de forma inadequada, podem resultar em sério problema ambiental e sanitário. A disposição inadequada de resíduos orgânicos gera lixiviados que contaminam solos e corpos d'água, emite poluentes para atmosfera e favorece a proliferação de vetores de doenças (SILVA et al., 2009).

Os resíduos sólidos são definidos como material, substância ou bem descartado, resultante das atividades antrópicas, cuja destinação final se deve proceder no estado sólido, semissólido, gasoso e líquido, com características que tornem inviável seu lançamento no sistema de esgoto e nos corpos hídricos, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Em estudo realizado por (MAMBELI BARROS; TIAGO FILHO; DA SILVA, 2014) para avaliar o potencial de geração de energia da produção de biogás em aterro sanitário, que conforme os autores, a partir das políticas adotadas para gestão dos resíduos sólidos urbanos públicos e residenciais, o aterro sanitário quando projetado, regulamentado, controlado e operado com base em critérios de engenharia é a alternativa menos prejudicial para o ambiente do que lixões a céu aberto.

Na figura 5 temos dados do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil elaborado pela ABRELPE, uma associação voltada à criação, à ampliação, ao desenvolvimento e ao fortalecimento do mercado de gestão de resíduos, em colaboração com os setores público e privado, em busca de condições adequadas à atuação das empresas. Em 2018 tivemos uma média de 199.311 toneladas de resíduos sólidos coletados por dia (ABRELPE, 2018).

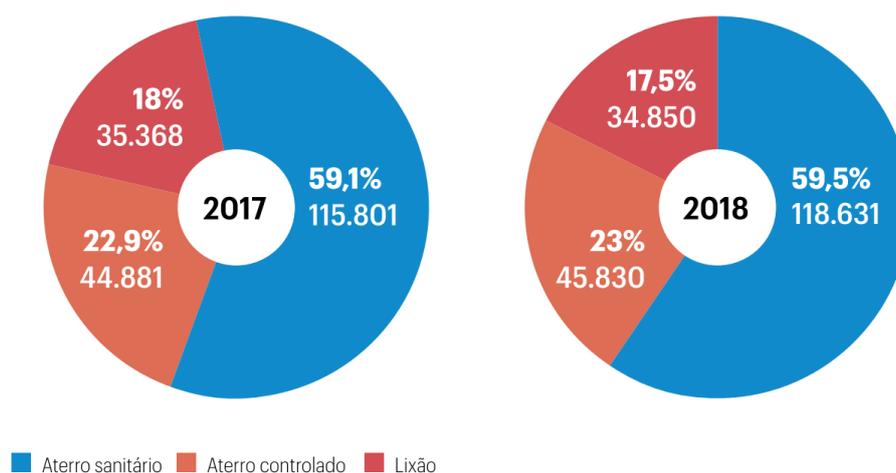
Figura 5 – Quantidade de Resíduos sólidos urbanos coletada nas regiões e no Brasil.

Regiões	2017	População 2018	2018
	RSU Total (toneladas/dia)		RSU Total (toneladas/dia)
Norte	12.705	18.182.253	13.069
Nordeste	43.871	56.760.780	43.763
Centro-Oeste	14.406	16.085.885	14.941
Sudeste	103.741	87.711.946	105.977
Sul	21.327	29.754.036	21.561
BRASIL	196.050	208.494.900	199.311

Fonte: ABRELPE, 2018.

Na figura 6 é possível ver o gráfico referente à disposição final dos resíduos sólidos urbanos. No ano de 2018 das 72,7 milhões de toneladas coletadas no Brasil, 59,5% tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários, mas unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda têm participação significativa (23% e 17,5%, respectivamente). Estão presentes em todas as regiões e recebem mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde (ABRELPE, 2018).

Figura 6 – Gráfico da disposição dos resíduos sólidos urbanos por tipo de destinação (toneladas/dia)



Fonte: ABRELPE, 2018.

Seja no lixão a céu aberto ou no aterro sanitário regulamentado, a matéria orgânica presente degrada predominantemente em um ambiente anaeróbico

que gera dois produtos, o lixiviado que é uma mistura de lodo e água da chuva que percola pela célula do aterro e o biogás, composto na sua maioria por metano (CH_4 ; 50-60%). (HAMID R. AMINI, 2011). Essa porção de metano pode ser capturada e usada como fonte de energia renovável (THEMELIS; ULLOA, 2007). O poder calorífico da produção de biogás em aterro sanitário é suficientemente alto afim de permitir seu uso como combustível em motores de combustão interna, por exemplo, e a produção de eletricidade, comprovado por (SCHNEIDER, 2012).

Para que esse processo seja eficiente e funcione (BOVE ROBERT; LUNGI PIERO, 2006) enaltecem a prevenção e diminuição da geração dos resíduos sólidos municipais com uma gestão integrada e eficiente são reconhecidos pela comunidade internacional como único caminho para reduzir as cargas ambientais relacionadas à disposição desses resíduos sólidos de maneira inadequada. E afirmam também a importância da separação dos resíduos por agregar valor ao material que pode ser reciclado, a possibilidade de produção de composto para ser usado na agricultura e o restante então depositado no aterro.

A valoração dos resíduos orgânicos pode auxiliar na solução de graves problemas ambientais como degradação do solo, erosão e mudanças climáticas. Tanto as cidades quanto as empresas e a agricultura são amplamente beneficiadas ao considerar seus resíduos sólidos orgânicos como um “recurso” precioso, convertendo-o em adubo e/ou energia, gerando empregos e contribuindo para a redução dos custos de sua disposição (ZAGO; BARROS, 2019).

O uso dos aterros sanitários para produção de biogás é uma realidade, resultados permitiram aos autores chegar à conclusão que corroboram para a importância desse modelo de geração descentralizada de energia elétrica perto das áreas urbanas e da necessidade de políticas públicas de incentivo a essa tecnologia (SILVA DOS SANTOS et al., 2018)

A adoção de métodos adequados de gestão e gerenciamento de resíduos orgânicos torna-se fundamental para o desenvolvimento urbano, periurbano e rural. A Política Nacional de Resíduos Sólidos define a destinação final

ambientalmente adequada como “a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama (Sistema Nacional do Meio Ambiente), do SNVS (Sistema Nacional de Vigilância Sanitária) e do Suasa (Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária), entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos”. Inovações tecnológicas que operam como soluções locais evitam que o gerenciamento de resíduos ultrapasse as fronteiras do gerador, com benefícios na forma de produtos cativantes para que a operação se perpetue. (BRASIL, 2010)

Quando a destinação final ambientalmente adequada de resíduos orgânicos ocorre no mesmo local de geração reduz-se drasticamente valores operacionais de gerenciamento, considerando que estes resíduos compreendem a maior parcela dos resíduos sólidos gerados (EDER; MAHLBERG, 2018).

Atualmente, estima-se que 1,3 bilhão de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) são gerados por ano em todo o mundo, e essa quantidade deverá aumentar para 2,2 bilhões de toneladas anuais até 2025. Se não for bem tratado, esse rápido crescimento de resíduos pode levar a problemas socioeconômicos e ambientais. Resíduos são potencialmente um recurso valioso perdido que pode ser convertido e utilizado de diferentes maneiras, como recursos de energia renovável para a realização do desenvolvimento sustentável. Atualmente, as tecnologias de transformação de resíduos em energia são consideradas uma tecnologia avançada e encorajadora aplicada para converter RSU em um recurso de energia renovável (metano, biogás, biocombustíveis ou biodiesel, etanol, gás de síntese ou álcool) (BISHOGE et al., 2019)

2.7. Biorreatores de pequena escala

O uso de sistemas de biodigestão de pequena escala pode ser aplicado em áreas urbanas e principalmente em áreas rurais. Economicamente viável e eficientes eles podem ser a resposta para problemas e necessidades da nossa sociedade, pois aprimoram a disponibilidade de energia e simultaneamente

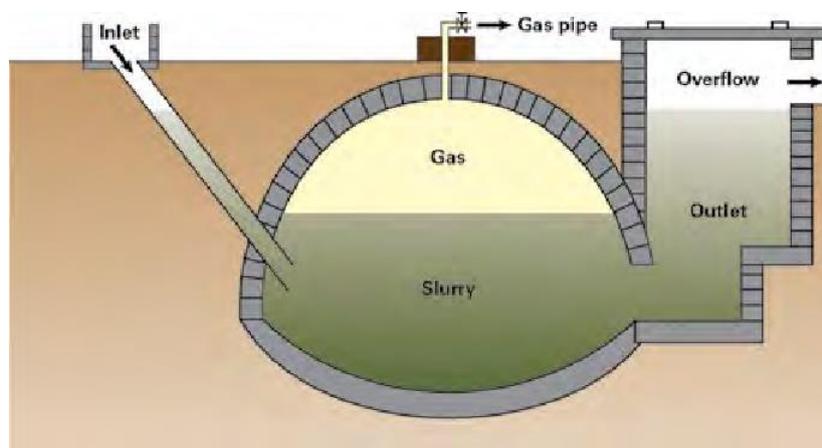
geram proteção para o solo, a água o ar e o meio ambiente, além de outros benefícios. (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

China e Índia, países em desenvolvimento, concentram a maior quantidade de biodigestores de pequena escala. Praticamente qualquer resíduo orgânico pode biodegradado e tratado em um biodigestor, fornecendo energia para cocção de alimentos, iluminação (a gás) e aquecimento, processos aliados ao incremento na concentração de nutrientes no biofertilizante, subproduto da decomposição usado por muitos agricultores como um fertilizante orgânico para pomares, lavouras e hortas. (MARTINS DAS NEVES, L.C.; CONVERTI, A.; VESSONI PENNA, 2009)

A maior parte dos biodigestores de pequena escala se adapta ao clima e condições de vários países, mas alguns detalhes devem ser considerados e podem ser fatores limitantes como o investimento inicial, que por menor que seja estamos focando em países em desenvolvimento no qual a renda per capita é baixa, acessibilidade a materiais adequados para a construção, e produção suficiente para suprir a demanda de cada família. (SMITH, 2012).

De todos os modelos já desenvolvidos, o modelo de domo fixo mais usado na China e o modelo de barril flutuante, mais usado na Índia ainda são os mais encontrados. (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012)

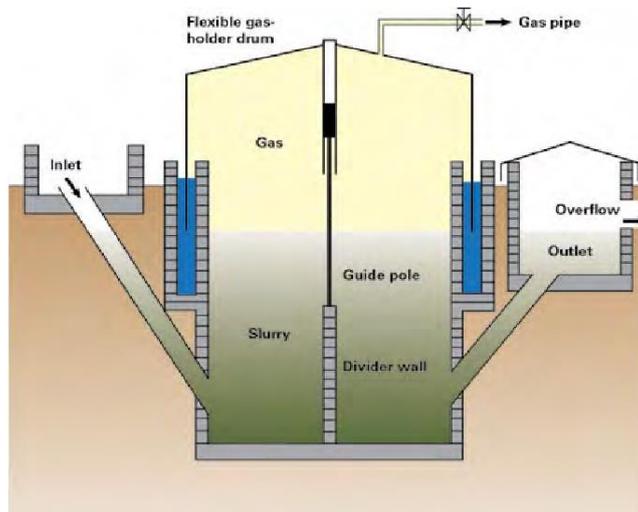
Figura 7 – Desenho esquemático de um biodigestor fixo de domo construído.



