UFRR

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
PRÓ – REITORIA DE PESQUISA E PÓS - GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS
MESTRADO EM RECURSOS NATURAIS

TARSILA ZANDONÁ AGUILAR

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE BIODIGESTOR PARA APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE NAS ZONAS URBANA E RURAL DE BOA VISTA-RR

BOA VISTA, RR
2021

TARSILA ZANDONÁ AGUILAR

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE BIODIGESTOR PARA APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE NAS ZONAS URBANA E RURAL DE BOA VISTA-RR

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre do curso de Mestrado em Ciências Ambientais (Recursos Naturais) do Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Roraima.

Orientadora: Profª Drª. Lena Simone Barata Souza
Co-orientador: Profº. Dr. Carlos Sander

BOA VISTA, RR
2021

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

A283i Aguilar, Tarsila Zandoná.
Implantação e avaliação de biodigestor para aproveitamento de biogás e biofertilizante nas zonas urbana e rural de Boa Vista-RR / Tarsila Zandoná Aguilar. – Boa Vista, 2021.
63 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Lena Simone Barata Souza.
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Sander.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Roraima, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais.

1 – Biodigestão. 2 – Resíduos sólidos orgânicos. 3 – Sustentabilidade. 4 – Digestato. I – Título. II – Souza, Lena Simone Barata (orientadora). III – Sander, Carlos (coorientador).

CDU – 628.4(811.4)

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária/Documentalista:
Mariede Pimentel e Couto Diogo - CRB-11/354 - AM

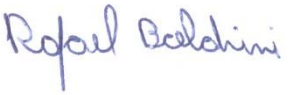
TARSILA ZANDONÁ AGUILAR

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE BIODIGESTOR PARA APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTES NAS ZONAS URBANAS E RURAL DE BOA VISTA – RR

Dissertação apresentada como pré-requisito para conclusão do Curso de Mestrado em Ciências Ambientais (Recursos Naturais) da Universidade Federal de Roraima, defendida em 01 de dezembro de 2021 e avaliada pela seguinte Banca Examinadora.

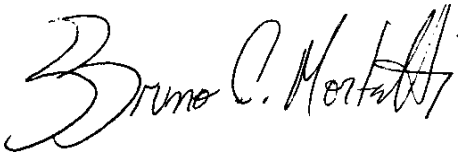
_____

Profa. Dra. Lena Simone Barata Souza
Orientadora – Universidade Federal de Roraima /UFRR



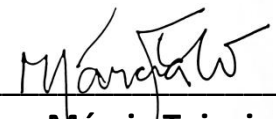
_____ _____

Prof. Dr. Rafael Boldrini
Membro – Universidade Federal de Roraima /UFRR



_____ _____

Prof. Dr. Bruno Cesar Mortatti
Membro – Universidade Federal de Roraima /UFRR



_____

Profa. Dra. Márcia Teixeira Falcão
Membro – Universidade Estadual de Roraima /UERR

Aos meus filhos e família. E a todos que, de alguma forma, me impulsionaram a chegar onde estou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a meus pais pelos ensinamentos além da escola e pelo amor e vida dedicados a mim.

A meu companheiro de vida Tenner, por estar sempre sendo meu ponto positivo, me incentivar e apoiar.

Aos meus filhos, Tenner Augusto e Teodora, por serem a razão de eu me tornar mais e melhor.

Aos professores que estiveram ao longo do meu caminho, como rochas de base do meu desenvolvimento.

A minha orientadora Dra. Lena, por estar sempre disponível e ter aceitado embarcar nessa jornada.

E, em especial ao Sr. Raimundo e Dona Conceição pela disponibilidade, ambos muitos prestativos e compreensivos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

Obrigada!

Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva para toda a humanidade.

(Marie Curie)

RESUMO

O biodigestor é visto como uma alternativa bastante relevante para a discussão sobre as questões ambientais, pois utiliza resíduos que seriam dispensados como descarte para a geração de biogás e digestato ou biofertilizante. O desenvolvimento de uma pesquisa nesse âmbito desde a confecção do equipamento (biodigestor), instalação, manutenção até a destinação final dos produtos gerados é despertar a consciência do uso racional dos recursos disponíveis, no intuito de se fomentar interesse na conservação do meio ambiente. O uso do biodigestor como projeto interdisciplinar e multidisciplinar em áreas situadas em meio urbano e rural é capaz contribuir para a formação de uma visão crítica sobre o assunto, do mesmo modo demonstrar a existência de caminhos alternativos e eficientes para a solução de inúmeros problemas relacionados ao meio ambiente e à saúde. A pesquisa em apreço demonstrou os prós e contras na construção e operação de um biodigestor não industrial, tanto um modelo urbano quanto um rural, com enfoque no processo de configuração dos equipamentos, para melhor satisfação no tratamento de resíduos orgânicos, visando o aproveitamento do biogás, podendo ser reproduzido por qualquer indivíduo de interesse. Como conclusão do estudo realizado, dos arranjos tomados para efetivação dos objetivos, de construção, implantação e avaliação, foi comprovado a viabilidade técnica com as adaptações de alguns elementos formadores. No entanto, a viabilidade energética e a produção do biofertilizante não puderam ser mesuradas em sua plenitude. Ainda assim, com todo inconveniente, é possível comprovar a implantação da técnica da biodigestão a fim de se apreender o desenvolvimento sustentável, que abrange as áreas ambiental, econômica e social.

Palavras-chave: Biodigestão. Resíduos Sólidos Orgânicos. Sustentabilidade. Digestato.

ABSTRACT

The biodigester is seen as a very relevant alternative for the discussion on environmental issues, as it uses waste that would be discarded as disposal for the generation of biogas and digestate or biofertilizer. The development of research in this field, from the manufacture of the equipment (biodigester), installation, maintenance to the final destination of the generated products, is to raise awareness of the rational use of available resources, to promote interest in environmental conservation. The use of the digester as an interdisciplinary and multidisciplinary project in areas located in urban and rural areas can contribute to the formation of a critical view on the subject, in the same way, to demonstrate the existence of alternative and efficient ways for the solution of innumerable problems related to the environment and health. The research in question demonstrated the pros and cons in the construction and operation of a non-industrial biodigester, both an urban and a rural model, focusing on the equipment configuration process, for better satisfaction in the treatment of organic waste, aiming at the use of biogas, and may be reproduced by any individual of interest. As a conclusion of the study carried out, of the arrangements made for the accomplishment of the objectives, of construction, implantation, and evaluation, the technical feasibility was proven with the adaptations of some formative elements. However, energy viability and biofertilizer production could not be fully measured. Even so, with all the inconvenience, it is possible to prove the implementation of the digestion technique to understand sustainable development, which covers the environmental, economic, and social areas.

Keywords: Biodigestion. Organic Solid Waste. Sustainability. Digestate.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1- Esquema do processo de biodigestão.....13
Figura 2 - Esquema representativo do funcionamento do modelo Lagoa Coberta. 14
Figura 3 - Foto de biodigestor modelo Lagoa Coberta.....14
Figura 4 - Esquema de biodigestor modelo Indiano.....15
Figura 5 - Foto do modelo Indiano.....15
Figura 6 - Esquema e representação do princípio de funcionamento.....16
Figura 7 - Planta de produção de biogás contando com biodigestor modelo CSTR, localizado na Alemanha. 16
Figura 8 - Esquema representativo de biodigestor modelo Chinês. 17
Figura 9 - Foto do modelo Chinês.....17
Figura 10 - Representação do funcionamento do biodigestor não industrial. 24
Figura 11 - Localização de implantação dos biodigestores.....25
Figura 12 - Corte do galão para montagem. 28
Figura 13 – Altura do tubo dentro do galão.....29
Figura 14 - Saída do digestato. 29
Figura 15 - Colagem / vedação dos tubos. 30
Figura 16 - Saída do biogás. 30
Figura 17 – Configuração final do biodigestor modelo urbano.....31
Figura 18 - Configuração da tubulação de entrada.....32
Figura 19 - Tubulação de saída do digestato. 33
Figura 20 - Vedação da tubulação de entrada e da tampa do tambor.....33
Figura 21 - Configuração da saída do biogás. 34
Figura 22 - Disposição da tubulação maleável e conexões. 34
Figura 23 - Configuração final do biodigestor modelo rural.....35
Figura 24 - Localização de implantação dos biodigestores.....43
Figura 25 - Esquema com modelos de filtros para a purificação do biogás, que consiste na remoção do gás sulfídrico e dióxido de carbono, a partir da dissolução dos gases. 46
Figura 26 - Abastecimento do modelo urbano com substrato de resíduos alimentares. 47
Figura 27 - Câmara de armazenamento cheia com a produção de gases. 47
Figura 28 - Filtro feito conforme modelo *Iron Sponge*, para remoção do gás sulfídrico, instalado em série na linha de biogás contendo lã de aço como material adsorvente.....48
Figura 29 - Lã de aço oxidada após período de 15 dias de instalação no sistema.....49
Figura 30 - Modelo de filtro usado com cal e água, para remoção do dióxido de carbono. 49
Figura 31 - Abastecimento com esterco bovino fresco diluído em proporção 1/1.....50
Figura 32 - Chama observada com ignição. 50
Figura 33 - Retirada do digestato do equipamento e configuração do digestato obtido. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes utilizados na construção do biodigestor modelo urbano e seus valores unitários aproximados, em períodos distintos. 26
Tabela 2 - Componentes utilizados na construção do biodigestor modelo rural e seus valores unitários aproximados, em períodos distintos. 27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO 9
1.1.1 Resíduos Sólidos 10
1.1.2 Resíduos Sólidos Orgânicos 11
1.1.3 Reatores 12
1.1.4 Biogás 18
1.1.5 Digestato 19
1.2 OBJETIVOS 21
1.2.1 Objetivo Geral 21
1.2.2 Objetivos Específicos 21
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO ESTUDO 21
2 CAPÍTULO I 22
3 CAPÍTULO II 40
CONCLUSÕES 55
REFERÊNCIAS 56

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e da civilização são pontos marcantes da manifestação de degradação ambiental. A crise ambiental traz consigo questionamentos quanto à racionalidade e os paradigmas teóricos que fomentam cada vez mais o crescimento econômico, e por consequência o desabono quanto à natureza (LEFF, 2001).

Trazendo luz a discussão dos direitos das gerações futuras que possam ser afetadas pelo consumismo desenfreado e a deficiência no gerenciamento dos recursos naturais disponíveis, a discussão sobre o desenvolvimento sustentável se faz necessária e fundamental, a fim de trazer para o cotidiano, noções e ações que prospectem maior qualidade de vida, tanto individual quanto em sociedade (NUNES, 2018).

O efeito estufa é um importante fator por manter o planeta Terra aquecido, isto é, permitir a vida. Porém, o homem passou a emitir grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2) com a queima abundante de combustíveis fósseis. Além da exploração de forma descontrolada dos recursos florestais, responsáveis pela absorção do CO_2 da atmosfera. Assim soluções limpas e renováveis têm sido alvo de pesquisa pelo mundo, e várias destas soluções estão gradualmente sendo implementadas, dentre estas a construção de biodigestor anaeróbio (KARLSSON et al., 2014; SIMON; CASTILHOS JÚNIOR, 2020; ALMEIDA et al., 2013; GREENPEACE, 2016). Os biodigestores apresentam eficácia na diminuição de micro-organismos e de emissões de gases poluentes, estes são diretamente lançados na atmosfera, causando os gases de efeito estufa (GEE) (BEZERRA et al., 2014).

A implantação de biodigestores com o devido cuidado e apoio para obtenção do biogás, e consequentemente do biofertilizante (digestato), pode apresentar uma solução que favoreça a todos: o produtor minimiza a problemática relacionada ao meio ambiente, com a deposição correta dos resíduos envolvidos, e obtém de maneira atrelada ao benefício ambiental, um incremento a sua produção, diminuindo custos com fertilizante, reduzindo também a utilização de defensivos agrícolas nocivos ao ser humano; reduzindo assim a poluição local, o que em escala exponencial, gera benefícios na redução de emissões de gases e impacto de repercussão global.

O conceito de responsabilidade compartilhada instituído pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, sob a Lei nº 12.305/2010, responsabiliza a sociedade como um todo, desde os cidadãos até os governantes, pela gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. A PNRS também prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, reuso, coleta, manuseio, tratamento e disposição adequada (BRASIL, 2016).

O funcionamento de um biodigestor é tido como a transformação do lixo em energia, pois a biodigestão anaeróbia, ocorre naturalmente em aterros sanitários ou em reatores sob condições controladas. Sendo assim, são considerados equipamentos que possibilitam o reaproveitamento de detritos (restos de alimentos e fezes de animais) para gerar gás e adubo (FERREIRA et al., 2011).

Em defesa de se priorizar baixos custos e menores impactos ambientais na geração de recursos energéticos, o processo de biodigestão anaeróbia se mostra totalmente viável, não apenas por produzir gás combustível, o biogás (rico em metano), mas também por fornecer ao meio ambiente adubo estabilizado, o biofertilizante, contribuindo, desta forma, para a diminuição da poluição/contaminação no meio rural e urbano, como emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera, contaminação de solos, corpos hídricos superficiais e subterrâneos (KARLSSON et al., 2014).

A utilização de biogás é uma alternativa à preservação dos recursos hídricos, quer sejam rios, lagos ou lençóis freáticos, por permitirem a diminuição da deposição indiscriminada de resíduos no meio ambiente. Inevitavelmente, reduzirá a demanda por Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), o gás de cozinha, ou mesmo a utilização de lenha ou energia elétrica para os mais diversos usos, cozimento ou aquecimento.

De forma isolada, sob o prisma energético e do aquecimento global, o efeito pode parecer pequeno, porém apresenta um enorme potencial e um percentual avantajado de propiciar benefícios tangíveis, principalmente se, grande parte das propriedades com capacidade produtiva adotarem esta tecnologia.

