

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Henrique Lacerda de Santana Azevedo

BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA PRODUTORES E COOPERATIVAS RURAIS

Goiânia, 2021.

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Henrique Lacerda de Santana Azevedo

BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA PRODUTORES E COOPERATIVAS RURAIS

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração:

Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa.

Linha de Pesquisa:

Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Coorientador: Prof. Dr. Warde Antonieta da Fonseca-Zang.

Goiânia, 2021.

A994b Azevedo, Henrique Lacerda de Santana.

Biodigestores anaeróbios como alternativa tecnológica para produtores e cooperativas rurais / Henrique Lacerda de Santana Azevedo. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

77p.

Orientação: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Coorientação: Prof. Dr. Warde Antonieta da Fonseca-Zang.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Biogás. 2. Biodigestores. 3. Resíduos orgânicos. I. Zang, Joachim Werner (orientação). II. Fonseca-Zang, Warde Antonieta da (coorientação). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 631.8

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica:

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☒ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☐ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: | |

Nome Completo do(a) Autor(a): **HENRIQUE LACERDA DE SANTANA AZEVEDO**

Matrícula: **20182011140046**

Título do Trabalho: **BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA PRODUTORES E COOPERATIVAS RURAIS**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:

☒ Não

☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: **19/08/2021**

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 15 de dezembro 2021.

(Assinado eletronicamente)

HENRIQUE LACERDA DE SANTANA AZEVEDO

Documento assinado eletronicamente por:

■ **henrique lacerda de santana azevedo, HENRIQUE LACERDA DE SANTANA AZEVEDO - ESTUDANTE - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 20/12/2021 09:58:48.**

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/12/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 229733

Código de Autenticação: 4c0c1aafc2



Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2811 (ramal: 2811)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 13/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

HENRIQUE LACERDA DE SANTANA AZEVEDO

BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA PRODUTORES E COOPERATIVAS RURAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Aprovada em: 19/08/2021

Prof. Dr. JOACHIM WERNER ZANG – Presidente e Orientador PPGTPS IFG

Prof.^a Dr.^a WARDE ANTONIETA DA FONSECA-ZANG – Avaliadora e Coorientadora – PPGTPS IFG

Prof. Dr. WILSON MOZENA LEANDRO – Avaliador – UFG-EA

Prof.^a Dr.^a REGINA CÉLIA BUENO DA FONSECA – Avaliadora – PPGTPS IFG

Documento assinado eletronicamente por:

- Warde Antonieta da Fonseca Zang, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/10/2021 08:03:55.
- Joachim Werner Zang, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/08/2021 13:50:48.
- Regina Celia Bueno da Fonseca, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/08/2021 14:02:15.
- Wilson Mozena Leandro, WILSON MOZENA LEANDRO - DOCENTE - UFG (01567601000143), em 19/08/2021 14:10:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 191911

Código de Autenticação: 6a4f670b71



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

DEDICATÓRIA

Á minha noiva pelo carinho, companheirismo e crescimento diário, aos meus pais por todo esforço em oferecer a mim sempre as melhores oportunidades, a minha irmã por me incentivar e minhas avós, exemplos de amor na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gratidão a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho. Foram três anos de desenvolvimento que me possibilitaram grande crescimento profissional e pessoal. Agradeço principalmente ao Dr. Joachim Werner Zang e a Dra. Warde Antonieta da Fonseca-Zang, excelentes Professores dos quais tive a grande chance de ter como orientadores nessa fase de minha jornada acadêmica. Agradeço a paciência e confiança em mim depositados, além dos ensinamentos e oportunidades que obtive através deles. Vielen Dank!

Aos outros Professores do Programa de Mestrado, em especial a Professora Dra. Regina Célia Bueno da Fonseca, que desde o começo acompanhou a evolução dessa pesquisa.

Aos colegas de turma, companheiros nesse desafio, agradeço a cada um.

A todos os colaboradores do IFG, funcionários da limpeza, segurança e manutenção que contribuem para essa Escola ser um lugar muito especial.

Também agradeço a UFG, instituição parceira que de forma natural sempre me acolheu. Em particular ao Dr. Wilson Mozena Leandro, Professor da Escola de Agronomia, que tem sido para mim um exemplo de carisma e sabedoria.

Agradeço também ao meu amigo Seu João, construtor nato que nos auxiliou na execução dos projetos.

Também aos amigos Wisney e Freddy que por muitas vezes dedicaram o tempo livre auxiliando na operação dos biodigestores.

A todos esses, e alguns outros sem os quais não teria conseguido.

Muito obrigado!

EPÍGRAFE

“O otimista é um tolo. O pessimista, um chato. Bom mesmo é ser um realista esperançoso.”
Ariano Suassuna

Título: Biodigestores anaeróbios como alternativa tecnológica para produtores e cooperativas rurais.