Fonte: VOGELLI, 2014.

Mesmo sendo antigo o modelo de barril flutuante ainda é um dos mais usados e aceitos para sistemas familiares em toda Índia. Eles produzem biogás a uma pressão constante com volume variável. (VÖGELI et al., 2014).

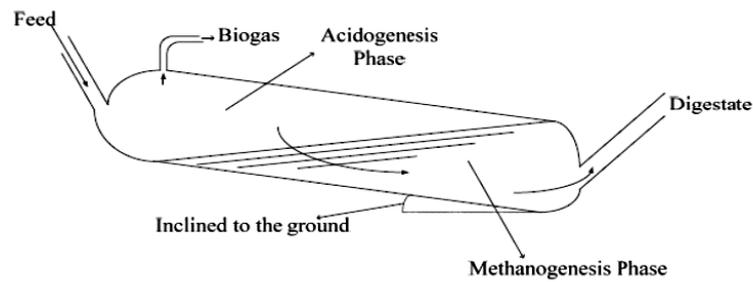
Figura 8 – Desenho esquemático de um modelo de biodigestor do tipo barril flutuante.



Fonte: VOGELLI, 2014.

A principal desvantagem do modelo de domo fixo e do modelo de barril flutuante é que depois de construídos e instalados não podem ser mudados de local. Com essa demanda de um sistema mais dinâmico e com a possibilidade de mudança de local quando eventual necessidade se desenvolveu o modelo fluxo constante (plug flow), que possui um volume constante e produz o biogás com uma pressão variável, o termo “plug flow” deriva do fato de que o resíduo colocado dentro do sistema flui até a outra extremidade sendo empurrado conforme novo material é adicionado (RAMATSA et al., 2014).

Figura 9 – Desenho esquemático de um biodigestor do tipo plug flow.



Fonte: VOGELLI, 2014.

É comprovado cientificamente que a queima de madeira, esterco, carvão gera muita fumaça e partículas de fuligem que contribuem para a poluição do ar causando problemas respiratórios e doenças.(GAUTAM; BARAL; HERAT, 2009).

Figura 10 - Imagem do Biodigestor Homebiogas 2.0 desenvolvido pela empresa Homebiogas de Israel.



Fonte: HOMEBIOGAS, 2020.

Na figura 11 temos uma imagem demonstrativa do funcionamento do biodigestor Homebiogas 2.0, com a imagem número 1 mostrando a pia de abastecimento que usada para alimentação do reator que fica na parte inferior do sistema e é retratado na imagem número 2, onde as bactérias fazem a decomposição do resíduo orgânico em um ambiente anaeróbico composto de

água, esterco bovino utilizado na ativação do sistema e dos resíduos orgânicos ali colocados que podem ser cascas de frutas e legumes, restos de comida, arroz, feijão, carnes, esterco animal e fezes humanas. A imagem 3 foca a parte superior do sistema, o gasômetro onde é armazenado o gás produzido para utilização no fogão, o sistema tem capacidade para armazenamento de 700 litros de biogás. A imagem 4 mostra a saída do reator onde é coletado o biofertilizante que pode ser usado na irrigação de hortas, lavouras ou pomares. (HOME BIOGAS, 2020)

Figura 11 – Funcionamento do Biodigestor Homebiogas 2.0.



Fonte: HOME BIOGAS, 2020

Em sistemas holísticos de produção, como sítios permaculturais, agroflorestais e agroecológicos, fornecem projetos para toda a fazenda que fazem uso sustentável de nutrientes, água, trabalho, finanças e energia a longo prazo. Ao usar resíduos orgânicos para produzir energia e reciclar com segurança os resíduos digeridos de volta ao sistema agrícola, um digestor de biogás pode ser um componente central de muitos desses sistemas holísticos (ORSKOV et al., 2014).

2.8. Benefícios do uso dos biodigestores

Os sistemas biodigestores ajudam a entender diversas questões ambientais presentes em nossa sociedade (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012):

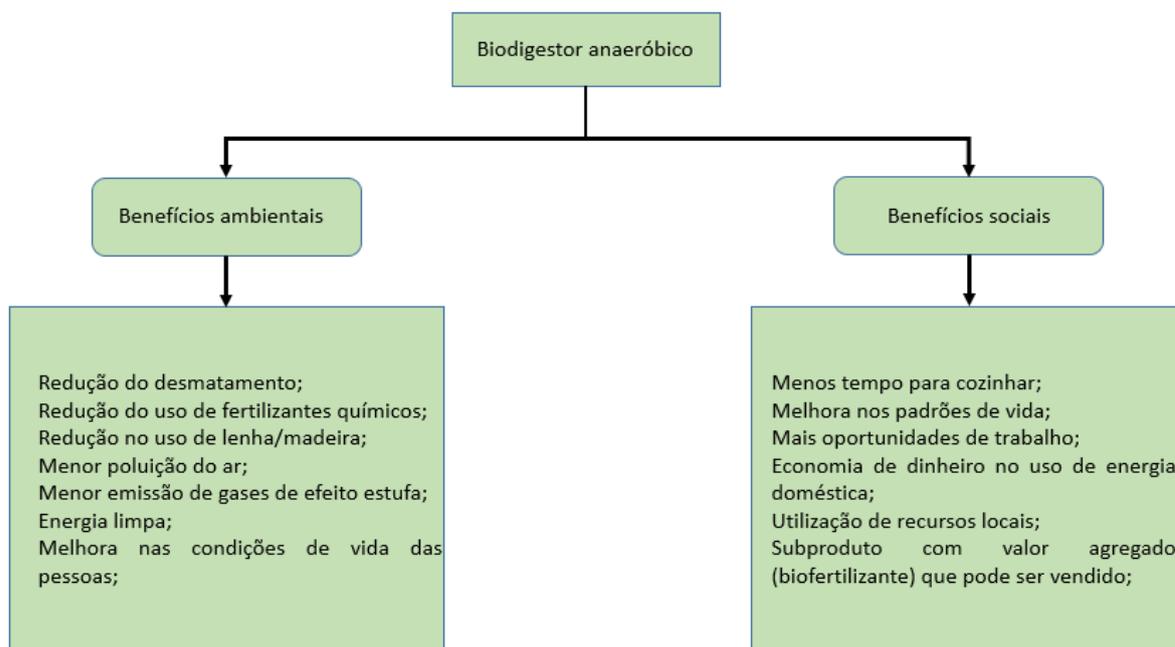
1) Ciclagem de nutrientes na natureza: a digestão anaeróbica consiste na decomposição dos resíduos orgânicos por microrganismos na ausência de oxigênio com produção de biogás e fertilizante condicionador de solos ou culturas hidropônicas. Ao aproveitar os nutrientes presentes em resíduos orgânicos para fertilização de áreas verdes e cultivares, evita-se o desperdício de alimentos e é dado uso material ao que antes seria descartado.

2) Gerenciamento de resíduos sólidos: Um biodigestor trata os resíduos orgânicos domésticos na sua origem e evita que sejam destinados de forma inadequada. A gestão de resíduos orgânicos envolve a articulação com as políticas de combate e erradicação da pobreza, de proteção ambiental, de atendimento ao direito humano à alimentação adequada e saudável, de apoio à agricultura familiar e urbana de base agroecológica, de promoção da saúde e outras matérias de relevante interesse social voltadas para a melhoria da qualidade de vida e frequentemente abordadas no dia-a-dia de crianças e jovens educandos.

3) Energia renovável: o biogás pode fornecer uma alternativa aos combustíveis fósseis usados para cozinhar como o GLP. O biogás fornece resiliência de energia no caso de falta de energia. Para certas famílias em diferentes locais no mundo, onde a queima de madeira ou carvão deixa de ser a fonte primária de obtenção de energia, principalmente para cocção dos alimentos, a diminuição à exposição a gases nocivos como o dióxido de carbono é algo muito benéfico (ROUBÍK; MAZANCOVÁ, 2019).

A figura 12 enaltece os principais benefícios ambientais e sociais da aplicação e uso dos biodigestores anaeróbicos, conforme (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

Figura 12 – Benefícios Ambientais e Sociais de biodigestores anaeróbicos.



Fonte: Adaptado de (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

O biogás produzido por uma unidade de digestão anaeróbia movida a resíduos zootécnicos, possivelmente integrada à silagem de milho, utilizada com sistemas de energia que convertem o potencial energético em energia elétrica e térmica, oferece uma vantagem ambiental significativa em relação às usinas tradicionais de produção de energia de fonte fóssil (DI BERNARDO et al., 2019)

Nos países em desenvolvimento, o biogás é produzido principalmente em pequenos digestores de escala doméstica para fornecer combustível para cozinhar ou mesmo iluminação, em comparação com os países desenvolvidos, onde o desenvolvimento do biogás é focado em larga escala. Diferentes programas de apoio ao biogás foram realizados para desenvolver sistemas domésticos de biogás para fornecer biogás para cozinhar, como uma fonte alternativa de energia, para reduzir o consumo de lenha e evitar o desmatamento, diminuir a poluição do ar interior e melhorar a fertilidade do solo (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018)

3. METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever os métodos e os processos que foram seguidos para a elaboração da pesquisa que iniciou com a instalação do sistema biodigestor Homebiogas 2.0, escolhido como o biodigestor objeto deste estudo. Para a ativação do reator foi usado esterco bovino e o abastecimento e operação do sistema inicialmente teve como base o protocolo fornecido pela empresa de Israel que desenvolveu o biodigestor. A primeira fase foi de alimentação com os resíduos orgânicos de dois restaurantes da Univates e também oriundos do ambiente doméstico. Resíduos orgânicos são substratos com alto potencial de geração de biogás, porém ainda pouco explorados (LANSING et al., 2010). Concomitante a todas as fases da pesquisa e dos diferentes substratos estudados, foram feitas avaliações da produção de biogás e do desempenho do sistema em termos de quantidade e qualidade. A segunda fase objetivou a introdução de óleo residual de cozinha dentro do reator e a terceira fase voltou a avaliar o desempenho com os resíduos orgânicos. O sistema foi instalado no Complexo de resíduos da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES junto ao prédio do ecovates ambos localizados no parque tecnológico da instituição, que fica no município de Lajeado, no Rio Grande do Sul – Brasil.