Apesar da maioria dos biodigestores serem utilizados no meio rural, o potencial de utilização em cidades é alto (KARLSSON et al., 2014). A proposta do presente trabalho é a construção de um protótipo de baixo custo, de dimensões reduzidas, mas funcional, que utilize, como substrato, os rejeitos de cozinhas e de animais, de fácil confecção para que possa ser confeccionado e manuseado por qualquer pessoa, bem como avaliar a técnica de implantação, visando o aproveitamento do biogás e uso do lodo extraído do biodigestor como biofertilizante.

O uso de um biodigestor como projeto multidisciplinar em uma escola, residência, comércio ou no meio rural contribui, de forma significativa, para a formação de uma consciência crítica a respeito do uso racional de resíduos, bem como mostrar que existem caminhos eficientes para a solução de vários problemas.

Com inquietações no que tange a conservação do meio ambiente no qual fazemos parte, em busca de uma destinação eficiente dos resíduos orgânicos e à questão econômica em

relação aos ajustes elevados nos valores do gás de cozinha (GLP), essa pesquisa colabora com essa visão alternativa, com o uso de biodigestor.

1.1 REFERENCIAL TEÓRICO

Partindo da premissa do alto índice de desperdício, de lixo produzido e na necessidade de preservação do meio ambiente, o biodigestor é um instrumento que pode proporcionar uma solução adequada para o reaproveitamento de resíduos orgânicos, gerando subprodutos com possibilidade de utilização em diversos outros setores (agrícola, energético) (ALMEIDA; BRUNO, 2016; BEZERRA et al., 2014; FERREIRA et al., 2011).

O Estado de Roraima conta com um conjunto de incentivos fiscais e benefícios de cunho federal, estadual e municipal que beneficiam o desenvolvimento e a competitividade dos pequenos negócios locais. Nesse contexto, se faz necessário ações de política de saneamento ambiental, articulando as políticas públicas de gestão e proteção ambiental, de recursos hídricos, de saneamento básico, de drenagem urbana e de coleta e destinação de resíduos.

Na questão energética, o estado de Roraima é carente, pois sua fonte energética é proveniente de termoelétricas que funcionam a base de combustíveis fósseis, no caso, o diesel. No Estado os trabalhos com biodigestores são inexistentes ou escassos, apesar do potencial que possui. Uma característica promissora para a produção de biogás são as temperaturas elevadas em boa parte do ano no território roraimense e, também, por possuir uma produção agropecuária em ritmo acelerado.

A considerar o fator econômico, a implantação de biodigestores, propõe uma destinação à matéria orgânica que é descartada sem agregação de valor, passando a ser utilizada para a geração do biogás, que pode ser envasado ou de ligação direta substituindo o gás de cozinha; e o digestato que pode ser um excelente adubo para as pastagens e plantações em geral, contribuindo assim para a diminuição dos efeitos estufa e aquecimento global, proporcionando alternativas para a realocação de valores em outras atividades e/ou investimentos. Além disso, com o biodigestor será aproveitada uma energia (matriz energética) que, até o momento, está sendo negligenciada, ou mesmo desperdiçada, podendo então gerar ganhos ao negócio, à propriedade e ao meio ambiente.

Portanto, esse estudo relacionado ao aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos se faz fundamental para o desenvolvimento humano, o que favorece a promoção da sustentabilidade ambiental, social e econômica.

A temática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) abrange um amplo espectro de setores, destacando-se o meio ambiente e o energético, estando ambos fortemente interligados. Tendo em vista que atualmente o cidadão brasileiro gera em torno de 1.035 kg de resíduo ao dia e que esta variável se relaciona com o Produto Interno Bruto (PIB), per capita do país, vislumbra-se a dimensão das possíveis problemáticas a serem enfrentadas em um país como o Brasil (ABRELPE, 2018).

A produção de objetos de consumo em larga escala, devido à evolução do processo industrial, foi introduzindo no mercado embalagens que antes não existiam, elevando consideravelmente o volume e a diversidade dos resíduos gerados na área urbana. Aliado a este fato, o crescimento populacional contribuiu não somente para o aumento da produção de resíduos, como também por tornar cada vez mais escassas as áreas para disposição final do lixo, que destinado a locais inadequados contribui para a poluição do solo, das águas e ar (GOES, 2016; PORTELA; RIBEIRO, 2014; SOUZA; ANDRADE, 2018; SOUZA; ANDRADE; MORAES, 2018), causando sérios impactos negativos para a saúde do homem e meio ambiente (ALMEIDA et al., 2013).

Como base para discussão sobre a sustentabilidade, um componente essencial e permanente, a Lei nº 9.795/99 aborda a educação ambiental como sendo parte de um processo pedagógico, na construção da consciência, de atitudes e de valores nos tempos atuais vislumbrando um futuro onde todos os indivíduos da sociedade sejam parte responsável e disposta a ensinar e aprender a construir uma sociedade mais sustentável (BRASIL, 1999).

Sendo uma contribuição para o meio ambiente e para o homem de forma renovável, o biodigestor surge como um recurso alternativo eficaz para se evitar problemas, como contaminação das águas dos rios, prejuízos à saúde, e também por consequência, diminuem certos custos relacionados às questões sanitárias (NUNES; RECH; PICCOLI, 2014).

1.1.1 Resíduos Sólidos

As atividades humanas produzem sobras, restos e resíduos que podem ser aproveitados em outros processos ou são rejeitos que devem ser tratados e dispostos adequadamente. A legislação brasileira que delibera sobre resíduos, a Lei nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e entende-se como resíduo sólido, aquele material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder. Dispondo,

ainda, sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

O gerenciamento de resíduos é o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Dentro dos princípios ambientais, a fim de não comprometer os recursos naturais disponíveis e cientes de que a falta de fundos financeiros dificulta soluções, é através da implantação de um biodigestor, cujo conceito é o aproveitamento de resíduos, que essa alternativa se torna necessária para o desenvolvimento social (BRASIL, 2010).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2018/2019, apesar de grande porcentagem da população urbana ser atendida pelo serviço regular de coleta domiciliar; à disposição final adotada é de 59,5% para aterros sanitários – disposição adequada; 22,9% para aterros controlados e 18% encaminham de forma ambientalmente inadequada, para lixões (ABRELPE, 2018).

1.1.2 Resíduos Sólidos Orgânicos

A PNRS não define o que são resíduos orgânicos, mas reconhece a importância da fração orgânica, bem como dos resíduos mais reconhecidos no mercado por meio de tecnologias como compostagem e aproveitamento energético (ZAGO; BARROS, 2019).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente - MMA (2019) a definição de resíduos orgânicos é composta normalmente por materiais putrescíveis. São constituídos basicamente de restos de animais ou vegetais e são provenientes de diversas fontes, doméstica ou urbana (restos alimentares, podas e varrição de ruas e praças), agrícola ou industrial (resíduos da indústria alimentícia, frigoríficos, dentre outros), de saneamento básico (lodos de estação e tratamento de esgoto), entre outras.

Os materiais citados acima quando em ambientes equilibrados, se degradam naturalmente reciclando os nutrientes. Porém, pelo grande volume gerado e pelos locais inadequados em que são armazenados ou dispostos, decorrentes de atividades humanas, podem se constituir em um sério problema ambiental, pois a disposição inadequada de resíduos orgânicos gera chorume (líquido escuro, odor desagradável e altamente tóxico),

emissão de metano na atmosfera e favorece a proliferação de vetores de doenças. Sendo necessária a adoção de medidas adequadas de gestão e tratamento destes resíduos, para que a matéria orgânica presente seja estabilizada e possa cumprir seu papel natural de fertilizar os solos (BRASIL, 2019).

Com o crescimento da geração de resíduo e o esgotamento dos aterros sanitários próximos aos centros urbanos, sobretudo os mais populosos, o resíduo orgânico nacional terá que ser tratado por meio de técnicas de compostagem ou digestão anaeróbica. Contribuindo para um objetivo duplo de geração de energia e de redução da quantidade de resíduo enviado a aterro (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019).

1.1.3 Reatores

As experiências com o uso de biodigestores anaeróbios mostram que essa tecnologia não é recente. A técnica de biodigestão é uma das alternativas tecnológicas mais promissoras. Esse fenômeno está relacionado com o crescente aumento econômico dos chamados países emergentes. Crescentes são as pesquisas com cunho em energias alternativas que sejam economicamente e ecologicamente viáveis (DEGANUTTI et al., 2002).

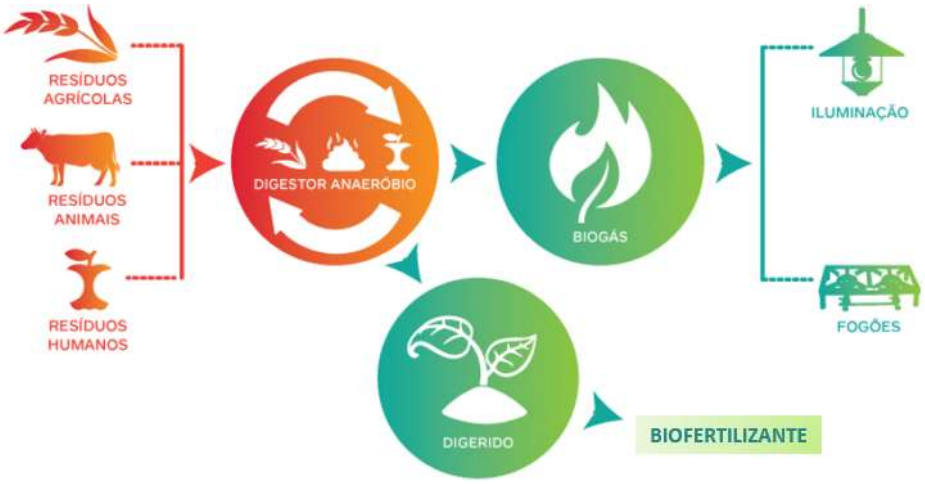
No contexto histórico sabe-se que em 1806, na Inglaterra, o químico Humphry Davy identificou um gás rico em metano e dióxido de carbono, resultado da decomposição de dejetos animais. Já em 1857, em Bombaim (Índia) foi construída a primeira instalação operacional destinada a produzir biogás. Assim surgiu o primeiro biodigestor chamado de modelo indiano (PALHARES, 2008).

No Brasil, o uso de biogás como fonte de combustível tampouco é novo. As primeiras experiências comerciais datam da década de setenta como resposta às necessidades de diversificação da matriz energética nacional após os choques de petróleo de 1973 e 1979 (TAVARES; SANTOS; CARVALHO, 2019). A figura 1 mostra um esquema simplificado do processo e os principais componentes de um biodigestor. Por se tratar de um processo bioquímico complexo, os produtos resultantes dependem da decomposição de substrato utilizado e da tecnologia empregada.

Nas análises dos fatos históricos e dos cenários futuros, tanto para o uso de energias renováveis como para o desenvolvimento com conservação ambiental, se pode visualizar alguns desafios: aceitar que o processo de tratamento por biodigestão anaeróbia para os

dejetos é eficiente; que pesquisas podem ser realizadas para aumentar esta eficiência; que o maior desafio para seu uso não é tecnológico, mas cultural (PALHARES, 2008).

Figura 1- Esquema do processo de biodigestão



Fonte: Adaptado de FlexQuest (2019)

1.1.3.1 MODELOS

O biodigestor é um reator para realização do processo de digestão anaeróbia, que se constitui de um recipiente fechado onde é colocado o material orgânico, em solução aquosa, onde sofre decomposição por micro-organismos, gerando o biogás que irá se acumular na parte superior do recipiente adotado ou em uma câmara acoplada ao sistema; e o digestato, outro subproduto gerado, que é recolhido conforme produzido. É chamada de digestão anaeróbica essa decomposição que o material sofre no interior do biodigestor, sem a interferência do oxigênio (PROSAB, 2003; BRASIL; UNIDO, 2020)

A literatura apresenta como principais modelos de biodigestor os modelos chinês, indiano e canadense, sendo que o modelo de biodigestor canadense é diferenciado dos demais por ser horizontal e por apresentar uma caixa de carga revestida com manta plástica (CALZA et al., 2015). Podendo ser encontrados em diversos modelos, cada qual apresenta suas vantagens e desvantagens e características próprias de operação. Entretanto, existem dois tipos básicos de biodigestores classificados de acordo com a frequência de operação: contínuos e batelada (FRIGO et al., 2015).

Nos biodigestores em fluxo contínuo ou semi-contínuo a matéria orgânica é inserida aos poucos, sendo o processo de digestão anaeróbia ininterrupta produzindo biogás continuamente. A matéria decomposta é retirada a mesma medida que entra de matéria

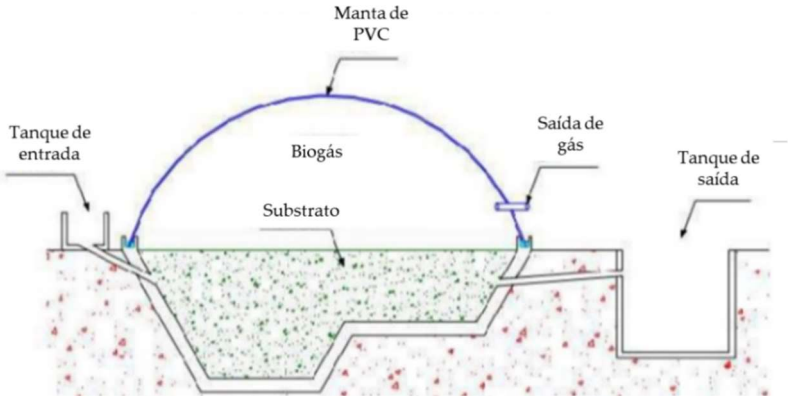
orgânica sai de matéria decomposta pronta para descarte ou uso para irrigação, sendo esse modelo de biodigestor bastante eficaz (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009).