Autor: Henrique Lacerda de Santana Azevedo

Orientador: Joachim Werner Zang

Coorientador: Warde Antonieta da Fonseca-Zang

RESUMO

O crescimento das atividades produtivas relativas à agropecuária é responsável por trazer desenvolvimento econômico ao meio rural, porém, inevitavelmente, promove a geração de impactos ambientais que precisam ser considerados. Os resíduos orgânicos, principalmente os dejetos resultantes das criações e manejo dos animais precisam de tratamento adequado para evitar a contaminação do solo, água e atmosfera. A agricultura familiar no Brasil enfrenta diversos problemas, principalmente custos crescentes com energia (gás) e fertilizantes. Como estratégia em fortalecer os produtores rurais e de promover o tratamento adequado dos resíduos orgânicos e reduzir os efeitos negativos das atividades agrícolas, este trabalho propõe o uso de biodigestores anaeróbios para evitar a contaminação ambiental e ainda gerar energia e biofertilizante. O objetivo desta dissertação foi de pesquisar tecnologias de biodigestores rurais aptos para converter resíduos orgânicos em biogás e adubo. A revisão bibliográfica contribuiu na pesquisa e na implementação de três modelos de digestores pilotos no Laboratório de Biomassa e Biogás, o BiogasLab IFG-UFG, sendo um digestor tubular e um de cúpula flutuante, ambos com volume útil aproximado de 4 m³, ainda com sistemas de separação líquido-sólido do digestado. Como substrato para biodigestão anaeróbia, utiliza-se o esterco bovino proveniente do Setor de Gado de Leite da Universidade Federal de Goiás. O terceiro digestor trata-se de um reator tipo tanque de agitação contínuo (CSTR) de 6 m³ de volume útil, com regulação de temperatura solar térmica automatizada, controle de pressão, dessulfurização, condensação do vapor de água, sendo capaz de digerir resíduos orgânicos com teores de matéria seca de até 10% com maior eficiência. O modelo CSTR conta ainda com reservatório para o biodigestado e armazenamento de externo de biogás.

PALAVRAS-CHAVE: RESÍDUOS ORGÂNICOS. DIGESTÃO ANAERÓBIA. BIOGÁS. BIOFERTILIZANTE. ENERGIAS RENOVÁVEIS.

TITLE: Anaerobic Biodigesters as a Technological Alternative for Producers and Rural Cooperatives

AUTHOR: Henrique Lacerda de Santana Azevedo

ADVISER: JOACHIM WERNER ZANG

CO-ADVISER: WARDE ANTONIETA DA FONSECA-ZANG

ABSTRACT

Raising productive activities related to agriculture are responsible for bringing economic development to the rural environment, however, it inevitably promotes the generation of environmental impacts that need to be considered. Organic residues, mainly waste resulting from animal husbandry and handling, need adequate treatment to avoid contamination of the soil, water, and atmosphere. Family farming in Brazil faces several problems, mainly rising energy (gas) and fertilizer costs. As a strategy to strengthen rural producers and promote the proper treatment of organic waste and reduce the negative effects of agricultural activities, this work proposes the use of anaerobic biodigesters to avoid environmental contamination and generate energy and biofertilizer. The aim of this dissertation was to research technologies for rural biodigesters able to convert organic waste into biogas and fertilizer. The literature review contributed to the research and implementation of three models of pilot digesters in the Biomass and Biogas Laboratory, the BiogasLab IFG-UFG, with a tubular and a floating dome digester, both with a useful volume of approximately 4 m³, and with a liquid-solid separation system for the digestate. As substrate for anaerobic biodigestion, cattle manure from the Dairy Cattle Sector of the university is used. The third digester is a continuous stirring tank reactor (CSTR) of 6 m³ of useful volume, with automated solar thermal temperature regulation, pressure control, desulfurization, condensation of water vapor, being able to digest waste organics with dry matter contents of up to 10% with greater efficiency. The CSTR model also has a reservoir for the biodigestate and external storage of biogas.