Figura 13 – Mapa de localização do Complexo de Resíduos



3.1 Instalação do sistema biodigestor

O sistema escolhido como reator para o desenvolvimento da pesquisa foi o biodigestor Homebiogas 2.0 da empresa Israelense Homebiogas. Na figura 14 abaixo ilustrada estão as primeiras etapas da montagem do sistema na central de resíduos da Univates.

Como a câmara de digestão é preenchida com líquido, o sistema deve ser colocado em uma superfície plana. Primeiramente foram fixadas as partes plásticas no biodigestor com auxílio de vaselina, braçadeiras metálicas e uma chave de fenda. Após instalado a câmara de digestão com a estrutura de entrada de resíduos orgânicos e a estrutura de saída de biogás e do efluente líquido, foi instalado o reservatório de biogás sobre o conjunto.

Figura 14 - Etapas da montagem



Imagem A mostra o detalhe da base para a instalação do biodigestor, e a paleteira usada para locomover o sistema quando necessário. As imagens B e C retratam o início do processo de montagem do sistema, e todas as peças e tubulações que compõem o biodigestor, com a colocação da câmara do reator, acoplagem das tubulações e conexões de entrada dos resíduos e saída do biogás e biofertilizante. Com uma mangueira a câmara de digestão foi sendo preenchida com água até sua capacidade suporte, conforme a imagem D.

O uso de esterco bovino para ativação do reator é recomendado por ser um substrato tradicional para produção de biogás, já estar digerido e possuir taxas acima de 50% de metano, conforme (XAVIER; NAND, 1990).

Para ativar o sistema, foram necessários 100 litros de esterco animal fresco ou semi-fresco de animais herbívoros (herbívoros), nesse caso foi usado esterco de bovino. O esterco animal foi misturado com água em baldes até criar uma pasta consistente. Com o tanque digestor quase completo de água, o êmbolo da entrada de resíduos foi retirado para o enchimento do equipamento, administrando com água quando necessário. Uma quantidade igual de líquido sai pela estrutura de saída do efluente.

Figura 15 - Segunda etapa da montagem do sistema



Imagem A detalhe do enchimento do reator de 1200 litros de capacidade de armazenamento, com água e posteriormente 100 litros de esterco fresco para inoculação do sistema, que estão em evidência na imagem D, foram armazenados em 5 baldes de 20 litros. A imagem B retirada do manual de instalação do sistema explana sobre o processo de ativação, e na imagem C o sistema já em processo final de instalação com o gasômetro já instalado.

A figura 16 mostra o sistema já instalado e ativado dentro do complexo de resíduos da Univates, é possível ver no detalhe da imagem que o gasômetro,

reservatório superior onde o gás produzido é armazenado para então ser usado está vazio.

Figura 16 – Sistema biodigestor Homebiogas 2.0.

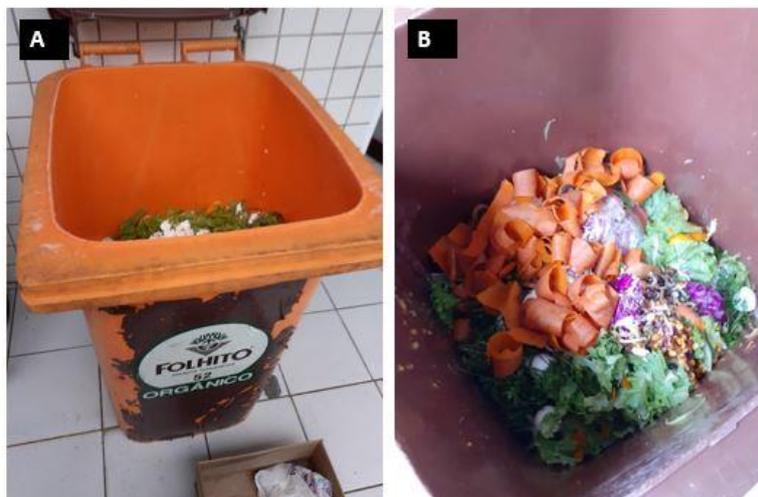


3.2. Caracterização dos substratos

3.2.1 Resíduos orgânicos alimentares

Os resíduos orgânicos dos restaurantes da Univates foram coletados (Figura 17), pesados e caracterizados para as análises de Sólidos Totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF).

Figura 17 - Coleta dos resíduos orgânicos no restaurante da Univates.



Para a obtenção da amostra foi executado o processo de quarteamento que permite a obtenção de uma amostra mais confiável, conforme a figura 18. Processo que visa à redução de massa das amostras – divisão da amostra global em alíquotas com massa menor, para obtenção da amostra final de acordo com o planejamento inicial, a amostra foi homogeneizada no liquidificador, colocada em cadinhos, pesada na balança de precisão, colocadas na estufa por 24 horas, pesadas novamente e depois colocadas na mufla por mais 2 horas.

Figura 18 - Quarteamento da amostra

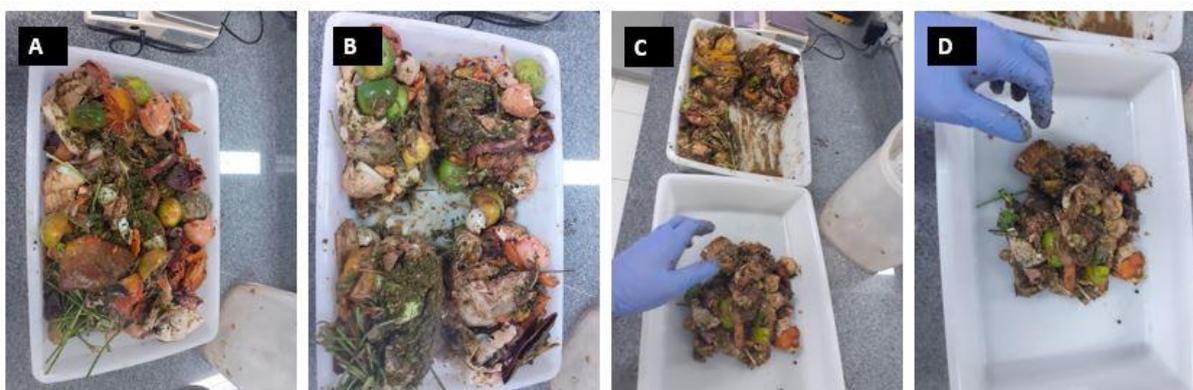
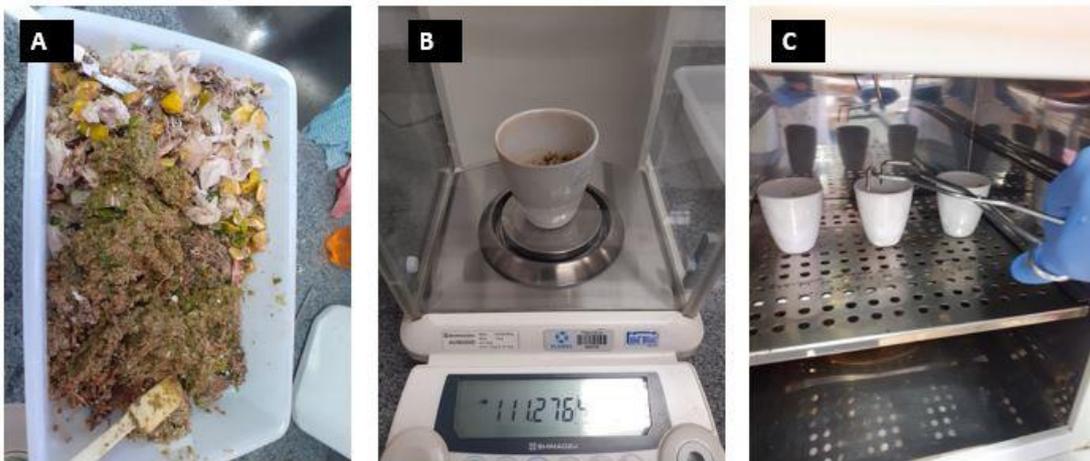


Imagem A primeira etapa do quarteamento; Divisão da amostra global imagem B; Separação de uma parte imagem C; Separação da amostra para homogeneização imagem D.

Essa análises foram feitas dentro do Centro de Pesquisa em Tecnologias Sustentáveis (CEPTS) que fica localizado dentro do parque tecnológico no prédio 21 da Univates.

Figura 19 - Homogeneização da amostra



Homogeneização da amostra de resíduos orgânicos coletados para análise de sólidos (A); Pesagem dos cadinhos e das amostras (B); Cadinhos colocados na estufa (C).

3.2.2 Óleo residual

O óleo residual estava armazenado em uma bombona de 50 litros, da qual foi sendo retirado a quantidade desejada nos dias da alimentação. Não foram feitas análises de sólidos totais e voláteis desse substrato, por já se conhecer as suas características.

Figura 20 - Óleo residual usado na alimentação



O sistema foi alimentado 3 vezes por semana, segundas, quartas e sextas feiras com 500 ml (0,04% do volume do reator de 1,2 m³) de óleo residual, durante 3 semanas.

3.3. Equipamentos para medição da qualidade e quantidade do biogás e da temperatura

Para coleta e análise dos dados obtidos foram usados diferentes equipamentos, que foram disponibilizados pelo laboratório CPETS.

3.3.1 Medição da quantidade de biogás

Com o objetivo de quantificar a quantidade de gás produzida pelo sistema foi instalado um medidor de gás alemão da marca Ritter (Figura 21) na saída do reator fazendo com que todo gás gerado passasse pelo medidor antes de ser armazenado no gasômetro. Todos os dias que o biodigestor foi alimentado foram feitas anotações da quantidade de gás gerado desde a última alimentação, com o planilhamento dos dados para utilização no levantamento e aferição dos resultados.

Figura 21 - Especificações do medidor de gás, gasômetro e detalhe da instalação.

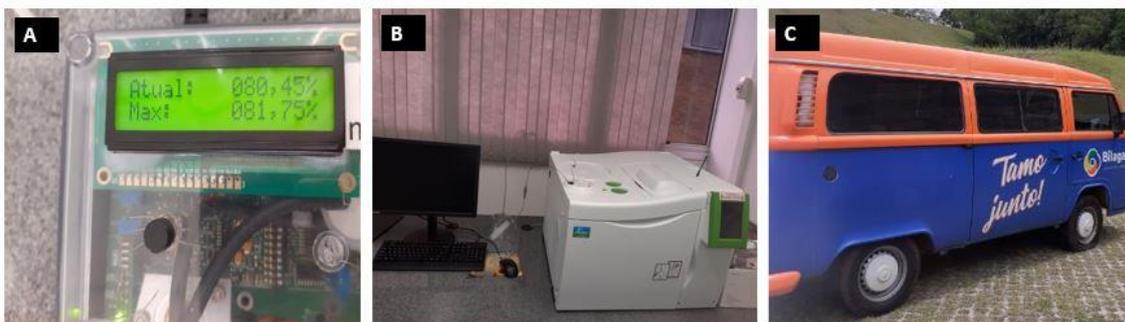


Imagem A mostra as especificações do medidor, o equipamento faz a medição em litros por hora, a imagem B detalha a instalação das mangueiras e o gasômetro, para que o gás gerado convergisse pelo medidor antes de ser armazenado no mesmo, seguido da imagem C onde é possível visualizar o sistema de marcação e contagem do gás gerado e também o detalhe do contador de gás do equipamento de medição

3.3.2. Medição da qualidade do biogás

A partir das coletas de biogás gerado as avaliações e análises foram feitas no Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CPETS/TECNOVATES) – Universidade do Vale do Taquari – Univates. Durante o período de alimentação com os resíduos orgânicos as amostras foram aferidas e avaliadas com o medidor de Metano, com o Cromatógrafo e o uso do equipamentos instalados dentro do laboratório móvel.