Nos biodigestores em batelada a matéria orgânica é inserida toda de uma só vez e, então, ele é fechado hermeticamente até que ocorra o processo de digestão anaeróbia e a produção de biogás. O biodigestor será aberto novamente só quando a produção de biogás baixar, indicando que a matéria orgânica já foi decomposta e que pode ser feita a retirada da matéria restante, por causa desta interrupção no processo e a alimentação do biodigestor ser descontínua a produção de biogás não é constante (PROSAB, 2003).

Existem diversos modelos de digestores, de baixa e alta taxa de degradação, sendo cada um adaptado a uma realidade e uma necessidade de biogás e/ou digestato.

a. Lagoa coberta ou modelo canadense (figuras 2 e 3): esse modelo se baseia em uma espécie de lagoa que pode ser construída em alvenaria ou revestida de uma manta impermeável (PVC) apresentando uma única entrada e saída de substrato (BRASIL; UNIDO, 2020).

Figura 2 - Esquema representativo do funcionamento do modelo Lagoa Coberta.



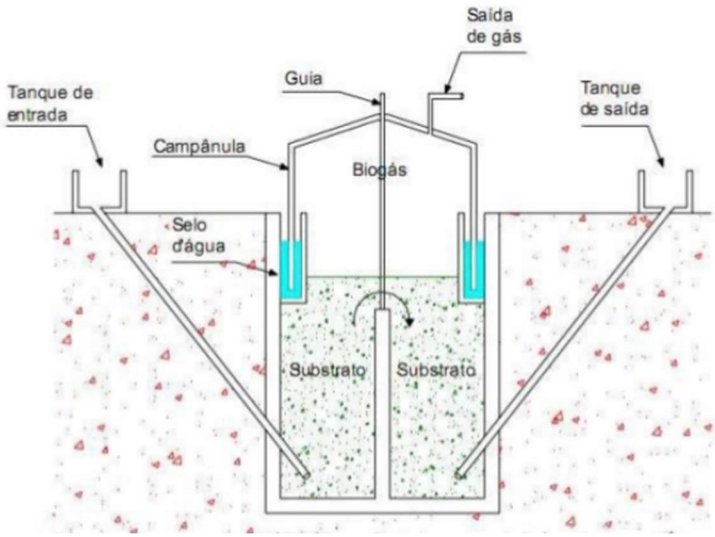
Fonte: pt.slideshare.net/JuNNioRe/gerao-de-energia-eltrica-28903279

Figura 3 - Foto de biodigestor modelo Lagoa Coberta.

Fonte: milkpoint.com.br

b. Indiano: tem como principal característica uma campânula, de metal ou fibra, que funciona como gasômetro, sendo mergulhada sobre um selo d'água ou sobre o próprio substrato. Esse modelo apresenta uma parede interna que eleva o percurso do substrato no seu interior (BRASIL; UNIDO, 2020) (Figuras 4 e 5).

Figura 4 - Esquema de biodigestor modelo Indiano.



Fonte: pt.slideshare.net/JuNNioRe/gerao-de-energia-eltrica-28903279

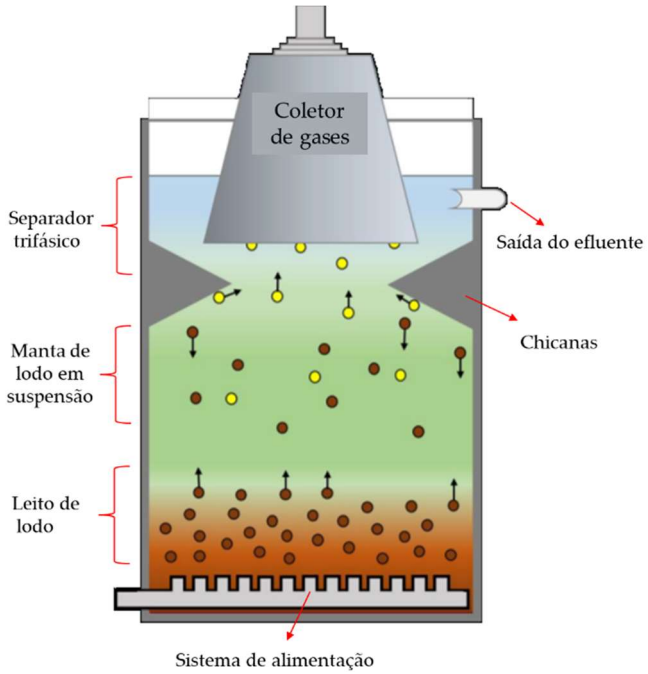
Figura 5 - Foto do modelo Indiano.

Fonte: cpt.com.br - cursos

c. *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB): conhecido como Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente de Alta Eficiência, tem como alimentação pela parte inferior, com o substrato movendo-se em fluxo ascendente e passando por uma manta de lodo contendo um leito e grânulos sobrepostos, conforme apresentado na figura 6. Essa junção da manta de lodo com a presença do biogás gerado nessa fração intermediária

do digestor facilita a mistura, levando a uma rápida e eficiente degradação da matéria orgânica (TAUSEEF; ABBASI; ABBASI. 2012).

Figura 6 - Esquema e representação do princípio de funcionamento de um reator UASB.



Fonte: BRASIL; UNIDO, 2020

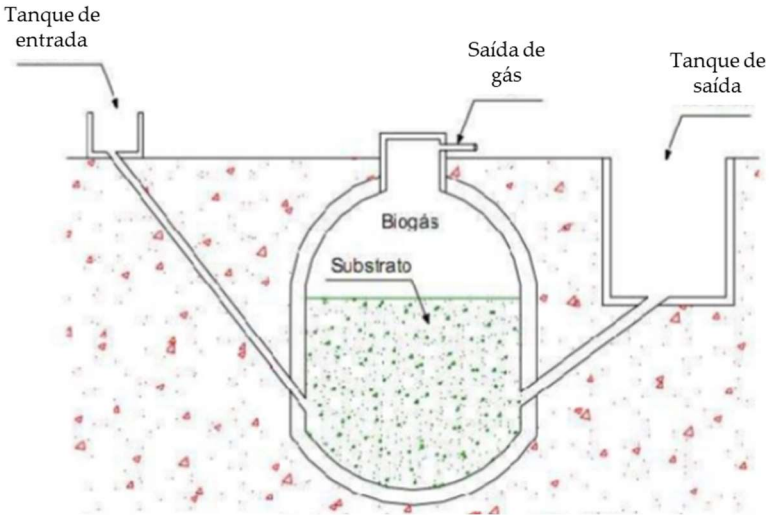
d. Reator de Mistura Completa - CSTR: tem como diferencial suportar elevadas cargas orgânicas e apresentam tempo de retenção hidráulica (TRH) médio de 15 a 20 dias, de acordo com o resíduo tratado e o arranjo adotado (BRASIL; UNIDO, 2020), modelo apresentado na figura 7.

Figura 7 - Planta de produção de biogás contando com biodigestor modelo CSTR, localizado na Alemanha.

Fonte: Portal do Biogás (2020)

e. Chinês: é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria (tijolo) para a fermentação, com teto abobado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que quanto ocorre aumento de pressão, resulta no deslocamento do efluente para a caixa de saída (BRASIL; UNIDO, 2020), esquema de funcionamento e modelo nas figuras 8 e 9.

Figura 8 - Esquema representativo de biodigestor modelo Chinês.



Fonte: pt.slideshare.net/JuNNioRe/gerao-de-energia-eltrica-28903279

Figura 9 - Foto do modelo Chinês.

Fonte: slideshare.net/EvangelaGielow/biodigestor-na-suinocultura

Não existe uma estimativa concreta sobre a vida útil de biodigestores, porém requerem manutenção constante na construção e nos gasômetros, sendo isso atrelado ao controle do substrato contido na fermentação, se os dejetos forem de animais ou resíduos orgânicos.

1.1.3.2 FUNCIONAMENTO

O biodigestor anaeróbio trata-se de um compartimento hermético, sem interferência de oxigênio, onde são acumulados resíduos vegetais e excrementos de animais que, por meio de um processo natural de bactérias presentes nesses dejetos, são decompostos e transformados em biogás e em fertilizante, contribuindo para a economia familiar ao baixar os custos de produção e melhorando o meio ambiente (NHANCA; MORAES, 2019).

Para a garantia perfeita de funcionamento de um biodigestor devesse evitar desperdícios e garantir a geração de biogás e fertilizantes, sendo preciso entender o seu princípio de funcionamento, isto é, a aceleração da decomposição de matéria orgânica sem a interferência do oxigênio (NUNES; RECH; PICCOLI, 2014). Por apresentar simplicidade na sua construção, é possível observar diferentes modelos de biodigestores em todo o mundo. Consequentemente, a eficiência do funcionamento varia bastante (ALMEIDA; BRUNO, 2016).

1.1.4 Biogás

O biogás é composto majoritariamente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), e outros gases presentes em baixas concentrações, como gás sulfídrico (H_2S), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). A presença do metano garante ao biogás a capacidade de ser uma fonte de energia, permitindo seu uso para a geração de energia elétrica, produção de calor e na produção de biometano e de CO_2. O biometano pode ser considerado um gás similar ao gás natural, desde que sua composição atenda à Resolução da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (STILPEN; STILPEN; MARIANI, 2018).

Para ter produção de biogás de forma eficiente, com alto teor de metano, é conveniente ter ciência de alguns parâmetros: tempo de conservação da biomassa no sistema de fermentação, pH, diluição com água, nutrientes presentes no esterco e nutrientes tóxicos

(SALOMOM; FILHO, 2007). Segundo Salomom e Filho (2007) a digestão anaeróbica para produção de biogás possui vantagens e desvantagens.

a. Vantagens: um processo natural para tratamento de rejeitos orgânicos; requer menos espaço que aterros sanitários; diminui o volume de resíduo a ser descartado; reduz significativamente a quantidade emitida de dióxido de carbono (CO_2) e de metano (CH_4), gases causadores do efeito estufa; apesar do custo inicial, numa perspectiva em longo prazo o processo resulta numa economia considerável, pois uma vez que reduz gastos com eletricidade, transporte e utilização de botijão de gás, esgoto sanitário, descarte dos demais resíduos, etc;
b. Desvantagens: a depender do rejeito há formação de gás sulfídrico, gás tóxico com cheiro desagradável; a quantidade de biogás variável, o que implica numa possível etapa de tratamento do gás obtido, dependendo do uso dado ao mesmo; custo de manutenção devido à escolha adequada utilizada na construção do biodigestor.

Karlsson et al. (2014) demonstram aplicações do biogás e que utilizá-lo para produção de calor é a maneira mais fácil e barata de aproveitá-lo. É possível utilizar o biogás como fonte de energia para cocção e fins domésticos. De acordo com o exposto por Bley (2015), se a produção de biogás pode incentivar o crescimento regional, consequentemente a geração de empregos, pois acarretará em demanda de serviços de engenharia, instalação e manutenção e insumos.

Destacando a questão dos impactos sociais da produção e uso do biogás, Divya, Gopinath e Christy (2015) citam a melhoria da qualidade de vida das pessoas no entorno dos sistemas pela redução dos odores e moscas no sistema de tratamento dos efluentes.

1.1.5 Digestato

Depois de passarem no digestor, os resíduos sólidos orgânicos apresentam alta qualidade para uso como fertilizante, que é chamado de digestato, produto natural rico em nitrogênio e fósforo. A tecnologia de biodigestores apresenta muitas vantagens aos produtores rurais, devido a possibilidade da utilização da sobra dos dejetos como fertilizante para agricultura (normalmente, após uma etapa adicional de tratamento e tomando-se alguns cuidados), que possui teores consideráveis de nitrogênio e fósforo e , com baixa uma probabilidade de disseminação de doenças (BARICHELLO et al., 2015).

O digestato pode apresentar características peculiares que o torna interessante para uso agrícola. Salomom e Filho (2007) citam algumas vantagens desse uso:

I. Não há nenhum custo adicional, se comparado aos fertilizantes inorgânicos;
II. Não propaga mau cheiro;
III. É rico em nitrogênio, substância muitas vezes escassa;
IV. A biomassa que fica dentro do biodigestor, sem contato com o ar, mata todas as bactérias aeróbias e germes existentes;
V. Recupera terras agrícolas empobrecidas em nutrientes pelo excesso ou uso contínuo de fertilizantes inorgânicos, ou seja, produtos químicos;
VI. É um agente de combate a erosão, porque mantém o equilíbrio ecológico retendo maior quantidade de água pluvial;
VII. O resíduo da matéria orgânica apresenta uma capacidade de retenção de umidade pelo solo, permitindo que a planta se desenvolva durante o período de seca.

Destacando uma única desvantagem, que é a não eliminação da acidez do solo, causada pelo uso de fertilizantes inorgânicos que influenciam a germinação e crescimento da planta.

1.2 OBJETIVOS

Na indagação por um método eficiente, visando obter máxima conversão de material orgânico em biogás e biofertilizante, essa pesquisa vem avaliar e propor o funcionamento de um biodigestor para determinação de uma solução sustentável com baixo custo e capacidade de reprodutibilidade do projeto e apropriação do mesmo pelos beneficiados.

1.2.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa tem como principal objetivo apresentar a construção de um biodigestor não industrial de baixo custo e em tamanho reduzido, com o intuito de reutilizar a matéria orgânica que é descartada.

1.2.2 Objetivos Específicos

I. Propor a construção do protótipo de um biodigestor caseiro;
II. Avaliar o desempenho do biodigestor tratando resíduo sólido orgânico através de alimentação contínua;
III. Propor a melhor configuração através do levantamento dos principais parâmetros de projeto da planta, bem como sua efetividade.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo foi estruturado em dois capítulos para responder o objetivo geral proposto e com maior enfoque nos objetivos específicos propostos, de acordo com o processo de evolução e encaminhamento conforme o tipo de equipamento analisado. Sendo assim, o primeiro capítulo intitula-se “Confecção de biodigestores de forma não industrial e acessível” e responde aos objetivos específicos um e três para a confecção de um biodigestor caseiro, bem como a possibilidade de utilização de materiais acessíveis, e alternativas para uma melhor configuração dos equipamentos. Já o segundo capítulo, intitulado “Processo de funcionamento de um biodigestor” responde aos objetivos específicos dois e, também, o três, com enfoque no processo de biodigestão.

2 CAPÍTULO I

Confecção de biodigestores de forma não industrial e acessível em áreas urbana e rural de Boa Vista, RR

Introdução

Na atualidade, inúmeros impactos ambientais, advindos de diversas fontes, causam efeitos negativos na qualidade de vida do ser humano. Com o objetivo de reduzir impactos ambientais, a procura por tecnologias que amenizem a poluição ambiental tem sido bastante almejada por diferentes atores. Famílias e agricultores buscam dar um destino alternativo aos rejeitos, não sendo apenas o descarte, mas sim como uma forma de obter um retorno com esse material. Empresas começam a rever suas estratégias e suas responsabilidades junto à sociedade. Todos vislumbrando ajudar na minimização da degradação do meio ambiente.

A restrição de espaço e a necessidade de atender cada vez mais as necessidades de produção de energia de fontes limpas, de água e alimento, têm colocado alguns paradigmas a serem vencidos, nos quais, visam à superação dos desafios energéticos e ambientais da comunidade mundial (LEFF, 2006).

Independente da atividade, seja agrícola, pecuária, educacional ou comercial, vêm ocasionando diversos problemas ambientais relacionados aos resíduos gerados durante os processos e/ou sua destinação (LOPES et al., 2020)

A biodigestão apresenta um grande potencial, ainda mais quando se emprega resíduos orgânicos oriundos das próprias cadeias produtivas, proporcionando, além da possiblidade de geração de energia, a destinação e tratamento adequados aos resíduos. A integração dos sistemas proporciona ganhos em três principais aspectos: ambientais, pelo tratamento de resíduos de elevado potencial poluidor; econômicos, pela geração de energia e de biofertilizante; e sociais, pelo incentivo associado à imagem de consciência e responsabilidade que é transmitida pela empresa aos seus clientes e consumidores (BRASIL; UNIDO, 2020).

Com uma infinidade de substratos disponíveis no Brasil, eles podem ser classificados em diferentes categorias: agropecuários (efluentes da suinocultura, bovinocultura, avicultura, entre outros), agroindustriais (processamento de mandioca, laticínios, abatedouros entre outros), industriais (indústria de papel e celulose, alimentos e bebidas, entre outros) e resíduos urbanos (resíduos sólidos urbanos e esgoto sanitário). Cada tipo de resíduos e segmento

possuem características específicas as quais exigem atenção nas etapas de manejo, preparo, tratamento e aplicação (BRASIL; UNIDO, 2020).

No Brasil a maioria dos biodigestores está situada no meio rural, mas o potencial de utilização em centros urbanos é alto. E, apesar da crescente difusão nos últimos tempos e dos avanços obtidos no conhecimento sobre a biodigestão, da tecnologia de construção e de operação, da redução dos custos de investimento e de manutenção, ainda há problemas na utilização da tecnologia (CHAVES et al., 2021).

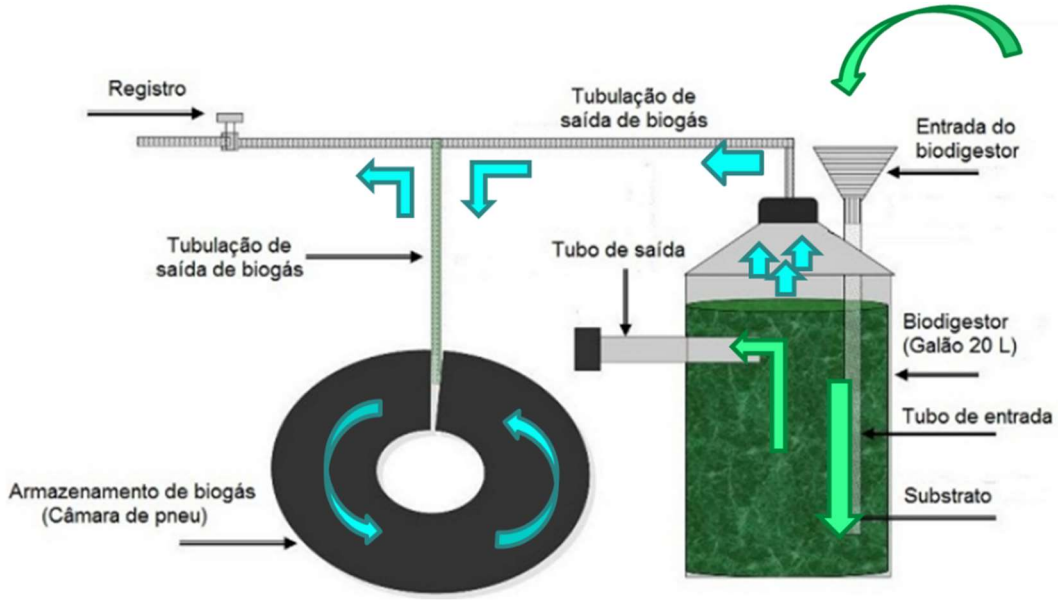
Chaves et al. (2021) comentam que para a produção do gás, é necessário averiguar a matéria orgânica a ser utilizada e suas quantidades e, o recipiente destinado a ser o biodigestor, sendo fechado, revestido por um material impermeável para um ambiente anaeróbico, com entrada para a colocação do material orgânico e, saída dos subprodutos após a biodigestão.

Biodigestores

Neste trabalho, como o propósito é apresentar um biodigestor caseiro a comunidade de região urbana e rural do município de Boa Vista/RR, partindo desde a construção (montagem do equipamento com materiais acessíveis) e manuseio (alimentação e coleta dos subprodutos durante o processo) do mesmo, o modelo do biodigestor chinês é o que apresenta melhores características de reprodutibilidade e, assim como o modelo indiano, são indicados no tratamento de efluentes domésticos e de pequenas propriedades rurais (BRASIL; UNIDO, 2020).

O modelo chinês, apesar de ser confeccionado com uma tecnologia robusta, sendo sua construção toda em alvenaria, o modelo proposto nesse estudo será confeccionado com materiais diferentes, no entanto o funcionamento será semelhante, demonstrado na figura 10. Sendo essa uma escolha de destinação de resíduos orgânicos, gerando o biogás, que poderá ser utilizado nas cozinhas em substituição ao GLP, e o digestato, a ser utilizado na fertilização em hortas e plantações.

Figura 10 - Representação do funcionamento do biodigestor não industrial.



Fonte: Adaptado de BGS (2014)

Material e métodos

O projeto de construção do biodigestor desenvolvido foi pensando em sua aplicação como conteúdo de caráter multidisciplinar, para que o tema da geração de energia limpa e renovável pudesse ser tratado de forma ampla em regiões situadas em diferentes localidades, no meio urbano, de forma coletiva ou particular, e em meio rural, com o aproveitamento de todo material descartado na cozinha e dejetos animais, advindos da pecuária.

Uma preocupação que circundou o desenvolvimento e encaminhamento do estudo foi a utilização de materiais que pudessem ser encontrados com facilidade em qualquer comunidade, ou até mesmo a possibilidade de optar por materiais usados, com boa qualidade que pudessem ser reutilizados. Os custos de aplicação foram relativamente baixos e a montagem simples, porém com alguns contratempos. Mas, mesmo assim, qualquer pessoa pode ter condições e capacidade para suportar a operação de um biodigestor nos moldes dessa proposta de estudo.

Área de implantação

Roraima pode ser considerado o estado brasileiro com poucos impactos ambientais causados pela ação humana. Por outro lado, a capital Boa Vista, com a maior taxa de urbanização e de concentração urbana do Estado, apresenta inúmeros problemas, sobretudo

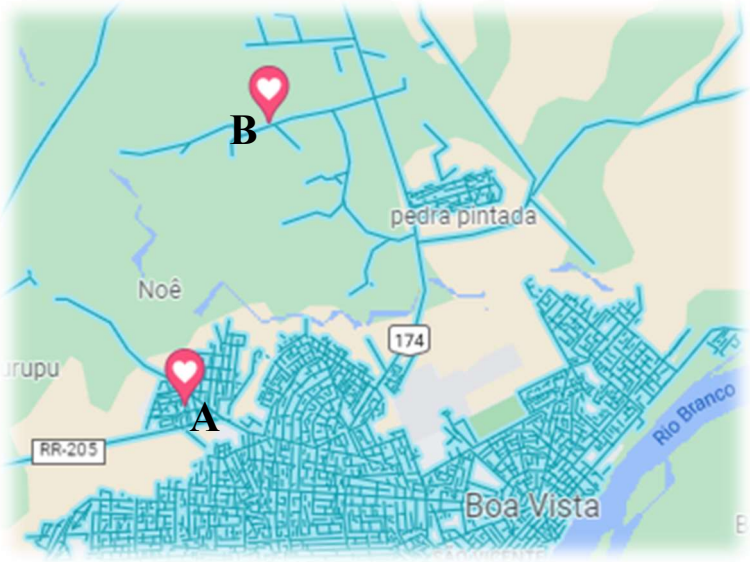
pela ausência de um sistema de tratamento e disposição final de resíduos sólidos e de esgotamento sanitário.

O município de Boa Vista não cumpre a Lei 12.305/2010, no que diz respeito à extinção dos lixões, visto que o destino final dos resíduos do município atualmente é o chamado Aterro Sanitário Municipal de Boa Vista, o qual recebe os resíduos da construção civil gerados por obras e empreendimentos privados, resíduos de galhos e podas, sendo diariamente cerca de 300 toneladas de resíduos depositados a céu aberto, sem qualquer tratamento, ou seja, considerado um lixão (FARIAS, 2020).

Diante da situação atual da destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em Boa Vista - RR, foram considerados dois cenários para área de implantação da pesquisa, visando os mesmos objetivos quanto ao aproveitamento de rejeitos por meio da biodigestão.

Os cenários propostos nesse estudo retratam locais na cidade de Boa Vista, figura 11, um no meio urbano, em uma residência (ponto “A”) e outro na área rural (ponto “B”), um sítio localizado seguindo pela BR 174, bairro Monte Cristo, propriedade de pequeno produtor de leite, criador de bovinos e suínos, que fornece produtos a estabelecimentos na capital.

Figura 11 - Localização de implantação dos biodigestores.



Fonte: Google Maps (2022)

Para a instalação do equipamento rural, foi firmado um acordo de colaboração entre o pesquisador e um responsável da área de estudo, pois o abastecimento do biodigestor seria feito diariamente, então essa colaboração se fez necessária para a efetivação do sistema.

Materiais

No intuito de se confeccionar um biodigestor funcional para o desenvolvimento dos experimentos visando atingir o objetivo geral do estudo, previamente, foi construído dois biodigestores denominados modelo urbano, o 1º (primeiro) e 2º (segundo), gerando um aprimoramento nos planos de confecção. E, de maneira a utilizar um biodigestor em meio rural, onde se obtinha maior disponibilidade de substrato, foi confeccionado um outro modelo, denominado modelo rural.

Os recipientes utilizados para servirem de biodigestores foram distintos, devido a quantidade disponível de substrato, como mencionado. O aparelho urbano foi um galão plástico usado de água de 20 litros; o aparelho rural foi um tambor (bombona) de 100 litros. Em ambos equipamentos foram acopladas saídas para recolher o gás produzido e também para drenagem do digestato. A imagens dos equipamentos são demonstradas a seguir.

A Tabela 1 apresenta os componentes utilizados, suas medidas, quantidades e valores unitários para a confecção de uma unidade do equipamento de biodigestão modelo urbano. Os valores apresentados nas tabelas foram os colhidos no mercado local de Boa Vista em períodos distintos, a fim de comparação da evolução e variação econômica de tais itens utilizados.

Tabela 1 - Componentes utilizados na construção do biodigestor modelo urbano e seus valores unitários aproximados, em períodos distintos.

ITEM	COMPONENTES	MEDIDA	QUANTIDADE	VALORES EM JAN/ 2020	VALORES EM OUT/2021
1	Abraçadeiras de ferro	un	6	R$ 4,49	R$ 5,60
2	Adesivo plástico para PVC	tubo	1	R$ 4,00	R$ 12,00
3	Areia fina	kg	500g	R$ 2,00	R$ 3,00
4	Balde de plástico	un	1	R$ 10,00	R$ 15,50
5	Câmara de pneu vazia	un	1	R$ 28,00	R$ 35,00
6	Cola tipo Super bonder	tubo	1	R$ 7,59	R$ 8,90
7	Equipamento de solda (ferro)	un	1	R$ 35,00	R$ 39,80
8	Funil grande de plástico	un	1	R$ 4,50	R$ 4,50
9	Galão de água vazio	20 litros	1	R$ 30,00	R$ 45,00
10	Joelho PVC	1¼'' (32 mm)	1	R$ 1,75	R$ 3,50
11	Lâmina de serra de metal, para PVC	un	1	R$ 3,00	R$ 7,50
12	Registro PVC	1¼'' (32 mm)	1	R$ 20,00	R$ 17,00
13	Tampa para PVC - CAP	2'' (50 mm)	1	R$ 5,00	R$ 9,50
14	Tê para tubulação maleável (jardinagem)	¼'' (6 mm)	1	R$ 4,00	R$ 4,00
15	Tinta spray cor preta	tubo	1	R$ 13,39	R$ 17,00
16	Tubo PVC	2'' (50 mm)	1 metro	R$ 10,00	R$ 57,00
17	Tubo PVC	1¼'' (32 mm)	50 cm	R$ 8,00	R$ 52,50
18	Tubulação de plástico maleável (mangueira)	¼'' (6 mm)	4 metros	R$ 4,00	R$ 5,50
19	Válvula com registro tubulação maleável	¼'' (6 mm)	2	R$ 15,00	R$ 18,50
	TOTAL			**R$ 209,72**	**R$ 361,30**

Fonte: Autora (2021)

A Tabela 2 apresenta os componentes utilizados, suas medidas e as quantidades para a confecção de uma unidade do equipamento de biodigestão modelo rural. Os valores apresentados, também, são os coletados em períodos distintos.