Figura 22 - Equipamentos para medição da qualidade do biogás gerado.



A qualidade do biogás foi obtida por um sensor específico de medição de metano, denominado Advanced Gasmeter, produzido pela empresa PRONOVA Analysentechnik GmbH & Co (imagem A), por Cromatografia Gasosa (GC), modelo Clarus 580 GC – ARNL5840 modificado (imagem B), marca PerkinElmer, equipado com Detector por Condutividade Térmica (TCD) para leitura de CH₄, CO₂, H₂, O₂ e N₂ e Detector Fotométrico de Chama (FPD) para identificação de H₂S e pelo laboratório móvel instalado dentro de uma Van (Kombi) (imagem C), que foi recebido pelo CPETS de uma empresa alemã de nome Awite, com capacidade para aferição dos dados em tempo real.

Abaixo está a tela do display instalado no computador dentro do laboratório móvel, onde era possível visualizar em tempo real os dados obtidos da qualidade em termos de concentração dos diferentes tipos de gases presentes no biogás CH₄, O₂, CO₂, H₂, H₂S.

Figura 23 – Display de leitura instalado no laboratório móvel com resultados em tempo real

Estado	Valores atuais	Histórico	Admin	Ajuda	Contato
2389	Valores	Regulações	Regulações avançadas		
		Pontos de medição 1	Pontos de medição 2	Pontos de medição 3	
	CH4 (% Vol.)	65.2(16:02)	67.0(16:10)	0.1(15:08)	
MEDIÇÃO	O2 (% Vol.)	0.00(16:02)	0.00(16:10)	20.89(15:08)	
ERROS	CO2 (% Vol.)	37.2(16:02)	33.8(16:10)	0.1(15:08)	
	H2 (ppm)	23(16:04)	---	19(15:09)	
	H2S hi (ppm)	19(16:06)	---	0(15:11)	

3.3.3. Bag de coleta

Para a coleta do gás foi usado uma bag específica conforme a figura 24, coletada com expurgo de gás antes do seu armazenamento.

Figura 24 – Bag para coleta de amostra do biogás.



3.3.4. Aquecedor e data logger

Foi instalado um aquecedor para aquários com termostato para controle da temperatura de 500W, objetivando estabilizar a temperatura na faixa dos 30 °C. Para fins de avaliação da temperatura do ambiente externo e interno foi instalado um datalogger com sensores pt100 para aferição da temperatura.

Figura 25 - Aquecedor, datalogger e pt100

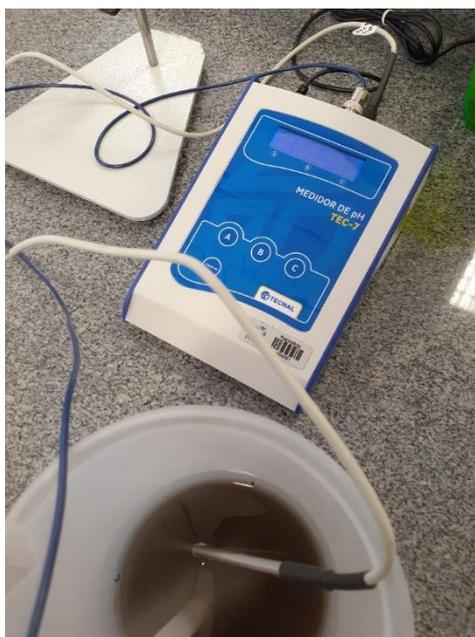


Imagem A o aquecedor de 500W da marca OceanTech; Imagem B o datalogger da marca novus; Imagem C o sensor pt100 para aferição da temperatura.

3.3.5. Potencial Hidrogênionico - pH

Para medir o pH foi utilizado um medidor de pH TEC-7 conforme a imagem 26, que foi lido duas vezes por semana para sua aferição.

Figura 26 - pHmetro de bancada



3.4. Procedimentos de alimentação do Biodigestor

A primeira alimentação do sistema com os resíduos orgânicos ocorreu no dia 09 de dezembro de 2019. Os resíduos foram coletados aleatoriamente do recipiente destinado as sobras orgânicas do restaurante do prédio 1 da Univates, foram classificados, caracterizados e pesados. O restaurante trabalha com sistema de menu a lá carte, com pratos pré-definidos, mas que mudam no decorrer da semana. Os resíduos tiveram a predominância de cascas e sementes de frutas (Mamão, banana, maçã, melão) folhas e talo de alface, guardanapo, batata frita, restos de bife, arroz, feijão, frango, suíno, demonstrando uma característica bem heterogênea.

Tabela 1 - Protocolo de alimentação indicado

Período	Quantidade
1 ^a a 5 ^a semana	Máximo 1 kg de resíduos por dia;
6 ^a a 12 ^a semana	Máximo 2 kg de resíduos por dia;
13 ^a a 22 ^a semana	Máximo 3 kg de resíduos por dia;
23 ^a semana em diante	Máximo 4 kg de resíduos por dia.

Inicialmente o sistema seria alimentado com base no protocolo da tabela 1, porém em virtude da disponibilidade de resíduo, após o início do trabalho a universidade entrou em período de férias, e posteriormente no momento das coletas, alimentação e análises, o contexto de Pandemia em razão do Corona Vírus gerou restrições de acesso e circulação no ambiente acadêmico. Com isso foram necessárias algumas adaptações. Nos primeiros 16 dias o sistema foi alimentado com 1 Kg de resíduo orgânico (RO). Depois foram 10 dias de alimentação com 2 Kg de resíduos, seguido por 11 dias com a colocação de 3

Kg e ao chegar na capacidade máxima de alimentação que é de 4 Kg, foram 27 dias de alimentação com essa quantidade de resíduo orgânico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esperava-se com este estudo demonstrar que um sistema de biodigestão anaeróbica de pequena escala, é capaz de transformar resíduos orgânicos, e óleo residual de cozinha, nesse caso oriundos de restaurantes da Universidade do Vale do Taquari, em biogás com quantidade e qualidade, objetivando reforçar a importância de sistemas descentralizados de tratamento de resíduos.

Outros trabalhos como o de (SILVA et al., 2020) obtiveram valores de produção de Biogás e Metano a partir da decomposição anaeróbica dos resíduos sólidos orgânicos domésticos (resíduos novos-RN), que corroboraram na facilidade deste material e sua fácil assimilação pelos microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia, por possuírem um elevado potencial energético. A eficiência da geração de metano no estudo de Silva et al. foi semelhante a estudos anteriores, atingindo uma média de 60% de metano com percentual máximo de 75%, este valor mostra que o resíduo sólido orgânico doméstico apresenta um potencial energético satisfatório para aproveitamento energético.

A tecnologia de digestão anaeróbia (AD) é extensivamente usado para tratar fluxos de resíduos orgânicos gerando biogás para aplicações de combustível, eletricidade e aquecimento. Muitos digestores anaeróbicos usam esterco animal como substrato e têm sido amplamente explorados, mas ainda não são tão favoráveis do ponto de vista de retorno do investimento, menor biodegradabilidade e rendimento de biogás em comparação com resíduos orgânicos alimentares (BATOOL et al., 2020).

A partir do estudo da biodigestão e co-digestão de esterco de gado leiteiro com resíduos orgânicos alimentares, os resultados indicaram a possibilidade de obter taxas de geração de biogás aprimoradas por ser um substrato altamente degradável. (BATOOL et al., 2020)

4.1. Quantidade do biogás a partir dos resíduos orgânicos - Fase 1

A primeira fase da pesquisa ocorreu entre o período de 9 de dezembro de 2019, dia da primeira alimentação, até o dia 3 de abril de 2020 e durou 120 dias. Durante a primeira avaliação da produção (fase 1) de biogás a partir dos resíduos orgânicos, os resultados foram positivos, sendo influenciados por alguns parâmetros, o principal deles foi a temperatura, por estar em um local abrigado, o sistema não estava recebendo incidência direta da energia do sol.

Existe uma correlação direta entre a temperatura do digestor e o metano produzido. A produção diária de metano geralmente segue a tendência da temperatura e aumenta proporcionalmente com o aumento da temperatura no digestor. Durante a temporada de verão, que em Lajeado, que fica localizada no sul do Brasil no estado do Rio Grande do Sul, e se caracteriza por ser uma estação bem quente e predomina por 4,0 meses, de 21 de novembro a 23 de março, com temperatura máxima média diária acima de 29 °C. O processo de digestão anaeróbia é otimizado sendo assistido pela energia solar, que desempenha um papel crucial no aumento da temperatura do processo, atingindo a fase mesofílica com aumento da produção de biogás (ALI; AL-SA'ED, 2018).

O biodigestor foi alimentado em uma escala gradual conforme protocolo definido. Dentro desse período o sistema recebeu resíduos orgânicos oriundos do restaurante universitário e em 63 dias de alimentação o sistema produziu um total de 12.642,60 litros (12,6 m³) de biogás. Quando calculamos a produção pelo total de 120 dias, temos a quantidade de 105,35 litros/dia de biogás, a partir da decomposição de um total de 177 Kg de resíduos orgânicos. Esse valor está considerando os primeiros dias de funcionamento do biodigestor quando ainda não estava equilibrado e maturado.