Tabela 2 - Componentes utilizados na construção do biodigestor modelo rural e seus valores unitários aproximados, em períodos distintos.

ITEM	COMPONENTES	MEDIDA	QUANTIDADE	VALORES EM JAN/ 2020	VALORES EM OUT/2021
1	Abraçadeiras de ferro	un	4	R$ 4,49	R$ 5,60
2	Abraçadeiras de plástico	un	10	R$ 6,50	R$ 10,90
3	Adesivo plástico para PVC (cola cano)	tubo	1	R$ 8,00	R$ 12,00
4	Adesivo veda calha cinza	tubo	1	R$ 16,00	R$ 18,00
5	Balde de plástico	un	1	R$ 10,00	R$ 15,50
6	Câmara de pneu vazia	un	1	R$ 28,00	R$ 35,00
7	Equipamento de solda (ferro)	un	1	R$ 35,00	R$ 39,80
8	Flange	2" (50mm)	1	R$ 36,00	R$ 38,00
9	Joelho PVC	2'' (50 mm)	1	R$ 3,30	R$ 5,90
10	Lâmina de serra de metal, para PVC	un	1	R$ 3,00	R$ 7,50
11	Luva de PVC com rosca externa	2" (50mm)	1	R$ 4,60	R$ 5,90
12	Tampa para PVC - CAP	4'' (100 mm)	1	R$ 5,00	R$ 11,00
13	Registro PVC	2'' (50 mm)	1	R$ 28,00	R$ 29,00
14	Tambor (bombona)	100 litros	1	R$ 189,00	R$ 249,00
15	Tê para tubulação maleável (jardinagem)	¼'' (6 mm)	1	R$ 4,00	R$ 4,00
16	Torneira simples	un	1	R$ 1,50	R$ 2,50
17	Tubo PVC	4'' (100 mm)	1,5 m	R$ 75,90	R$ 79,95
18	Tubo PVC	2'' (50 mm)	0,5m	R$ 10,00	R$ 57,00
19	Tubulação de plástico maleável (mangueira)	¼'' (6 mm)	4 m	R$ 4,00	R$ 5,50
20	Válvula com registro tubulação maleável	¼'' (6 mm)	2	R$ 15,00	R$ 18,50
	TOTAL			**R$ 487,29**	**R$ 650,55**

Fonte: Autora (2021)

A necessidade de aumentar a versatilidade e utilização desta fonte de combustível, viabilizar o aproveitamento eficiente deste potencial produtivo e de diminuir custos de geração nos leva a buscar o emprego ferramentas acessíveis de tal sistema de aproveitamento do biogás.

Métodos e técnicas

A opção pelo modelo caseiro de biodigestor, com funcionamento similar ao modelo Chinês, se faz viável por se tratar de uma tecnologia com menor complexidade de sistema, baixo custo de implantação, além de facilidade na operação do mesmo. O abastecimento neste tipo de modelo é de maneira semi-contínuo, sendo que o substrato utilizado deve conter uma concentração de sólidos totais (ST) de até 8%, de modo que sua circulação pelo interior do

equipamento seja facilitada e para evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI et al., 2002).

Confecção dos biodigestores

A. Modelo Urbano

A confecção do equipamento urbano foi seguindo orientações disponíveis pela empresa BGS Equipamentos para Biogás, em sua *homepage,* para montagem de um biodigestor mini, com adaptações que se consideram necessárias.

1) Verificação da validade e estado de conservação de todos os materiais, principalmente do galão e tubulações. Em seguida foi feito um corte no tubo de PVC para que este ficasse com, no mínimo, a altura do galão (BGS, 2019). Foi utilizado tubos e conexões de 2'' (50 mm) de diâmetro, para maior robustez do equipamento;

2) Para a entrada de matéria orgânica foi feita uma abertura na parte de cima do galão com diâmetro igual ao do tubo de PVC de 2'' (50 mm), sendo recomendado o uso de máquina de solda para fazer esta abertura, como na figura 12. Encaixa-se o tubo de PVC de 2'' (50 mm) na abertura, deixando um espaço de 5 cm acima do fundo do galão (Figura 13) (BGS, 2019);

Figura 12 - Corte do galão para montagem.

Fonte: Autora (2020)

Figura 13 – Altura do tubo dentro do galão.

Fonte: Autora (2020)

3) Para a saída da matéria orgânica digerida, o digestato, foi feita outra abertura, conforme a entrada, na lateral do galão, no lado oposto ao tubo de entrada, a aproximadamente 10 cm abaixo da parte de cima do galão. Encaixando o tubo de PVC de 1¼’’(32 mm) e conectando um registro na extremidade do tubo que está para fora do galão (Figura 14) (BGS, 2019);

Figura 14 - Saída do digestato.

Fonte: Autora (2020)

4) Para fixar os tubos e evitar a entrada de ar no biodigestor (Figura 15), foram testadas várias opções, como areia e cola (BGS, 2019), borracha e veda calha;

Figura 15 - Colagem / vedação dos tubos.

Fonte: Pakinstan Science Club (2019)

5) Para a saída de biogás foi encaixado cerca de 10 cm de tubo com um *cap* (tampa) de 50 mm no gargalo do galão. No *cap* foi feito um furo para encaixar um registro com a tubulação maleável com diâmetro de ¼'' (6 mm), fixando e vedando (Figura 16);

Figura 16 - Saída do biogás.

Fonte: Autora (2020)

6) A ponta da tubulação maleável de ¼'' (6 mm) é conectada a um registro para controle de saída. Na sequência a tubulação maleável de ¼'' (6 mm) se conecta a uma das pontas do tê de ¼'' (6 mm). Na parte central do tê se conecta um pedaço da tubulação de ¼'' (6 mm) e em seguida conecte a câmara de pneu. Na outra ponta do tê se

conecta o restante da tubulação de ¼'' (6 mm) e na extremidade final da tubulação conecte a válvula com registro de ¼'' (6 mm);

7) Finalizando a montagem do biodigestor é feito a verificação da vedação. Para aumentar a temperatura dentro do biodigestor e evitar que a incidência de luz solar estimule a criação de algas, prejudicando a produção de biogás, é feita pintura de toda a parte externa do galão com tinta de cor preta (Figura 17).

Figura 17 – Configuração final do biodigestor modelo urbano.

Fonte: Autora (2020)

B. Modelo Rural

A confecção do equipamento rural foi seguindo o mesmo conceito do modelo anterior, no entanto, com modificações nos tamanhos de alguns materiais.

1) Verificação no estado de conservação de todos os materiais, bombona e tubulações. Para a entrada de matéria orgânica foi feita uma abertura na parte de cima da tampa para passagem do tubo de PVC de 4" (100 mm), deixando o tubo com comprimento

de uma vez e meia maior que a altura da bombona, para que este ficasse com altura satisfatória para abastecimento;

2) Para uma maior fixação e evitar rompimentos da vedação por qualquer movimentação, foi feito um corte na base do tubo de 4” (100 mm) que ficaria dentro do equipamento que ao mesmo tempo encostaria no fundo ajudando a fixação e permitindo, ainda, a entrada do substrato, conforme demonstrado na figura 18;

Figura 18 - Configuração da tubulação de entrada.

Fonte: Autora (2021)

3) Para a saída da matéria orgânica digerida, foi feita outra abertura na lateral da bombona, no lado oposto ao tubo de entrada, a aproximadamente 10 cm abaixo da parte de cima. Encaixando um flange, conectando a luva com rosca externa, um segmento de tubo e por fim conectando o registro na extremidade do tubo (Figura 19);

Figura 19 - Tubulação de saída do digestato.

Fonte: Autora (2021)

4) Depois das tentativas anteriormente feitas, foi utilizado o material de veda calha para fixar os tubos e evitar a entrada de ar. E, ainda, na tampa foi utilizado o auxílio de abraçadeiras de plástico (Figura 20);

Figura 20 - Vedação da tubulação de entrada e da tampa do tambor.

Fonte: Autora (2021)

5) Para a saída de biogás foi utilizado uma torneira simples, colocada na tampa e vedada da mesma forma que os tubos de PVC. Ela servirá como um registro para a saída do biogás (Figura 21);

Figura 21 - Configuração da saída do biogás.

Fonte: Autora (2021)

6) A ponta da tubulação maleável de ¼'' (6 mm) é conectada diretamente na torneira. Na outra saída da mangueira se conecta a uma das pontas do tê de ¼'' (6 mm). Na parte central desse tê se conecta um pedaço da tubulação maleável de ¼'' (6 mm) e em seguida conecte a câmara de pneu. Na outra ponta do tê, se conecta o restante da tubulação de ¼'' (6 mm) e na extremidade final da tubulação conecte a válvula com registro de ¼'' (6 mm) (Figura 22);

Figura 22 - Disposição da tubulação maleável e conexões.

Fonte: Autora (2021)

7) E para finalizar a montagem do biodigestor é feito a verificação da vedação. Neste caso, da bombona, não foi necessário fazer a pintura externa escura para aumentar a

temperatura dentro do biodigestor, pois o galão já é de material opaco, o que evita a incidência de luz solar (Figura 23).

Figura 23 - Configuração final do biodigestor modelo rural.

Fonte: Autora (2021)

Resultados e discussão

De modo geral, o presente estudo demonstrou, de forma simples, a viabilidade de implantação, construção, manutenção e a difusão da tecnologia da utilização do biodigestor caseiro de baixo custo para residências urbanas e rurais, visto que a aceitação inicial e a avaliação são consideradas positivas, principalmente nos aspectos da obtenção de um retorno tanto ambiental quanto financeiro, quanto a possível substituição do gás de cozinha, que atualmente chega à quase 10% do salário mínimo.

Os custos advindos da construção dos biodigestores no presente estudo foram relativamente baixos já que parte dos materiais puderam ser reaproveitados ou foram doados. O uso de materiais reaproveitados, reciclados ou sem uso atual, podem ser uma alternativa economicamente viável para a construção do biodigestor, já que não precisa ser necessariamente com materiais novos, apenas estando em bom estado de conservação.

Durante o desenvolvimento da pesquisa encontraram-se algumas inconformidades em relação as ideias iniciais, principalmente com a vedação dos biodigestores, o que acarretou no comprometimento da continuidade da pesquisa, além da disponibilidade da matéria de alimentação do equipamento urbano, como o esterco fresco de bovino ou suíno, para a iniciação da atividade microbiana.

Como o fator de maior problema na construção dos biodigestores foi à vedação, isso também, porque o biogás apresenta em sua composição gases corrosivos como o dióxido de carbono CO_2 e o gás sulfídrico H_2S, esse pode ter sido o fator que levou a deterioração da cola utilizada no primeiro protótipo confeccionado, que foi do modelo urbano, feito em fevereiro de 2020. Porém, com a utilização de outros métodos como o veda calha e a aplicação de pedaços de câmara de ar com cola solucionaram momentaneamente tal problema nos equipamentos seguintes.

Após a conclusão da confecção de cada biodigestor, foram instalados em local que pudessem ter incidência solar para a manutenção da temperatura interna, condição que em Roraima é um fator positivo, pois há um melhor rendimento do biodigestor em superfície, onde a temperatura em que se encontra o biodigestor esteja na faixa indicada para que as bactérias metanogênicas possam ter um melhor desempenho, que é entre 35° C e 40°C (ESTOPPEY, 2010).

Seguindo a literatura, em elevadas temperaturas a atividade microbiana é aumentada, fazendo com que a matéria orgânica se degrade mais rápido e levando a uma diminuição do tempo de produção do biogás (LI et al., 2017). Logo, com o decorrer do tempo se a temperatura se mantiver controlada e sem variações drásticas, os resultados podem ser melhores e mais satisfatórios na obtenção do biogás e do digestato (KARLSSON, 2014).

Cabe salientar a observação de que a pressão produzida pelos gases dentro do biodigestor é baixa, logo para que o gás pudesse entrar na câmara de ar foi necessário retirar a válvula do pito da câmara de ar, a qual é o principal ponto de inspeção visual da produção de biogás, por meio da variação de volume.

No decorrer das semanas após a instalação dos equipamentos do modelo urbano, e buscando compreender o motivo da baixa produção de biogás, uma vez que a câmara de ar não apresentava variação em seu volume após a instalação, verificou-se que havia um vazamento, que prejudicou a obtenção de qualquer resultado a respeito daquela produção. Como consequência, uma parcela considerável do gás produzido havia sido perdida, tornando inviável a obtenção dos primeiros resultados a respeito da capacidade produtiva. Em via de obter novos resultados, foi feito o esvaziamento total do biodigestor, e todo sistema de

vedação foi refeito, no entanto ainda apresentou ineficaz o modelo de vedação, areia com super cola.

Após esses primeiros testes com o equipamento urbano optou-se por utilizar outro método de vedação no biodigestor de modelo rural, com veda calha, o qual apresentou melhor resposta.

Observou-se também que, devido aos reparos necessários para a eficiência da vedação, a câmara de ar utilizada para o armazenamento do gás, apresentou rachaduras, devido a exposição prolongada à luz solar e demais intempéries, o que resultou em outros vazamentos, sendo necessária a substituição desta parte do equipamento.

Conclusão

A eficiência da engenharia mostrou uma barreira que influenciou o desenvolvimento do biodigestor, onde apresentou dificuldades em encontrar um material que fosse eficiente na vedação do equipamento. No entanto, apesar dos percalços com a utilização de materiais alternativos a acessíveis, a confecção dos protótipos foi executada.

Sabendo que a utilização de reatores anaeróbicos para o tratamento de substratos traz muitos pontos positivos, é necessário ter o conhecimento e o controle dos parâmetros que podem ocasionar inconformidades na produção de biogás que é primordial para o sucesso de projetos e plantas de biogás. Há fatores internos e externos que podem comprometer a degradação do material e consequentemente a produção de biogás. Sendo essa, então, uma sugestão para trabalhos futuros.

A questão da escolha de reatores que possam operar com uma determinada carga orgânica, é importante e está diretamente relacionado com a produção de biogás. Foi com o intuito de obter um reator de menor escala, que pudesse ser implementado em qualquer residência que se optou pelo modelo inicial apresentado. Assim como é importante levar em consideração a disponibilidade dos substratos, fator que pode causar prejuízos ambientais e de rentabilidade.

No entanto, a objeção na obtenção da matéria orgânica fresca, o esterco, para dar início ao processo de biodigestão e o material de vedação inicial não ter sido eficiente conforme esperado, despertou ciência de que é necessário investimento maior nesses quesitos, que podem ser pontos não tão positivos.

Diante disso a definição do reator correto em conjunto com um monitoramento adequado que contemple fatores internos e externos da operação desses biodigestores é de suma importância para a eficiência e durabilidade de projetos e plantas de biogás.

Com toda base, é evidente que a tecnologia dos biodigestores caseiros apresenta condições de auxiliar na solução de muitos problemas criados pela produção de resíduos, desde que tal tecnologia sofra os ajustes cabíveis e necessários.

O desenvolvimento dos protótipos utilizando diferentes materiais de vedação se provou uma experiência positiva, a qual demonstrou que apesar de ser um equipamento reprodutível e de fácil acesso, a sociedade ainda não está pronta para receber o biogás em área urbana por condições de disponibilidade de material e, também, por questão de conhecimento sobre a biodigestão. Fato que seria resolvido com a difusão na questão de educação ambiental, e os benefícios que pode trazer.

Esse trabalho de pesquisa não esgota, nem limita o assunto sobre o qual apresenta. É sempre possível encontrar novos ângulos da questão, apresentar novos enfoques do tema estudado. Entretanto, cada pesquisa deve encontrar seu término em algum ponto de seu desenvolvimento, embora não tenha conseguido atingir o que vislumbrava, essa dissertação deixa abertas as portas para novas pesquisas, que venham a enriquecer cada vez mais o conhecimento acadêmico e científico sobre o tema estudado. Que possamos tomar a responsabilidade de levar adiante a investigação iniciada, corrigindo os erros, aprimorando pontos de vista e apresentando enfoques novos ou mesmo revolucionários sobre a questão dos biodigestores e a preservação do meio ambiente.

Referências

BGS. Equipamentos para Biogás. **Biodigestores ao redor do mundo**. Disponível em: <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redordo-mundo>. Acesso em: 17 set. 2019.

CHAVES et al.. Sistemas de biodigestão: um modelo de economia e sustentabilidade para a comunidade rural. **Brazilian Journal of Development,** v.7, n.3, p. 26143-26168. Curitiba, 2021.

DEGANUTTI, R. et al.. **Biodigestores rurais**: modelos indiano, chinês e batelada. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Bauru, São Paulo, 2002. 5p.
Disponível em: https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/853.

ESTOPPEY, N. Evaluation of small-scale biogas systems for the treatment of faeces and kitchen waste. **Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)**, Dübendorf, Switzerland. p.7, 2010.

FARIAS, D. C. **Relatório técnico conclusivo sobre a análise situacional do aterro sanitário de Boa Vista, Roraima quanto ao atendimento à política nacional de resíduos sólidos**. Boa Vista, Roraima: UFRR, 2020. 24p.

KARLSSON, T. et al.. **Manual básico de biogás**. 1 ed. Lajeado: Editora Univates, Rio Grande do Sul, 2014. 69 p.

LEFF, E. **Racionalidade Ambiental**: A reapropriação social da natureza. Tradução de Luís Carlos Cabral. Editora Civilização Brasileira. Rio De Janeiro, 2006. 555 p.

LI, L. et al.. Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 20-28. China, 2017.

LOPES, L. A et al.. Desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo aplicado na agricultura familiar. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, São Paulo, Brasil, v. 14, n. 1, p. 8–15, 2020.

PAKINSTAN SCIENCE CLUB. **How to Make Biogas Plant, Anaerobic Digester Experiment**. DO - Science. Disponível em: <https://www.paksc.org/pk/diy-projects/764-biogas-plant-experiment>. Acesso em: 22 out. 2019.

TAUSEEF, S. M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 704-741. India, 2012.

3 CAPÍTULO II

Apreciação do processo de funcionamento de um biodigestor proposto para áreas urbana e rural de Boa Vista, RR

Introdução

Uma energia proveniente da biomassa é definida hoje como fonte de energia renovável e com características de uma fonte segura de energia. No caso do biogás por meio da biodigestão, sua obtenção ocorre com a digestão anaeróbia da matéria orgânica contida nos substratos.

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo que requer condições específicas dependendo da atividade de um conjunto de micro-organismos capazes de transformar material orgânico em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Para êxito no processo de produção, conhecer as características dos substratos é fundamental para a tomada de decisões na operação de plantas de biogás (BRASIL; UNIDO, 2020).

O manejo inadequado de resíduos pode levar a poluição de águas superficiais e subterrâneas, poluição de solos, além da proliferação de vetores de doença e disseminação de patógenos. Assim sendo, pode-se destacar outras externalidades positivas que os biodigestores podem trazer; tanto econômica quanto social pois, com o gás, há obtenção de um insumo que pode ser usado para reduzir custos. Além disso, com a gestão dos resíduos, também auxiliará na solução de um dos maiores causadores de problemas ao meio ambiente, que é o destino dos resíduos orgânicos.

Em um local com condições favoráveis (temperatura, pressão e disponibilidade nutricional), como é dentro de um biodigestor, com ausência ou baixa concentração de oxigênio, o processo de digestão anaeróbica ocorre com a ação de micro-organismos que utilizam o material orgânico disponível e o transforma, por meio de processos bioquímicos, em digestato/biofertilizante, água, gases (biogás), como gás carbônico, metano (gás inflamável com potencial energético) e demais compostos (LI et al., 2017).

Processo de biodigestão

Segundo BRASIL e UNIDO (2020) comentam que o processo de digestão pode ser definido em quatro fases distintas:

a) 1ª. fase ou hidrólise é quando ocorre a transformação de compostos complexos em substâncias mais simples. Realizada por bactérias que tem capacidade de decomposição de carboidratos, gorduras e proteínas, é a conversão em matéria orgânica solúvel;
b) 2ª. fase é conhecida como acidogênese. Os aminoácidos, monossacarídeos, ácidos graxos e gliceróis, obtidos na primeira fase, podem ser absorvidos por bactérias anaeróbias e facultativas por meio de diversos processos fermentativos, liberando produtos de degradação intermediária, como o dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2);
c) 3ª. fase é a acetogênese. Nesta etapa, a maioria dos ácidos e álcoois produzidos durante a acidogênese são degradados em acetato. Além dos ácidos de cadeia curta, o CO_2 e o H_2 formados durante a acidogênese também podem ser convertidos em ácido acético ou metano;
d) 4ª. fase é a metanogênese. É a última etapa do processo de degradação da matéria orgânica. Nela o metano é formado principalmente a partir de acetato, CO_2 e H_2 por bactérias estritamente anaeróbias. Desta forma, todos os produtos da fermentação devem ser convertidos em compostos que podem ser utilizados pelas bactérias metanogênicas.

O biogás tendo origem dos mais diversos efluentes, sendo resultado da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica contida nos resíduos, é um gás constituído, principalmente, por metano (50-70%), dióxido de carbono (25-45%) e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e ácido sulfídrico (H_2S) (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009). O biogás pode possuir um alto poder calorífico devido à grande quantidade de metano em sua composição, mas sua utilização pode se tornar limitada pela presença desses outros gases, além do metano, como é o caso do dióxido de carbono e do ácido sulfídrico.

Além da mistura de gases, o biogás também apresenta água (umidade) em sua composição, em concentrações médias de 6% quando a 40ºC. Quando não removida, a água pode acumular nos dutos via processos de condensação, resultando em problemas de corrosão e/ ou entupimento (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

Fatores que influenciam na digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia sendo um processo em que bactérias decompõem a matéria orgânica em meio a ausência de oxigênio, é preciso que se observe alguns fatores importantes que influenciam a produção de biogás. Dentre estes fatores, BRASIL e UNIDO (2020) podem citar:

a) Temperatura: o desenvolvimento das bactérias e a produção de biogás é função da temperatura do biodigestor. As bactérias responsáveis pela biodigestão são bastante sensíveis a variações bruscas de temperatura;
b) Tipo de substrato: é o alimento a ser utilizado pelas bactérias. Uma vez que a relação carbono/nitrogênio é um fator muito importante;
c) Relação carbono/nitrogênio: fator para a formação dos ácidos orgânicos utilizados pelas bactérias para a produção de biogás. Além disso, o carbono é utilizado pelas bactérias como energia e o nitrogênio é usado para a construção das estruturas celulares;
d) Tempo de retenção: é o tempo em que o material orgânico permanece no interior do biodigestor. O tempo de retenção está relacionado a fatores como a granulometria, temperatura, entre outros. Em geral recomenda-se tempos de retenção de 4 a 60 dias;
e) Potencial Hidrogeniônico (pH): O pH adequado situa-se na faixa entre 6 e 8, tendo 7 como o ideal. Ambientes muito ácidos causam a morte das bactérias metanogênicas.

Parâmetros operacionais

O equilíbrio da digestão anaeróbia está relacionado à qualidade dos materiais orgânicos utilizados como substrato para a alimentação dos reatores e da atividade biológica dos micro-organismos em cada uma das fases de degradação da matéria orgânica. Cada grupo de micro-organismo envolvido no processo de produção de biogás possui requisitos próprios quanto às condições do ambiente e teores de nutrientes.

Quando possível, sugere-se a utilização de estratégias com o intuito de otimizar o processo de digestão anaeróbia, tais como realizar a mescla de substratos a fim de suprir com nutrientes ou balancear a concentração de algum componente no meio reacional que possa implicar em distúrbios no sistema ou em problemas operacionais futuros. É possível misturar mais de um substrato e/ou resíduos para alimentar um biodigestor. Esse procedimento de mistura é denominado como codigestão anaeróbia (MAO et al., 2015).

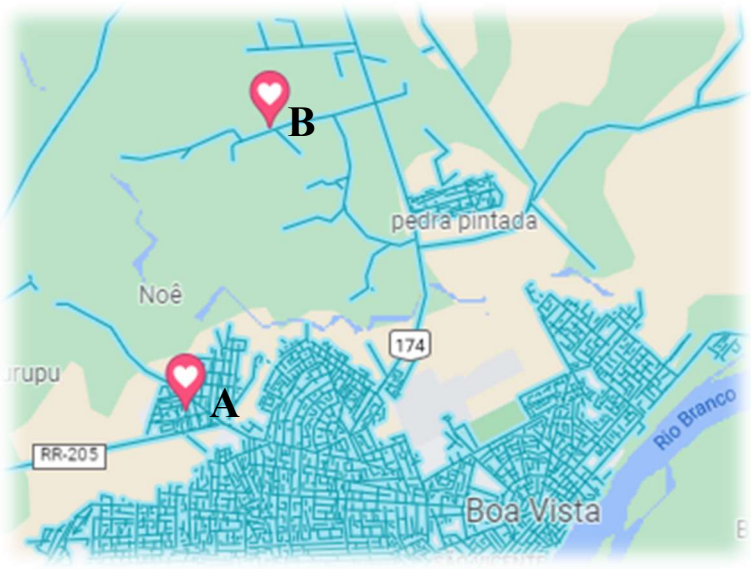
Quanto ao manejo dos dejetos que possam ser utilizados para o abastecimento de um biodigestor é conforme, principalmente, a disponibilidade financeira ou do material de cada produtor e qual o objetivo final do processo: abatimento de carga orgânica, remoção de nutrientes, inativação de organismos patogênicos, reuso da água, etc. (CARDOSO; OYAMADA; SILVA, 2015).

Materiais e métodos

Uma proposta multidisciplinar, podendo ser aproveitada nas mais variadas localidades, independente da área disponível, a construção do biodigestor tanto no meio urbano quanto em meio rural, com o aproveitamento de material descartado.

As localidades onde foram implantados os biodigestores foram de acordo com a disponibilidade dos usuários, conforme indicados na figura 24 a seguir. No meio urbano, em uma residência (ponto “A”) e na área rural (ponto “B”), um sítio localizado no bairro Monte Cristo, propriedade de pequeno produtor de leite, criador de bovinos e suínos.

Figura 24 - Localização de implantação dos biodigestores.



Fonte: Google Maps (2022)

A. Cargas

A matéria-prima para o abastecimento deste trabalho foram os resíduos das cozinhas das residências, urbana e rural, e os dejetos bovinos da criação presente no local. Cuidados foram tomados de não adicionar alimentos cárneos, nem gorduras animais e nem sangue.

A escolha deste substrato está relacionada ao fato de que o descarte de resíduos de cozinha, tanto domiciliar quanto industrial (restaurantes, lanchonetes, fábricas) e os dejetos animais serem um dos grandes problemas sanitários enfrentados atualmente. E também, pelo intuído de dar uma destinação aos materiais, sem valor comercial, que seriam descartados ou despejados sem qualquer tratamento.