Tabela 2 - Quantidade de Biogás

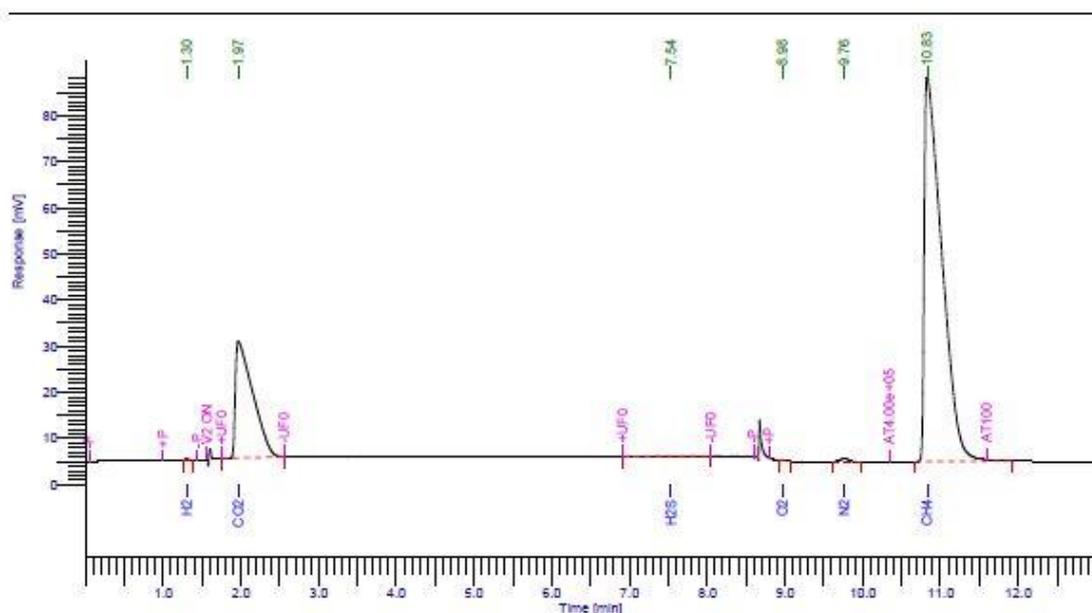
Dias	Gás em litros por dia	Kg de Resíduos
1	867	4
2	394	4
3	307	4
4	1495	4
5	443	4
6	420	4
7	699	4
8	714	4
9	565	4
Total	5904	36
Média	656	Litros/dia

Do total de 12,6 m³, a metade dessa quantidade foi produzida nos últimos 9 dias de alimentação. Ao considerar somente este período de alimentação e produção, a média diária já passa a ser bem maior, conforme a tabela 2. A média de produção diária de biogás dos últimos nove dias de alimentação foi de 656 litros, valor e quantidade condizente com a produção esperada para sistemas como o biodigestor usado no experimento de Silva et al., que obteve rendimento de biogás e metano do resíduo sólido orgânico doméstico de 180,20 e 96,09 L.kgBiomassa⁻¹, resultado próximo com o obtido no presente estudo, 164 L.kgBiomassa⁻¹.

4.2. Qualidade do Biogás a partir dos resíduos orgânicos Fase 1

Abaixo na figura 28 estão os detalhes de uma das análises cromatográficas que demonstram bons resultados com 49,16% de metano presente no biogás, 47,83% de CO₂, 0,52% N₂, 0,06% de O₂ e nesse caso 0,5% de H₂S. Aqui podemos ver como o Sulfeto de Hidrogênio se encontrava praticamente nulo na composição do biogás na primeira fase da pesquisa.

Figura 27 - Análise Cromatográfica de Gases.



ANALISE CROMATOGRÁFICA DE GASES

Peak #	Component Name	Time [min]	Area [uV*sec]	Height [uV]	Area [%]	BL	Adjusted Amount
1	H2	1.305	1465.56	543.22	0.09	BB	0.0180
2	CO2	1.968	394788.18	25309.25	23.07	*MM	47.8349
3	H2S	7.536	1878.29	87.84	0.11	*MM	0.5098
4	O2	8.975	670.54	168.33	0.04	BB	0.0649
5	N2	9.764	4849.74	665.63	0.28	BB	0.5905
6	CH4	10.831	1307365.07	83381.27	76.41	*BB	49.1659
			1711017.39	110135.54	100.00		98.1820

Missing Component Report
 Component Expected Retention (Calibration File)

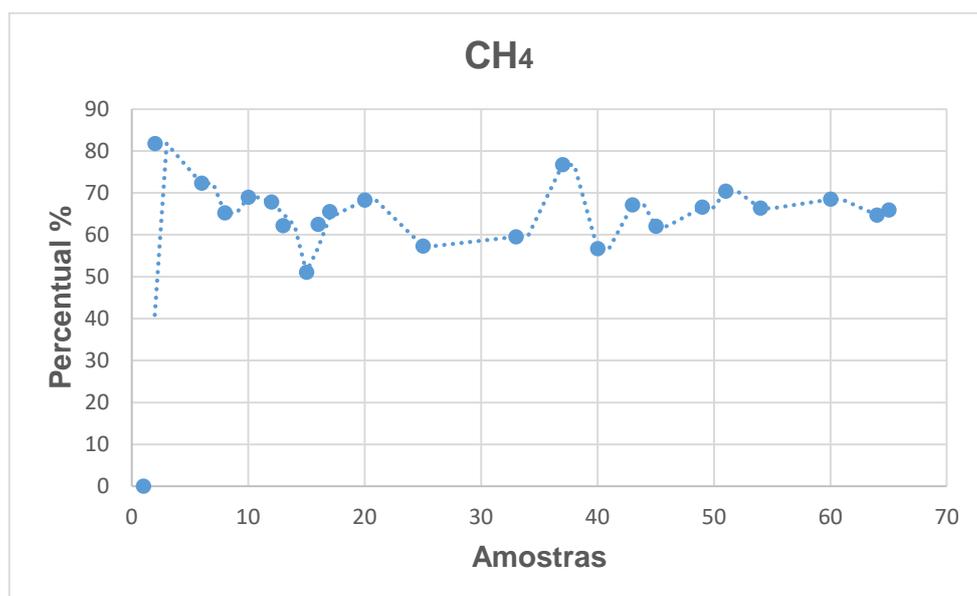
All components were found

A questão foco quando se trata da qualidade do biogás está diretamente relacionada com a quantidade de metano (CH₄) presente na sua composição.

Mas deve-se ressaltar que a composição do biogás não é exclusivamente de metano, um gás de alta combustão e inflamabilidade, ele é composto por outros gases como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), que possui características de corrosividade e toxicidade, amônia (NH₃), hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂) (KUNZ, 2019).

A quantidade de Metano (CH_4) na composição do biogás gerado permaneceu na faixa média de 65,34%, como pode ser visto no Gráfico 1, no início do processo, na primeira análise coletada teve percentual de 81,75% de CH_4 . No decorrer do experimento foram oscilando porém se mantiveram na faixa média, com exceção de uma amostra, com 51,07% de CH_4 , o mínimo percentual. Isso representa um bom resultado e corrobora com outros trabalhos que obtiveram quantidades similares, que é o caso de (SILVA et al., 2020) onde o Potencial Bioquímico de Biogás e Metano dos resíduos sólidos orgânicos domésticos (resíduos novos-RN) foi evidenciado pela fácil assimilação desse material pelos microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia e que possuem um elevado potencial energético. A eficiência da geração de metano no estudo atingiu uma média de 60% de metano com percentual máximo de 75%.

Gráfico 1 - Composição de Metano das amostras

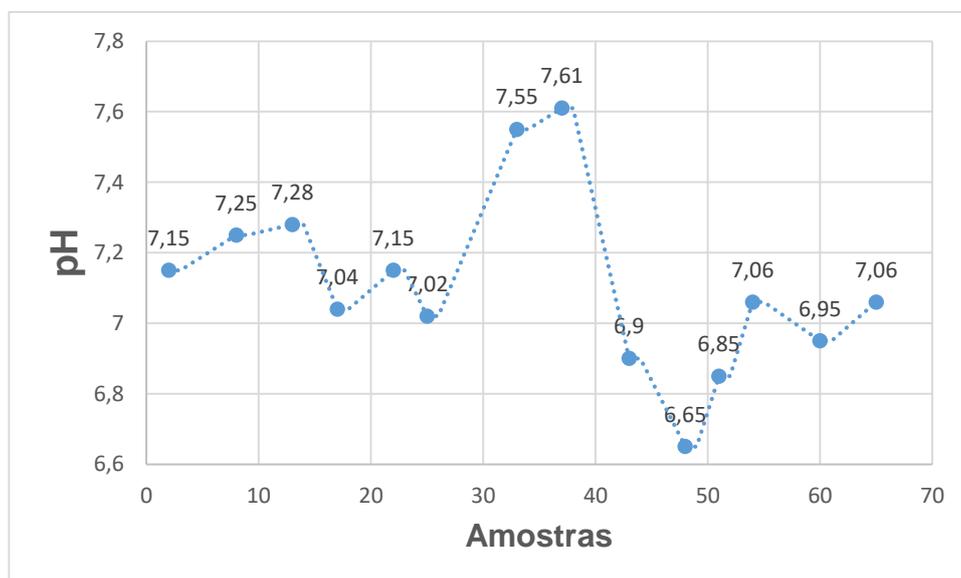


4.3. Potencial Hidrogênionico – pH do digestato

Na média geral o pH se manteve próximo da faixa de neutralidade de 7,06, conforme o Gráfico 2, porém conforme a quantidade de resíduos foi atingindo a capacidade máxima suporte de alimentação do biodigestor de 4 Kg por dia, é

possível que os ácidos voláteis produzidos durante a biodigestão tenham provocado uma redução do pH no meio reacional, como pode ver quando se atingiu a faixa de 6,65. A concentração de metano se manteve estável, e sua produção está ligada a atividade das bactérias arqueas metanogênicas, nesse processo elas produzem alcalinidade na forma de dióxido de carbono, amônia e bicarbonato e justamente é a concentração de dióxido de carbono que controla o pH do sistema (KUNZ, 2019).

Gráfico 2 - Faixas do pH na fase 1

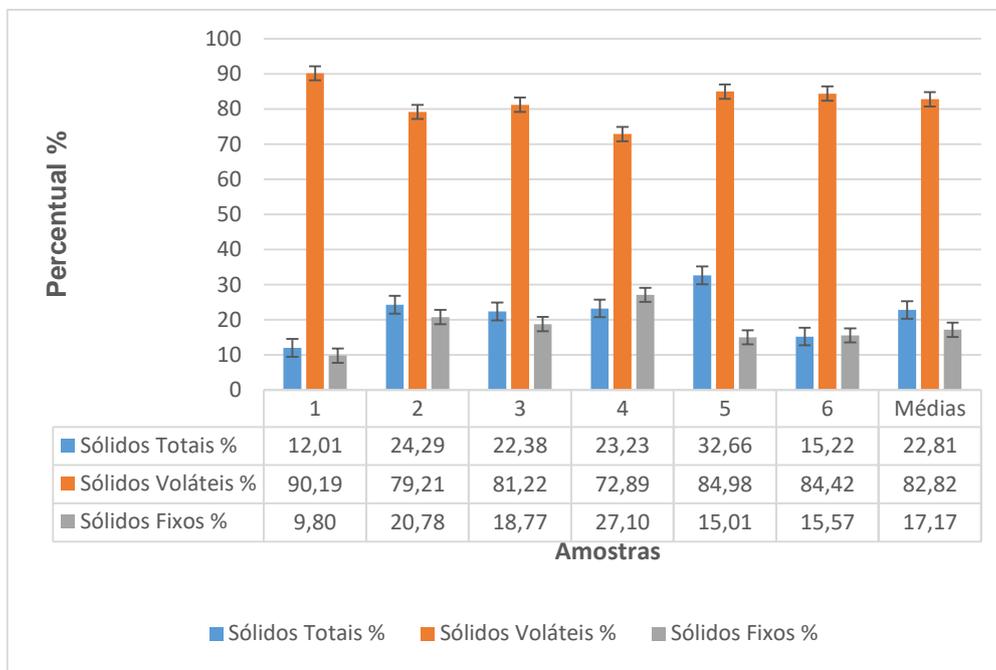


4.4. Concentração de Sólidos

As análises de concentração de sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos são muito importantes para a estimativa da produção de biogás dos substratos avaliados. Sabendo a massa de sólidos voláteis do substrato colocado no sistema, pode-se estimar o volume de biogás que deveria ser produzido por essa massa dentro do biodigestor. Conforme o gráfico a média dos sólidos totais foram de 22,80%, a concentração média de sólidos voláteis dos resíduos orgânicos foi 82,82%, ou seja, dos sólidos totais da amostra, 82,82% tem capacidade de se transformar em biogás e sólidos fixos ficou na faixa de 17,17%. O valor máximo aferido de sólidos voláteis chegou a 90,19%

na amostra 1. Esse elevado potencial biodegradável é devido à alta fração orgânica volátil. (SILVA et al., 2020)

Gráfico 3 - Concentração de Sólidos Totais, Voláteis e Fixos



Em estudo onde foi avaliado o potencial de geração de biogás da fração orgânica fresca de resíduos sólidos municipais inoculados com esterco de suíno e esterco bovino, com base no teor de sólidos voláteis, ambos apresentaram alto potencial de biodegradabilidade em termos de sólidos voláteis, e os resíduos sólidos orgânicos chegaram a valores de 93% (LOS BARBOSA et al., 2018).

Outro estudo onde foi analisado o potencial de geração de biogás de resíduos sólidos urbanos de um condomínio, obteve amostras com 92,81% de sólidos voláteis (GARTNER, 2015)

4.5. Alimentação com óleo residual – Fase 2

A partir do momento que o sistema apresentou um equilíbrio na produção diária de biogás pela decomposição dos resíduos orgânicos, foi deixado sem alimentação para que fosse consumida toda matéria orgânica presente no reator.

Após cessar com a produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos se iniciou o processo de alimentação com óleo residual de cozinha com objetivo de avaliar o biogás produzido. Conforme (LANSING et al., 2010) resíduos orgânicos domésticos e de restaurantes possuem grandes quantidades de gordura na forma de gordura animal e óleo de cozinha. Essa concentração de gordura pode otimizar a produção de biogás.

Conforme (HEBERLE, 2014), que realizou estudo no Laboratório de Biorreatores da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, no qual 24 reatores foram utilizados para avaliar a suplementação de óleo residual vegetal em lodo de estação de tratamento para produção de biogás. Ele obteve resultados consideráveis em termos de geração biogás com alto teor de metano, viabilizando neste caso a aplicação de óleo vegetal residual em lodo de estação de tratamento de efluentes como cosubstrato.

Nesse sentido a intenção foi avaliar a utilização do óleo residual como substrato no sistema biodigestor de pequena escala para obter dados e valores da quantidade ideal de óleo residual passível de ser aplicada no reator afim de otimizar a produção de biogás.

Porém os resultados obtidos não foram positivos como o esperado, a quantidade produzida foi de apenas 183 litros, muito em virtude da temperatura do reator. Conforme a tabela 2, o pH se manteve na faixa média de 7,08 durante essa fase. Não foi possível efetuar análise cromatográfica, apenas foi medido o percentual de Metano (CH_4), que teve concentração média de 65,38, e mostra que a qualidade do biogás se manteve. No período em que o sistema foi alimentado com óleo residual a temperatura média estava muito abaixo do indicado para a boa conversão desse resíduo em biogás. A data inicial da alimentação foi dia 25 de maio de 2020, a temperatura média nesse período foi de 17,4 °C. Mesmo assim foi definido manter a alimentação para ver como seria o desempenho do sistema em condições de menor temperatura. Na prática não houve um bom desempenho do reator na produção de biogás, entre o período de 25 de maio, até 12 de junho de 2020, no total foram colocados 4,5 litros de óleo residual dentro do reator, separados por 3 alimentações semanais, em um período de 3 semanas.

Tabela 3 - Potencial hidrogênionico e concentração de Metano na Fase 2

Dias	pH	CH4 (%)
1	7,34	68,59
2	7,12	65,7
3	7,05	67,54
4	6,98	66,8
5	7,15	65,38
6	6,95	62,09
7	7,08	58,8
8	6,92	62,5
9	7,18	64,12
Média	7,08	65,38

A partir dos indicadores da tabela 3, oriundo das coletas de amostras de biogás, foi possível averiguar que algum problema de característica física, não estava permitindo a passagem do gás pelo medidor Ritter, pois o percentual de Metano estava bom, similar ao da fase 1, e o pH estava dentro da faixa da neutralidade. Isso levou a uma checagem geral de todo o sistema.

Após uma minuciosa vistoria em todas as mangueiras do sistema foi encontrado um detalhe que estava impedindo a passagem do gás pelo medidor Ritter e conseqüentemente seu armazenamento no gasômetro do biodigestor. Como pode ser visto no detalhe da figura 28, a mangueira que levava o gás produzido no reator para a entrada no medidor Ritter estava entupida com água, também chamado de lacre hidráulico, algo que pode acontecer em virtude do biogás conter traços de hidrogênio que pode se acumular nas mangueiras. Esse detalhe, aliado à baixa temperatura foram os fatores principais que influenciaram no baixo desempenho do reator em produzir biogás em uma quantidade mais significativa.

Figura 28 -Lacre Hidráulico



A maior parte dos trabalhos com suplementação e óleo residual de cozinha, optaram por usá-lo como um cosubstrato para otimizar a degradação do substrato principal e diminuir a quantidade de sólidos fixos e fibras, materiais de baixa degradação. O processo de co-digestão anaeróbia é a digestão de dois ou mais substratos que se complementam, acelerando a degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, o rendimento do biogás e do metano, gerando maior rendimento específico e fertilizante orgânico de melhor qualidade. (SUNADA et al., 2018)

Ainda em Sunada et al. o estudo comparativo teve como objetivo encontrar as doses ótimas de inclusão de óleo de cozinha residual na co-digestão com esterco de gado leiteiro ou esterco de suíno, a fim de maximizar as reduções de sólidos e constituintes fibrosos, bem como aumentar os rendimentos específicos de biogás, reduzindo assim o impacto ambiental causado por esses resíduos e promovendo a reciclagem de energia. (SUNADA et al., 2018)

No presente estudo o óleo residual foi utilizado como suplemento porém não em termos de co-digestão, pois não foi introduzido no biodigestor junto com os resíduos orgânicos, e sim após a completa degradação da matéria orgânica presente. O objetivo dessa metodologia foi avaliar separadamente a produção

de cada um desses substratos, e o desempenho do reator/biodigestor analisado com esse tipo de substrato. Sendo essa avaliação passível de acontecer em um futuro estudo.

Em relato e outros estudo como o de Cavaleiro et al., (2013) isso pode ter acontecido porque a hidrólise do óleo é considerada uma etapa limitante da digestão anaeróbia. Outro motivo constatado é que a densidade do óleo é menor que a água, levando a sua flutuação na superfície do digestor e limitando seu contato com os microrganismos, em estudos de laboratório os reatores de bancada foram sacudidos para essa mistura (MENG et al., 2015). Mas dentro do biodigestor Homebiogas não foi possível fazer essa mistura e homogeneização do substrato.

Outro fator relatado é em relação ao maior tempo de digestão do óleo residual comparado com os resíduos orgânicos. A estabilidade do processo de digestão anaeróbia é muito importante para manter o desempenho sustentável dos digestores. A concentração de óleo pode afetar a estabilidade do sistema de digestão, já que a alta concentração de óleo pode levar a alto teor de nitrogênio derivado de amônia ($\text{NH}_3\text{-N}$) acumulado nos digestores e também mudanças de alcalinidade, pH (MENG et al., 2015).

Outro estudo relatou uma longa fase de latência e uma baixa taxa de produção de CH_4 na digestão anaeróbia do óleo de cozinha residual no seu experimento (MARCHETTI; VASMARA; FIUME, 2019), mas que ao ser combinado com dejetos de suínos a fase de adaptação foi diminuído e as concentrações de metano aumentaram.

Particularmente nesse estudo a quantidade de metano não foi prejudicada, mas sim a quantidade de biogás produzido. Fatores já citados como a falta de homogeneização do substrato com o óleo residual, a quantidade de óleo usada, podem ter interferido no bom desempenho do reator com esse substrato.

4.6. Segunda alimentação com resíduos orgânicos fase 3

Em virtude do desempenho abaixo do esperado na produção de biogás a partir do óleo residual mesmo após a limpeza e desentupimento do lacre

hidráulico, como ainda havia tempo útil para uma nova batelada de testes, a opção seguida foi voltar a alimentar o biodigestor com resíduos orgânicos, tentar controlar a temperatura dentro do reator com o aquecedor elétrico. Os resultados dessa fase estão na tabela 3 e foram obtidos pelo laboratório móvel da Kombi. Nela estão demonstrados a temperatura interna e externa, a quantidade de resíduo alimentado no reator por dia, valores de metano, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, oxigênio e pH.

No dia 30 de setembro de 2020 o biodigestor passou a receber 4 quilogramas de resíduos orgânicos, igualmente coletados no restaurante da Univates, com uma pequena alteração no protocolo de alimentação, o sistema foi alimentado 3 vezes por semana, o que propiciou uma retomada na produção de biogás. O aquecedor estava instalado juntamente com o datalogger que coletava informações diárias sobre a temperatura externa e interna do reator.

Até o dia 26 de outubro o sistema recebeu um total de 44 quilogramas de resíduos orgânicos e apresentou uma produção menor de biogás durante esse período de 27 dias, comparado com a primeira fase de alimentação. Com um total de 2532 litros, que resultou em 57,55 L.kgBiomassa⁻¹.