B. Operacionalidade

Para os dois modelos de equipamentos propostos o procedimento inicial se deu de forma similar, alterando apenas a quantidade, pois cada equipamento utilizado era de um tamanho. Para iniciar a operação do biodigestor foi necessário primeiramente preparar o substrato, que foi como primeira carga o esterco fresco de gado. Dentro de um balde plástico, colocou-se cerca de 8 a 9 litros de esterco fresco de gado (aproximadamente 40% do volume total do biodigestor) para modelo urbano, e cerca de 20 litros para modelo rural; adicionando água na mesma proporção e misturando bem até ficar homogêneo. Pois, diferentes substratos com potencial de produção de biogás necessitam de pré-tratamento para que possam ser aproveitados em processos de digestão anaeróbia e aumentar o rendimento do biogás, em especial quando adotada codigestão de resíduos (BRASIL; UNIDO, 2020), que foi a utilizada no decorrer do processo de alimentação.

Abrindo o registro da tubulação de entrada para o abastecimento do biodigestor e com o auxílio do funil despejou-se aos poucos todo o substrato contido no balde, em seguida fechando novamente a tubulação de entrada. Ressaltando que, é necessário, assim como quando houver a coleta do biofertilizante, nas incorporações seguintes de substrato no biodigestor o tubo de saída deve estar aberto, para permitir a saída da matéria orgânica.

Após a primeira carga a alimentação do biodigestor deveria ser diariamente com aproximadamente um quilo de matéria orgânica misturada com água. Lembrando, 0,5 kg de matéria orgânica, mais 0,5 litros de água, misturados no balde e depois colocados dentro do biodigestor (BGS, 2019). Enfatizando que os biodigestores ficaram dispostos em um local

seguro e exposto ao sol durante algumas horas diárias, pois a primeira produção de biogás é mais lenta.

C. Condições de Funcionamento

Para garantir o bom funcionamento do biodigestor e a produção de biogás e biofertilizante são necessárias algumas considerações. Após o início da geração de efluentes, a alimentação do biodigestor deve ser feita diariamente, com matéria orgânica fresca e água na proporção de 1:1, para manter a produção de biogás constante (BGS, 2019).

As bactérias que atuam na primeira fase da biodigestão anaeróbia se desenvolvem em temperaturas de 20°C a 25°C, pois o fator temperatura é muito importante para todo o funcionamento do sistema. Enquanto, as bactérias que produzem o gás metano se multiplicam em temperaturas mais elevadas, de 35°C (BGS, 2019). Por conta desse fator relevante é que se tomou o cuidado em instalar os equipamentos em locais onde pudessem receber a incidência solar diária, de forma a manter a temperatura adequada.

A maneira simplificada e não onerosa de manter a temperatura elevada dentro do biodigestor é a adição de água aquecida dentro do mesmo, porém, levando em consideração as condições climáticas da região de Boa Vista/RR, isso não se fez necessário. Além disso, para que se mantivesse a homogeneidade do substrato no interior dos biodigestores, eles foram agitados pelo menos 2 (duas) vezes por semana, balançando manualmente o galão.

A agitação é importante para manter um contato total e permanente das bactérias com os dejetos, uniformizar a temperatura e as camadas que existem dentro do biodigestor. Além também de destruir microbolhas de gases formadas no interior da mistura e que aprisionam as bactérias, impedindo sua atuação na degradação dos dejetos e formação do biogás (BGS, 2019).

O biogás por ser composto em sua maior parte por metano, um gás altamente inflamável e explosivo, o biodigestor deve ser mantido longe de chamas e descargas elétricas. Além disso, instalado em um local ventilado, pois outros gases presentes no biogás podem causar tontura, fadiga, náusea, irritação, asfixia ou males ao sistema respiratório (BGS, 2019; FRARE, GIMENES, PEREIRA, 2009).

A chama produzida pela queima do biogás possui a coloração clara, podendo ser de difícil visualização, por conta disto, é adaptado ao sistema o borbulhador com água e cal, capaz de dar a coloração azul facilitando a visualização (BGS, 2019).

D. Coleta do Digestato

É necessária a certificação de que a tubulação de saída esteja com o registro fechado para que não haja interferência do ar. A partir do segundo abastecimento de substrato no biodigestor o tubo de saída deve estar aberto, assim com o registro, para permitir a saída da matéria orgânica já digerida. Este material deve ser coletado e pode ser utilizado como biofertilizante para adubar plantas (BGS, 2019).

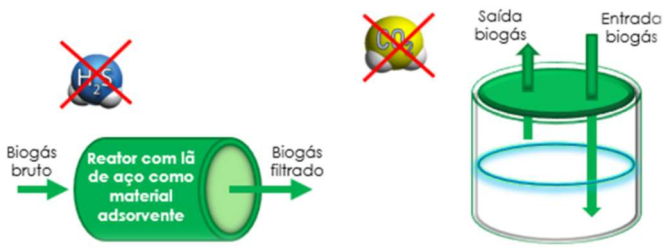
E. Purificação do biogás

O subproduto advindo dos biodigestores, o biogás, deve passar por uma purificação que consiste, normalmente, na remoção de componentes que possam comprometer sua utilização.

Dentre os principais contaminantes presentes no biogás citam-se a H_2O, o H_2S, o CO_2 e a NH_3. Se o biogás servir como combustível em motores geradores ou na utilização veicular, os principais componentes a serem removidos são aqueles corrosivos, em especial o ácido sulfídrico e a umidade e, também, o CO_2 (SCHIAVON MAIA et. al, 2015)

A remoção do ácido sulfídrico (H_2S), produzido com a biodigestão, pode ser realizada por processos biológicos, físicos ou químicos. Pois esse ácido reage facilmente com óxido de ferro, hidróxido de ferro e óxido de zinco, formando sulfeto de ferro ou sulfeto de zinco, respectivamente. A figura 25 demonstra o método conhecido como *iron sponge* (do inglês "esponja de ferro") é uma alternativa simples e economicamente acessível, pois utiliza uma base sólida, no caso lã de aço, para formar a base de reação (DA SILVA; MEZZARI, 2019). A esponja de aço em contato com o biogás enferruja, e assim, elimina os principais gases gerados (MATTOS; FARIAS JÚNIOR, 2011).

Figura 25 - Esquema com modelos de filtros para a purificação do biogás, que consiste na remoção do gás sulfídrico e dióxido de carbono, a partir da dissolução dos gases.



Fonte: Autora (2020)

Resultados e discussão

O primeiro protótipo confeccionado foi do modelo urbano, feito em fevereiro de 2020. Com carga inicial de aproximadamente 16 kg de substrato, de esterco seco bovino diluído em água. No decorrer dos dias seguintes foi feito o carregamento diário com resíduos alimentares triturados e misturados com água, na mesma proporção (Figura 26).

Figura 26 - Abastecimento do modelo urbano com substrato de resíduos alimentares.

Fonte: Autora (2020)

A opção inicial pelo esterco seco se deu pelo fato da indisponibilidade do material fresco na época dos testes preliminares.

Com alguns dias do início do processo foi observado um enchimento da câmara, conforme observado na figura 27, porém no teste de inflamabilidade não foi possível detectar gás suficientemente inflamável. E, nas semanas seguintes não houve nenhuma alteração no enchimento da câmara, logo, não houve nenhuma produção de gás e, o digestato produzido também foi em quantidade mínima, apenas alguns mililitros de líquido.

Figura 27 - Câmara de armazenamento cheia com a produção de gases.

Fonte: Autora (2020)

Após quatro semanas sem nenhuma alteração evidente, em relação à produção de gás, foi feita uma nova recarga de esterco animal diluído, para que houvesse uma aceleração na produção dos subprodutos. Foi então, que se observou vazamentos, logo a câmara não apresentava o enchimento esperado. Com isso foi feito o esvaziamento total do equipamento e refeito o sistema de vedação, porém ainda se apresentou ineficiente com o tipo de vedação de areia e super cola.

Com tais problemas de vedação detectados, foi tomada decisão em montar um segundo equipamento do mesmo modelo, com vedação de borracha e super cola e com abastecimento inicial de substrato fresco diluído. Após o descanso de 15 (quinze) dias da primeira carga foi dado início a cargas contínuas de resíduos alimentares. Logo nos dias seguintes pôde se notar o enchimento da câmara. Mas, no teste de inflamabilidade não fora detectado queima suficiente do gás gerado, o metano produzido era em pouca quantidade, ou seja, a chama foi de pouca duração. Após cada teste de inflamabilidade era feito o esvaziamento da câmara para que pudesse ter uma análise da produção do gás gerada pelo biodigestor.

Os testes de inflamabilidade mostravam que a produção não era a esperada de gás inflamável, o metano. Desta forma, a opção era de anexar filtros, um do modelo *Iron Sponge* para filtrar impurezas e a possível produção de gás sulfídrico (DA SILVA; MEZZARI, 2019). O outro filtro é adaptado com água e cal, capaz de dar a coloração azul facilitando a visualização do gás produzido, conforme esquema das figuras 28 a 30, a seguir. No entanto, mesmo com essas adaptações, os testes falharam. Não havia uma produção conveniente de gás metano.

Figura 28 - Filtro feito conforme modelo *Iron Sponge*, para remoção do gás sulfídrico, instalado em série na linha de biogás contendo lã de aço como material adsorvente.

Fonte: Autora (2020)

Figura 29 - Lã de aço oxidada após período de 15 dias de instalação no sistema.

Fonte: Autora (2020)

Figura 30 - Modelo de filtro usado com cal e água, para remoção do dióxido de carbono.

Fonte: Autora (2020)

O digestato produzido, desde o início das coletas apresentou odor forte, avinagrado. Com isso foi possível então, detectar que não estava havendo a decomposição adequada do material orgânico, ou seja, os micro-organismos não estavam agindo conforme a decomposição anaeróbia deve ocorrer. Pois, para que ocorra a digestão anaeróbia, as atividades dos microrganismos em todas as etapas (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) devem ocorrer de maneira equilibrada (BRASIL; UNIDO, 2020)

Devido aos problemas apresentados com a vedação dos equipamentos e consequentemente a ineficácia do biodigestor, foi tomada decisão em fazer com outro material de vedação, o veda-calha. Nesse momento então, foi montado um terceiro biodigestor modelo urbano e o equipamento de modelo rural. Ambos deveriam agir no mesmo período de tempo, a partir de agosto de 2020, para que pudesse obter parâmetros de comparação.

Com duas semanas após a instalação dos equipamentos e dado início com a primeira carga de esterco fresco de gado diluído, figura 31, foi iniciado o abastecimento com material orgânico advindo dos descartes alimentares das cozinhas.

Figura 31 - Abastecimento com esterco bovino fresco diluído em proporção 1/1.

Fonte: Autora (2021)

Após um mês do início do processo, o equipamento modelo urbano, apresentou enchimento da câmara e o teste de inflamabilidade foi bem satisfatório. O equipamento modelo rural, por ser de porte maior precisou de mais material orgânico, cerca de um acréscimo de 20 (vinte) litros. Após esse abastecimento foi analisada a produção de gás e também no teste de inflamabilidade, pôde-se contemplar chama (Figura 32).

Figura 32 - Chama observada com ignição.

Fonte: Autora (2021)

Quanto ao digestato (Figura 33), após 30 (trinta) dias do início, só se pôde fazer a coleta no modelo urbano, que ainda apresentou odor muito forte, ocasionado por um processo de acidificação do material em decomposição. Como comentado anteriormente, o equilíbrio das etapas de digestão anaeróbia, pelo processo de degradação da matéria orgânica, não estava transcorrendo como o previsto e desejável. Estima-se que tal evento ocorreu devido a não

seguridade das condições ideais dos parâmetros de operação, tais como exemplo a temperatura, pH, agitação e carga de alimentação (BRASIL; UNIDO, 2020).

Figura 33 - Retirada do digestato do equipamento e configuração do digestato obtido.

Fonte: Autora (2021)

Com o período de 60 dias após o início do processo com o terceiro equipamento modelo urbano, foram detectados micro vazamentos e ressecamento do galão, o que consequentemente levou a interferência na observação e medição da inflamabilidade. O modelo rural, teve bom desempenho quanto a vedação, porém, como indicado que teria de ficar em local arejado que pudesse ter incidência solar para mantimento da temperatura interna (BGS, 2019; FRARE, GIMENES, PEREIRA, 2009), houve também um ressecamento, neste, na entrada da câmara de armazenamento do gás, e posteriormente na tubulação maleável, o que ocasionou vazamentos, retardando, mais uma vez, a verificação da produção de biogás.

A produção de biogás em ambos modelos desenvolvidos, não foi considerada suficiente para que pudesse suprir o fornecimento de gás em substituição ao GLP, para o funcionamento do fogão, já que foi uma quantidade pequena.

Ao se passar por diversas adequações, a sugestão de uma modelo que pudesse ser amplamente difundido e passível de reprodução com a substituição de alguns materiais, que inicialmente foram utilizados.

O garrafão plástico de 20 (vinte) litros, apresentou uma durabilidade curta, por conta de intempéries que sofreu e, talvez também, pela ação interna da fermentação. Sendo esse um item essencial para a montagem de um biodigestor, o recomendado é utilizar um recipiente com configuração de material resistente, fabricado em plástico em polietileno de alta densidade, assim como o tambor que foi utilizado no modelo rural.

Conclusão

As observações e pesquisas realizadas acerca da biodigestão foram enriquecedoras no âmbito ambiental, que, apesar do tema estar em alta, ainda são bem escassos os recursos utilizados pela população geral. É uma área extremamente promissora e relevante, haja vista que a saúde do planeta depende, também, do esforço individual. A biodigestão é apenas uma dentre várias formas de contornar os danos que a raça humana fez e tem feito ao meio ambiente. Por mais que seja um ato simples e bastante limitado, é uma alternativa palpável que pode estar ao alcance de todos.

Tendo isto dito, é por meio de experiências e aprendizados que descobrimos o que é a verdadeira ciência da pesquisa. Na avaliação do desempenho dos biodigestores, os primeiros modelos apresentaram uma série de problemas, principalmente no âmbito vedação. Apesar de terem sido utilizados objetos de fácil acesso na sua confecção, foram modelos que não agradaram justamente no quesito ao material de vedação, que era com cola e areia. Foi o primeiro passo que precisou ser refeito, a partir da reformulação de ideias e de materiais, culminando na confecção de um modelo diferenciado.