Tabela 4 - Parâmetros aferidos na Fase 3

Fase 1 - segunda alimentação com resíduos orgânicos										
DATA	PESO (kg)	Litros produzidos	CH4 %	CO2 %	H2 ppm	O2	H2S ppm	pH Digestato	T °C Externo	T °C Interno
30/09/2020	4	39,2	65,44	44,33	11,32	0,01	0,00	6,9	21,45	20,25
05/10/2020	4	279,1	63,24	39,72	11,65	0,01	0,07	7,07	19,1	21,7
07/10/2020	4	193	66,03	37,15	8,87	0,02	16,51	6,97	18,15	20,4
09/10/2020	4	169	66,27	37,05	9,24	0,01	18,65	6,68	16,75	19,45
12/10/2020	4	231	67,33	35,99	8,30	0,00	138,75	7,04	19,1	18,2
14/10/2020	4	441,7	68,41	35,02	7,41	1,06	133,61	6,13	17,05	17,8
16/10/2020	4	197	67,31	35,94	10,28	0,00	150,14	5,98	19,9	17,95
19/10/2020	4	285	64,34	38,55	11,05	0,00	200,31	6,24	23,45	20,65
21/10/2020	4	195	63,41	39,75	9,20	0,00	240,59	6,09	22,55	21,9
23/10/2020	4	200	63,43	39,98	10,74	0,42	247,89	6,09	22,25	21,9
26/10/2020	4	302	62,71	40,68	8,65	0,00	241,45	6,23	24,1	23
Total Dias	Total Kg	Total Biogás Litros	Média							
11	44	2532	65,44	38,55	9,24	0,01	138,75	6,24	19,9	20,4

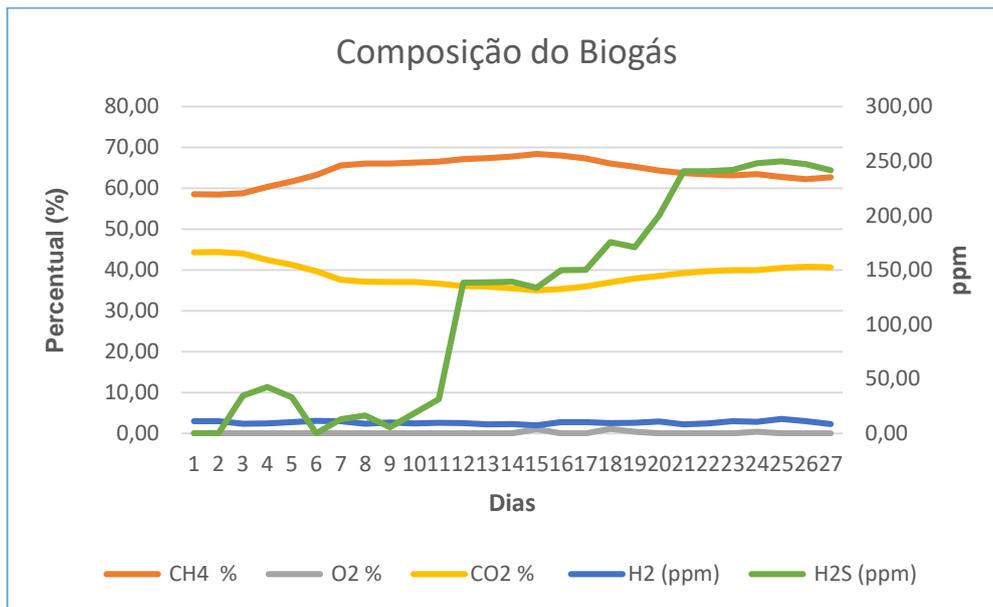
Nesse momento o sistema ainda estava instalado dentro do prédio no complexo de resíduos e foi averiguado que mesmo o termostato do aquecedor estando na faixa dos 30 °C, a temperatura efetiva medida pelo datalogger mostrava que 500W de potência desse aparelho não estava sendo o suficiente para manter a temperatura nessa faixa, sendo que a temperatura média dentro do reator nesse período ficou em 20,4 °C. O aquecedor não conseguiu manter a temperatura na faixa ideal de 30 °C, o que justifica a baixa produção de biogás.

A temperatura é um fator de extrema importância nas propriedades físico-químicas dos processos de decomposição anaeróbia. Têm influência direta na velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos, e na dinâmica populacional nos biodigestores, sejam eles pequenos, médios ou de grande escala. Em locais com variações na amplitude térmica, a produção de biogás pode ser comprometida, se indica cuidados para que ela não oscile bruscamente mais do que 2 °C, e enaltece a importância do seu controle na biomassa para garantir uniformidade da geração de biogás (KUNZ, 2019)

A composição de metano permaneceu na média de 65,44%, CO₂ com 38,55%, pH 6,24, a média de hidrogênio na composição foi de 9,24 ppm. O Hidrogênio pode ser medido em ppm ou percentual, em um trabalho que avaliou a co-digestão anaeróbia e utilizou a matéria-prima composta de resíduos de frutas e vegetais, lodo ativado por resíduos, águas residuais de moinho de oliva, e esterco de gado obteve 8% de H₂, 28,5% de CO₂ e 63,5% CH₄ (FARHAT et al., 2018).

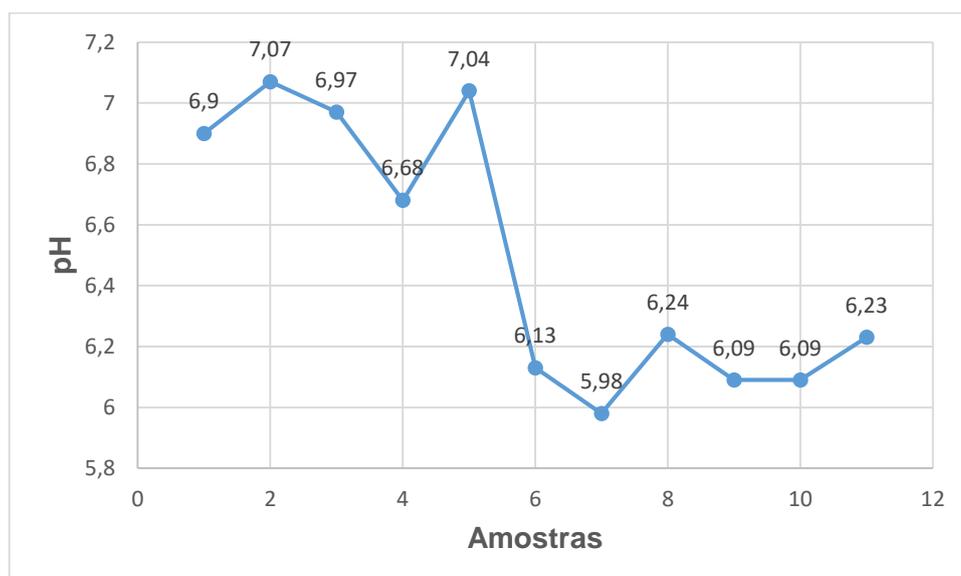
Um detalhe importante com as aferições de dados pelo Kombi laboratório foi a constatação da elevação das quantidades de H₂S na composição do biogás gerado chegando a 247,9 ppm. Conforme especificações do fabricante do biodigestor Homebiogas é necessário a troca do filtro de carvão ativado a cada 6 meses em média, pode demorar até 12 meses para que seja necessário essa troca. Isso pode muito bem ser visto no gráfico 2 quando as concentrações de H₂S começam a subir a partir do dia 11 de outubro de 2020, a 10 dias de fechar 1 ano da instalação do sistema.

Gráfico 4 - Composição do biogás gerado na fase 3



O sistema usa um filtro de carvão ativado para a remoção do sulfeto de hidrogênio (H_2S), que se caracteriza por um remoção pelo processo de adsorção, e que normalmente é extremamente eficiente na redução do H_2S (< 5 ppm). Mas quando é atingido a saturação e perda da eficiência de adsorção é necessário a troca do carvão ativado. (KUNZ, 2019)

Gráfico 5 - pH do digestato na fase 3



Nessa última fase do experimento, o pH se comportou de maneira similar, conforme o gráfico 5, tendo pequenas oscilações, mas com uma média um pouco abaixo das outras etapas, ficando em 6,24.

4.7. Transferência para área externa e fechamento das discussões

No final do período de avaliações foi decidido pela retirada do biodigestor da parte interna e colocado para a área externa. Foi feito então uma avaliação rápida nesse cenário, que gerou bons resultados com a introdução de farinha de tapioca pronta para o consumo, substrato de fácil absorção e alta conversão em biogás pela elevada concentração de carboidratos, como forma de potencializar a produção do biogás. Com a inserção de 1 Kg por dia, durante duas semanas. No total o sistema recebeu 10 Kg de farinha de tapioca pois foi alimentado de segunda a sexta feira. O objetivo era uma avaliação mais aprofundada da capacidade desse substrato, porém em virtude de alguns problemas, do Corona vírus, e do tempo isso não foi possível. Apenas aferidos e coletados alguns dados: Nesse período de 14 dias foram produzidos 1652 litros de biogás, o que representou uma produção de $118 \text{ L.kgBiomassa}^{-1}$. A concentração de Metano ficou na média de 66,58 %.

Figura 29 - Biodigestor instalado na área externa com o gasômetro cheio de gás



Quanto aos aspectos ambientais, os ganhos relacionados ao tratamento descentralizado de resíduos sólidos urbanos, focando na fração orgânica pelo tratamento biológico, seja pela via aeróbia (compostagem) ou anaeróbia (biodigestão), são enormes, ao passo que mais da metade dos resíduos que produzimos diariamente se enquadram nessas características. No município de Lajeado essa fração orgânica é de 51% (KONRAD; CASARIL; SCHMITZ, 2010). Com base nesse levantamento e na quantidade diária média de 50 toneladas de resíduos que são direcionadas para o aterro sanitário da cidade, temos a quantidade de 25,5 toneladas passíveis de tratamento biológico, multiplicado por 30 dias chegamos no valor de 765 toneladas por mês, ou 9180 toneladas por ano.

A partir desses dados podemos calcular a quantidade de biogás que poderia ser produzida na cidade de Lajeado se tivéssemos aproveitamento dessa rica matéria orgânica. Em 50% desse total, teríamos 382,5 toneladas de resíduos orgânicos, sendo transformadas em biogás, podendo chegar em uma produção de 53.932,500 litros ou 53.932,5 m³ de biogás por mês.

Por si só esses valores já servem como justificativa para o fomento da implementação de sistemas descentralizados de tratamento biológico, aliado ao fato que quando esses materiais são segregados e separados na fonte geradora, acabam por agregar mais valor na parcela reciclável, que muitas vezes não é reciclado em virtude da mistura com a fração orgânica.

5. CONCLUSÃO

O sistema biodigestor de pequena escala Homebiogas foi instalado e operado corretamente. Os substratos escolhidos para alimentação do sistema foram coletados e caracterizados. A avaliação da quantidade e da qualidade do biogás foi feita conforme os objetivos deste trabalho.

Sistemas de pequena escala para biodigestão anaeróbia são uma excelente ferramenta e alternativa para tratamento biológico de resíduos orgânicos. O presente estudo pôde avaliar na prática um biodigestor de pequena escala na transformação da matéria orgânica em biogás.

Alguns detalhes devem ser levados em consideração, o principal deles é o local de instalação desses equipamentos, principalmente em regiões de clima com invernos mais rigorosos e variações na amplitude térmica. Sendo importante a instalação em locais onde se têm a maior incidência de luz solar possível e conseqüentemente aumento da temperatura interna nos reatores.

Os resíduos orgânicos são um excelente substrato para geração de biogás, e justamente por serem a maior parte dos resíduos gerados diariamente pelas pessoas, empresas, indústrias, a sociedade no geral, ele deve ter um destino melhor que os aterros sanitários, gerando valor e sendo transformado em energia limpa e renovável.

Assim como o óleo residual, que também é uma excelente fonte de sólidos voláteis passíveis de degradação e biodigestão. Por mais que no presente estudo os resultados obtidos não tenham sido como esperados, o potencial de geração de biogás desse tipo de substrato deve ser mais estudado e sim usado nesse processo. A partir da comparação e leitura de outros trabalhos, aliado aos resultados obtidos, pode se afirmar que o principal limitante para a conversão do óleo residual em biogás foi a temperatura e a não possibilidade de homogeneização do digestato quando na presença deste substrato.

Para futuros estudos se aconselha a análise de co-digestão desse substrato com outros tipos de resíduos. Uma análise mais aprofundada dos resíduos orgânicos.

6. REFERÊNCIAS

ABRELPE. PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL. v. 16, 2018.

ALI, R.; AL-SA'ED, R. Pilot-scale anaerobic digester for enhanced biogas production from poultry manure using a solar water heating system.

International Journal of Environmental Studies, v. 75, n. 1, p. 201–213, 2018.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Atlas de energia elétrica do Brasil/ Agência Nacional de Energia Elétrica**. 3 edição ed. Brasília: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: p. 71, 2004.

BATOOL, N. et al. Bio-methane production potential assays of organic waste by anaerobic digestion and co-digestion. **Pakistan Journal of Zoology**, v. 52, n. 3, p. 971–976, 2020.

BILGILI, F. et al. Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. January 2016, p. 830–845, 2017.

BISHOGE, O. K. et al. The adaptation of waste-to-energy technologies: Towards the conversion of municipal solid waste into a renewable energy resource. **Environmental Reviews**, v. 27, n. 4, p. 435–446, 2019.

BOVE ROBERT; LUNGHI PIERO. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Elsevier**, v. 47, n. 11–12, p. 1391–1401, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 - institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.**, 2010. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>

BRASIL. Base Nacional Comum - BNCC. **Mec**, p. 600, 2018.

COLLINS, G. et al. Psychrophilic and mesophilic anaerobic digestion of brewery effluent : A comparative study. n. August, 2006.

CUNHA, L. H. D. O. Diálogos entre saberes (LEFF, E. Epistemologia ambiental. São Paulo: Cortez, 2001). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 4, p. 65–66, 2001.

DE MIRANDA, R. L.; MARTINS, E. M.; LOPES, K. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. **Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**, v. 5, n. 1, p. 94, 2019.

DE OLIVEIRA, L. G. S.; NEGRO, S. O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, n. March, p. 462–481, 2019.

DI BERNARDO, E. et al. Economical Analysis of Alternative Uses of Biogas Produced by an Anaerobic Digestion Plant. **International Journal of Environmental Research**, v. 13, n. 1, p. 199–211, 2019.

DI MARIA, F. et al. Amount of energy recoverable from an existing sludge digester with the co-digestion with fruit and vegetable waste at reduced retention time. 2015.

EDER, A.; MAHLBERG, B. Size, subsidies and technical efficiency in renewable energy production: The case of Austrian biogas plants. **Energy Journal**, v. 39, n. 1, p. 185–210, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Relatório Síntese. BEN 2019, ano base 2018. p. 67, 2019.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture**. [s.l: s.n.].

FAO. **THE STATE OF FOOD AND AGRICULTURE**. [s.l: s.n.].

FARHAT, A. et al. Fermentative hydrogen and methane co-production from anaerobic co-digestion of organic wastes at high loading rate coupling continuously and sequencing batch digesters. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 27945–27958, 2018.

- FEITOSA, A. K.; BARDEN, J. E.; KONRAD, O. Educação Ambiental: uma experiência com resíduos sólidos domiciliares. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 12, n. 2, p. 178–183, 2017.
- FERNANDES, V. et al. Sustainable Development, Interdisciplinarity and Environmental Sciences. **Sustainable Development, Interdisciplinarity and Environmental Sciences**, v. 10, n. 21, p. 509–533, 2013.
- FRANCISCO, M. et al. Crise energética mundial e o papel do Brasil na problemática de biocombustíveis. **Agronomia Colombiana**, v. 29, n. 2, p. 231–240, 2011.
- GARTNER, G. L. Geração de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos em condomínios verticais. **Universidade do Vale do Itajaí - Itajaí**, p. 68, 2015.
- GAUTAM, R.; BARAL, S.; HERAT, S. Biogas as a sustainable energy source in Nepal: Present status and future challenges. v. 13, n. 1, p. 248–252, 2009.
- HAMID R. AMINI, D. R. R. Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. **Elsevier**, v. 31, n. 9–10, p. 2020–2026, 2011.
- HEBERLE, A. N. A. **Biogás gerado a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes suplementado com óleo vegetal residual**. [s.l: s.n.].
- HOME BIOGAS. **homebiogas.com**. Disponível em: <www.homebiogas.com>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- JOSELIN HERBERT, G. M.; UNNI KRISHNAN, A. Quantifying environmental performance of biomass energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 292–308, 2016.
- KAPOOR, R. et al. **Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review**. [s.l: s.n.].
- KONRAD, O. et al. **Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano**. 1. ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2016.
- KONRAD, O.; CALDERAN, T. B. Gravimetric composition of solid waste intended for central of screening, composting and final disposal. p. 284–292, 2014.

KONRAD, O.; CASARIL, C. E.; SCHMITZ, M. Estudo Dos Resíduos Sólidos Domésticos De Lajeado / Rs Pela Caracterização Gravimétrica. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 2, n. 4, p. 57–62, 2010.

KUNZ, A. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LANSING, S. et al. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. **Elsevier**, v. 101, n. 12, p. 4362–4370, 2010.

LOS BARBOSA, F. J. et al. Biogas generation potential of anaerobic co-digestion of municipal solid wastes and livestock manures. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 44, n. 3, p. 248–258, 2018.

LOUREIRO, L. F.; CLAUDEISE, A.; SILVEIRA, C. Interdisciplinaridade : Uma Proposta Epistemológica Para a Ciência Pós-Moderna. v. 14, n. December, p. 127–147, 2019.

MAMBELI BARROS, R.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150–164, 2014.

MARCHETTI, R.; VASMARA, C.; FIUME, F. Pig slurry improves the anaerobic digestion of waste cooking oil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, n. 19, p. 8267–8279, 2019.

MARTINS DAS NEVES, L.C.; CONVERTI, A.; VESSONI PENNA, T. C. Biogas Production: New Trends for Alternative Energy Sources in Rural and Urban Zones. **Chemical Engineering & Technology**, v. 32, n. 8, p. 1147–1153, 2009.

MENG, Y. et al. Evaluating biomethane production from anaerobic mono- and co-digestion of food waste and floatable oil (FO) skimmed from food waste. **Bioresource Technology**, v. 185, n. February, p. 7–13, 2015.

MONTINGELLI, M. E.; TEDESCO, S.; OLABI, A. G. Biogas production from algal biomass: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 961–972, 2015.

ORSKOV, E. R. et al. Overview of holistic application of biogas for small scale

farmers in Sub-Saharan Africa. **Biomass and Bioenergy**, v. 70, p. 4–16, 2014.

PNUD. Portfólio Dos Projetos Do Pnud Brasil À Luz Dos Objetivos De Desenvolvimento Sustentável 50 Anos Do Pnud E a Atuação Do Pnud No Brasil: Em Direção Ao Futuro Que Queremos. 2016.

PRADE, T. et al. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 3040–3049, 2011.

PROCÓPIO FILHO, A.; VAZ, A. C. O Brasil no contexto energético mundial. **Revista Brasileira de Política Internacional**, v. 40, n. 1, p. 75–122, 1997.

RAJENDRAN, K. .; ASLANZADEH, S. .; TAHERZADEH, M. J. . **Household biogas digesters-A review**. [s.l.: s.n.]. v. 5

RAMATSA, I. M. et al. DESIGN OF THE BIO-DIGESTER FOR BIOGAS PRODUCTION : REVIEW. n. January, 2014.

ROUBÍK, H.; MAZANCOVÁ, J. Small-scale biogas plants in central Vietnam and biogas appliances with a focus on a flue gas analysis of biogas cook stoves. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1138–1145, 2019.

RUANE, J.; SONNINO, A.; AGOSTINI, A. Bioenergy and the potential contribution of agricultural biotechnologies in developing countries. v. 34, n. April 2009, p. 1427–1439, 2010.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457–472, 2018.

SCHNEIDER, D. R. M. K. A. H. Cost-effectiveness of GHG emission reduction measures and energy recovery from municipal waste in Croatia. **Elsevier**, v. 48, n. 1, p. 203–211, 2012.

SHARMA, B. et al. Recycling of Organic Wastes in Agriculture: An Environmental Perspective. **International Journal of Environmental Research**, v. 13, n. 2, p. 409–429, 2019.

SILVA, C. D. O. et al. Resíduos sólidos orgânicos domésticos como substrato potencial para produção de biogás. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 2, p. 204–212, 2020.

SILVA, C. L. . et al. A cadeia de biogás e a sustentabilidade local: uma análise socioeconômica ambiental da energia de resíduos sólidos urbanos do aterro da Caximba em Curitiba. *Innovar*, 19(34), 83-98. 2009.

SILVA DOS SANTOS, I. F. et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, n. May 2017, p. 54–63, 2018.

SMITH, J. U. The Potential of Small-Scale Biogas Digesters to Alleviate Poverty and Improve Long Term Sustainability of Ecosystem Services in Sub-Saharan Africa. 2012.

SUNADA, N. DA S. et al. Anaerobic co-digestion of animal manure at different waste cooking oil concentrations. **Ciencia Rural**, v. 48, n. 7, p. 1–8, 2018.

THEMELIS, N. J. ;; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. **Elsevier**, v. 32, n. 7, p. 1243–1257, 2007.

VITA. Testing the Efficiency of Wood Burning Stoves: International Standards; Volunteers in Technical Assistance. **Inc.: Arlington, TX, USA**, 1985.

VÖGELI, Y. et al. Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries - Practical Information and Case Studies. 2014.

XAVIER, S.; NAND, K. A preliminary study on biogas production from cowdung using fixed-bed digesters. v. 34, n. 2, p. 161–165, 1990.

ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. DE V. Management of solid organic waste in brazil: From legal ordinance to reality. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 219–228, 2019.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09