Muitos foram os obstáculos enfrentados para a confecção do modelo final. A reformulação das ideias e funções no meio de um processo já avançado de desenvolvimento, foi bastante desafiador. Novas alternativas, novos estudos de materiais; praticamente um novo começo. Mesmo selecionando a alternativa definitiva, foram necessárias uma série de modificações e adaptações. Foi um momento crítico, já que mesmo com uma série de mudanças os resultados não foram como os esperados, limitando assim a evolução do experimento. Porém, é importante destacar a importância de se atentar às condições do usuário, dos materiais acessíveis e a disponibilidade em manter um equipamento, uma vez que é preciso dedicação como peça fundamental para sucesso em tal finalidade.

O resultado final, mesmo não sendo exatamente o esperado, devido à problemas físicos dos equipamentos que foram anteriormente idealizados, foi engrandecedor e muito incentivador. Tomando como base a satisfação que as pessoas tiveram ao ver o produto, trouxe o pensamento, que, a decisão de implementar diretamente o biodigestor não é suficiente, senão for apresentada conjuntamente com a educação sobre tal sistema, sobre a educação ambiental envolta nesta aplicação e sua capacidade transformadora com os possíveis retornos.

O modelo inicial, seguindo orientações da bibliografia, precisou passar por uma série de acabamentos e ajustes, exatamente porque a manipulação e acesso aos materiais podem ser

diferentes em cada confecção e situação, não saindo como esperado. Mesmo assim, com todos os seus defeitos, é um grande avanço quando o assunto é a confecção caseira de biodigestores.

A possível carência de metano no biogás produzido é uma problemática a ser analisada, bem como as questões bioquímicas. Tendo em vista que os principais fatores que influenciam na fermentação são o pH e a temperatura, fica claro que estes itens devem ser amplamente explorados nas novas pesquisas nesse âmbito.

Por fim, apesar de todas as expectativas criadas não terem sido alcançadas, os modelos de biodigestores caseiros podem sim ser eficazes, desde que seguindo as mudanças sugeridas. O incentivo à prática do uso da biodigestão, uma vez que a intenção é a de dar uma destinação alternativa e adequada a resíduos que antes seriam descartados, estaremos fazendo a diferença, mesmo que pequena, para nossa saúde e do planeta. São pequenas atitudes, no dia a dia, que ajudam o meio ambiente e incentivam a adoção desse tipo de prática por terceiros.

Referências

BGS. Equipamentos para Biogás. **Biodigestores ao redor do mundo**. Disponível em: https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redordo-mundo. Acesso em: 17 set. 2019.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações; UNIDO, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia de Substratos Agroindustriais**. Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil. CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis. UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. MCTI. Brasília-DF, ago. 2020.

CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C., SILVA, C. M. Produção, tratamento e uso dos dejetos suínos no Brasil. **Desenvolvimento em Questão**. Editora Unijuí. Ano 13, n. 32. Rio Grande do Sul, 2015.

DA SILVA, M.L.B.; MEZZARI, M.P. Tratamento e purificação de biogás. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Capítulo IV, p. 69-93, Jan. 2019.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 167-172. Paraná, 2009.

LI, L. et al. Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 20-28. China, 2017.

MAO, C. et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540–555, 2015.

MATTOS, L.C.; FARIAS JÚNIOR, M. **Manual do biodigestor sertanejo**. Projeto Dom Helder Câmara. Recife, 2011. 55 p.

SCHIAVON MAIA, D.C. et al. Estudo da purificação de biogás para uso energético pela absorção de H_2S E CO_2 . **XXXVII ENEMP**. Universidade Federal de São Carlos, out. 2015.

CONCLUSÕES

A pesquisa realizada teve como principal finalidade a confecção e implementação da tecnologia do biodigestor como fonte alternativa de energia em uma pequena propriedade urbana ou rural, utilizando materiais e equipamentos acessíveis economicamente e localmente. A tecnologia da biodigestão anaeróbica se mostra eficiente nos ambientes urbanos e rurais, para o tratamento dos rejeitos alimentares e de dejetos de animais servindo como filtro biológico e também como fonte de biogás e do digestato, podendo gerar o biofertilizante.

O biogás e o biofertilizante são insumos de alto valor econômico produzidos através de resíduos orgânicos que se descartados de forma incorreta e sem o devido tratamento trazem impactos catastróficos ao meio ambiente. Em síntese, a proposta apresentada sugere uma opção economicamente viável a fim de solucionar o problema do descarte de resíduos orgânicos proveniente das cozinhas e da atividade rural, como a criação animal, e ao mesmo tempo viabilizar uma fonte alternativa de energia e biofertilizante, proporcionando benefícios econômicos com a diminuição dos custos de produção.

Após o estudo, confecção e implantação dos biodigestores nas localidades escolhidas, comprovamos a viabilidade técnica com adaptações nos equipamentos. No entanto, a viabilidade energética com o biogás e a produção do biofertilizante não puderam ser mensuradas, devido a recorrentes adaptações nos equipamentos. Mas, apesar dos inconvenientes ocorridos, pôde ser comprovando que é possível implementar técnicas já conhecidas de forma inovadora, a fim de alcançar o desenvolvimento sustentável, que abrange as áreas ambiental, econômica e social. Porém, se faz necessário uma ampla divulgação dos conhecimentos acerca da utilização de biodigestores.

Como visto anteriormente o estudo a médio prazo além de auxiliar na resolução do problema para a destinação de rejeitos e de dejetos gerados, pode também representar uma economia na renda familiar, e consequentemente uma melhora na qualidade de vida, podendo alcançar resultados mais satisfatórios se implementados a mais propriedades da região, com os devidos ajustes nos equipamentos, evitando assim, problemas no processo da biodigestão.

Deixamos como proposta para possíveis novos trabalhos, um aprofundamento dos valores aqui obtidos a longo prazo, e o impacto sócio econômico que tal alternativa de modelo pode apresentar para a região em que foi implantado e também expandir os valores para uma localidade maior. Vale ressaltar sempre a importância da conscientização da sociedade para a educação ambiental como base para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. N. et al. A problemática dos resíduos sólidos urbanos. **Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente**. Aracaju, v. 2, n. 1. p 25-36, out. 2013.

ALMEIDA, V. N. L.; BRUNO, R.L. Biodigestor Orgânico: geração de energia elétrica através de Biogás. **Revista Científica da FHO|UNIARARAS**. Mogi Guaçu, São Paulo, v. 4, n. 2, 2016. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2018**. São Paulo, 2018. 68 p.

BARICHELLO, R. et al. O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região noroeste do Rio Grande do Sul. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente.** v. 8, n. 2, p. 333-355, maio/ago. 2015.

BEZERRA, K.L.P. et al. Uso de biodigestores na suinocultura. Artigo 275, v. 11, n. 5, p. 3714-3722. **Revista Eletrônica Nutritime**. Piauí, set./out. 2014. 9 p.

BGS. Equipamentos para Biogás. **Biodigestores ao redor do mundo**. Disponível em: <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redordo-mundo>. Acesso em: 17 set. 2019.

BLEY, C. **Biogás**: a energia invisível. 2. ed. Revista e ampliada. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015. 231p.

BRASIL. Lei n° 12.305, de 02 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. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF, 02 ago. 2010.

BRASIL. Lei n° 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF, 27 abr. 1999.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resíduos Sólidos.** Disponível em: https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos. 2016. Acesso em: 17 set. 2019.

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2017. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Brasília: MDR.SNS, maio 2019. 194 p.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações; UNIDO, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia de Substratos Agroindustriais**. Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil. CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis. UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. MCTI. Brasília-DF, ago. 2020.

CALZA, L. F. et al. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 6, p 990-997, nov./dez. 2015.

CARDOSO, B. F.; OYAMADA, G. C., SILVA, C. M. Produção, tratamento e uso dos dejetos suínos no Brasil. **Desenvolvimento em Questão**. Editora Unijuí. Ano 13, n. 32. Rio Grande do Sul, 2015.

CHAVES et al. Sistemas de biodigestão: um modelo de economia e sustentabilidade para a comunidade rural. **Brazilian Journal of Development,** v.7, n.3, p. 26143-26168. Curitiba, 2021.

DA SILVA, M.L.B.; MEZZARI, M.P..Tratamento e purificação de biogás. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Capítulo IV, p. 69-93, jan. 2019.

DEGANUTTI, R. et al. **Biodigestores rurais**: modelos indiano, chinês e batelada. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP-Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Bauru, São Paulo, 2002. 5p.

DIVYA, D.; GOPINATH, L. R.; CHRISTY, P. M.. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. **Renewable And Sustainable Energy Reviews.** India, v. 42, p. 690-699, fev. 2015.

FERREIRA, C. M. et al.. Biodigestor para o gás do lixo orgânico. **E-xacta – Edição Especial Interdisciplinaridade**, v. 4, n. 2, p. 5-17. Belo Horizonte: UniBH, 2011.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C.. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Paraná, v. 14, n. 2, p. 167-172, 2009.

FRIGO, K.D.A. et al. Biodigestores: seus modelos e aplicações. **Acta Iguazu,** Cascavel, v. 4, n. 1, p. 57-67, 2015.

GOES, D. A contribuição do aterro sanitário de resíduos sólidos - um breve estudo de caso no aterro de Paulo Afonso, Bahia. **Revista Científica da FASETE**. p. 90-105. 2016.

GREENPEACE. Revolução Energética: rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis. **Relatório Revolução Energética 2016**. São Paulo, 2016. 96 p.

KARLSSON, T. et al. **Manual básico de biogás**. 1 ed. Lajeado: Editora Univates, Rio Grande do Sul, 2014. 69 p.

LEFF, E. **Racionalidade Ambiental**: A reapropriação social da natureza. Tradução de Luís Carlos Cabral. Editora Civilização Brasileira. Rio De Janeiro, 2006. 555 p.

LEFF, E. **Saber ambiental:** sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. ed 5. Petrópolis: Vozes, 2001. 494 p.

LI, L. et al. Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 20-28. China, 2017.

LOPES, L. A et al. Desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo aplicado na agricultura familiar. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, São Paulo, Brasil, v. 14, n. 1, p. 8–15, 2020.

MAO, C. et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540–555, 2015.

MATTOS, L.C.; FARIAS JÚNIOR, M. Manual do biodigestor sertanejo. **Projeto Dom Helder Câmara**. Recife, 2011. 55 p.

NHANCA, N. J.; MORAES, C. A. M. Uso de biodigestor em comunidades rurais da Guiné-Bissau para geração de energia, biofertilizante e saneamento. In Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 10. 2019, Paraíba. **Anais...** Paraíba: Instituto Venturi, 2019.

NUNES, A. R.; RECH, S. C.; PICCOLI, T. T. Biodigestores – Biomassa e Biogás. In: Congresso de Pesquisa e Extensão da Faculdade da Serra Gaúcha, II, 2014, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. **Resumos...** Rio Grande do Sul: Faculdade da Serra Gaúcha, maio 2014.

NUNES, T. S. Reciclagem, o meio ambiente e a garantia constitucional. In. Congresso de Direito Constitucional do Estado de Roraima, V, 2018, Boa Vista, Roraima. **Resumos...** Roraima: Universidade Estadual de Roraima, p. 34, maio 2018.

PAKINSTAN SCIENCE CLUB. How to Make Biogas Plant, Anaerobic Digester Experiment. **DO - Science**. Disponível em: <https://www.paksc.org/pk/diy-projects/764-biogas-plant-experiment>. Acesso em: 22 out. 2019.

PALHARES, J.C.P. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro. 2008. Artigo em **Hypertexto**. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2008_1/Biodigestao/index.htm>. Acesso em: 10 out. 2019.

PORTELA, M. O.; RIBEIRO, J. C. J. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e Sociedade,** v. 2, n. 1, p. 115-134. 2014.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO - PROSAB. **Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**. Rede Cooperativa de Pesquisas. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210 p.

SALOMOM, K. R.; FILHO, G. L. T. **Biomassa**: Série Energias Renováveis. Itajubá, Minas Gerais: FAPEPE, 2007. 36 p.

SIMON, F. W.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B. Avaliação de Digestato Proveniente de resíduos Alimentares por meio de ensaio de germinação. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 329-344. Florianópolis, 2020.

SCHIAVON MAIA, D.C. et al. Estudo da purificação de biogás para uso energético pela absorção de H_2S E CO_2. **XXXVII ENEMP**. Universidade Federal de São Carlos, out. 2015.

SOUZA, L. S. B.; ANDRADE, G. G. Resistividade no entorno do aterro sanitário municipal de Boa Vista, Roraima, Brasil: implicações ambientais. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**. Ciências Naturais, v. 13, p. 435-452. 2018.

SOUZA, L. S. B.; ANDRADE, G. G.; MORAES, G. R. Um lixão sob o ponto de vista da geofísica rasa, município de Caracaraí, Roraima, Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 21-41. 2018.

STILPEN, M.R.; STILPEN, D.V.S.; MARIANI, L.F. **Análise do programa RenovaBio no âmbito do setor de biogás e biometano do Brasil.** v. 24, n. 4. 2018. Disponível em: https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/441/386. Acesso em: 10 out. 2019.

TAUSEEF, S. M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 704-741. India, 2012.

TAVARES, A.N.; SANTOS, G.V.; CARVALHO, R.Q. **Oportunidades enterradas [recurso eletrônico]:** geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Dados eletrônicos. Vitória: EDUFES. 2019. Disponível em: http://repositorio.ufes.br:8080/bitstream/10/11417/1/Oportunidades_Enterradas.pdf. Acesso em: 13 nov. 2019.

ZAGO, V.C.P; BARROS, R.T.V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária Ambiental,** v. 24, n. 2, p. 219-228. Rio de Janeiro, 2019.