KEYWORDS: ORGANIC WASTE, ANAEROBIC DIGESTION, BIOGAS, BIOFERTILIZER, RENEWABLE ENERGY

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da Agricultura Familiar no Brasil.....	17
Figura 2 - Dinâmica das fases da digestão anaeróbia.....	25
Figura 3 - Tipos de agitação.....	27
Figura 4 - Taxa de crescimento dos microrganismos relativa à temperatura.....	28
Figura 5 - Crescimento plantas de biogás instaladas e volume de biogás.....	33
Figura 6 – Gráfico comparativo entre diferentes modelos de biodigestores.....	35
Figura 7 - Biodigestor tipo “Chinês” com cúpula fixa.....	36
Figura 8 - Biodigestor tipo “Indiano”.....	37
Figura 9 - Biodigestor “Sertanejo” com cúpula flutuante de fibra.....	38
Figura 10 - Reator BLC em formato circular.....	39
Figura 11 - Esquema de um reator de lagoa coberta.....	39
Figura 12 – Série de biodigestores tipo lagoa coberta.....	40
Figura 13 - Esquema de um digestor tubular.....	41
Figura 14 - Biodigestor tubular em Equador.....	41
Figura 15 - Esquema de um biodigestor CSTR.....	42
Figura 16 - Biorreatores tipo "CSTR".....	42
Figura 17 - Reator industrial UASB.....	43
Figura 18 - Desenho esquemático de um reator tipo UASB.....	43
Figura 19 - Esquema de um biodigestor modelo Batelada.....	44
Figura 20 - Reservatório tipo “Gas bag”.....	45
Figura 21 - Queimador de biogás.....	46
Figura 22 - Equipamento industrial para purificação de biogás.....	47
Figura 23 - Motogerador utilizado na geração distribuída de energia.....	48
Figura 24 - Motobomba à biogás para aplicação do biofertilizante.....	48
Figura 25 - Válvula para controle da pressão.....	49
Figura 26 - Mapa da área de estudo.....	51
Figura 27 - Curral do Setor de Bovinocultura de Leite da EVZ/UFG.....	52
Figura 28 - Coleta de biomassa proveniente da esterqueira.....	52
Figura 29 - Medidor volumétrico de gás.....	54
Figura 30 - Medição da composição do biogás.....	54
Figura 31 - Desenho técnico digestor tubular.....	61
Figura 32 - Biodigestor tubular no BiogasLab IFG-UFG.....	62
Figura 33 - Desenho técnico digestor Sertanejo.....	63
Figura 34 - Biodigestor Sertanejo no BiogasLab IFG-UFG.....	64
Figura 35 - Sistema de agitação manual.....	65
Figura 36 - Circulação interna do substrato.....	65
Figura 37 - Desenho técnico digestor CSTR.....	66
Figura 38 - Biodigestor CSTR no BiogasLab IFG-UFG.....	67
Figura 39 - Planta baixa do digestor CSTR e periféricos.....	68

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1- Valores médios da concentração de sólidos voláteis, potencial de geração de metano e quantidade de efluente produzido na criação de suínos e bovinos.....	20
Tabela 2 - Variação na composição de biogás.....	22
Tabela 3 - Classificação dos grupos de microrganismos de acordo com a temperatura.....	28
Tabela 4 - Relação FOS/TAC e características do reator.....	31
Tabela 5 - Características operacionais dos biodigestores.....	34
Tabela 6 - Comparação dos parâmetros e resultados de diferentes digestores.....	56
Tabela 7 – Parâmetros operacionais adotados para os três biodigestores no BiogasLab IFG-UFG....	60
Tabela 8 – Características relevantes do biodigestores implantados no BiogasLab IFG-UFG.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Agricultura familiar.
Biogaslab IFG-UFG	Laboratório de Biomassa e Biogás.
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão.
COV	Carga Orgânica Volumétrica.
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i> [reator tanque agitado contínuo].
DA	Digestão anaeróbia.
DBO	Demanda biológica de oxigênio.
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.
FNR	<i>Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.</i> [Agência Alemã Recursos Renováveis].
GEE	Gases de efeito estufa.
GLP	Gás liquefeito de petróleo.
IFG	Instituto Federal de Goiás.
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU.
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MO	Matéria orgânica.
MS	Matéria seca.
MSO	Matéria seca orgânica.
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.
ONG	Organização não governamental.
ONU	Organização das Nações Unidas.
PEAD	Polietileno de Alta Densidade.
PVC	Policloreto de vinila.
RSU	Resíduos sólidos urbanos.
RedBioLAC	Rede de Biodigestores para América Latina e Caribe
STP	<i>Standard Temperature and Pressure</i> [Condições padrão de temperatura e pressão]
SV	Sólidos voláteis.
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica.
UFG	Universidade Federal de Goiás.
UFPA	Unidade Familiar de Produção Agrária.
UV	Ultravioleta.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVO(S) ESPECÍFICO(S).....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	AGRICULTURA FAMILIAR.....	17
2.1.1	Uso da Lenha.....	18
2.1.2	Resíduos Orgânicos.....	19
2.2	A BIOMASSA.....	20
2.3	DIGESTADO.....	21
2.4	BIOGÁS.....	22
2.4.1	Aproveitamento energético.....	23
2.5	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	24
2.4	A DINÂMICA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	24
2.4.1	Disponibilidade de nutrientes.....	26
2.4.2	Controle do processo.....	26
2.4.3	Parâmetros operacionais importantes para o correto funcionamento.....	29
2.5	BIODIGESTORES.....	32
2.5.1	Origem e difusão.....	32
2.5.2	Biogás no Brasil.....	33
2.5.3	Materiais utilizados na construção.....	34
2.5.4	Modelos existentes.....	34
2.5.5	Periféricos.....	44
2.5.6	Procedimentos de Segurança.....	49
3	DESENVOLVIMENTO.....	50
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA.....	50
3.2	METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE DIGESTORES NO BIOGASLAB IFG-UFG.....	50
3.3	DESENVOLVIMENTO E INSTALAÇÃO DOS BIODIGESTORES.....	51
3.3.1	Local para implementação dos biodigestores.....	51
3.3.2	Matéria prima ou substrato.....	52
3.3.3	Monitoramento dos biodigestores.....	53
4	RESULTADOS.....	55
4.1	RESULTADOS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA.....	55
4.1.1	Conclusão da revisão sistemática bibliográfica.....	59
4.2	BIODIGESTORES IMPLANTADOS NO BIOGASLAB IFG-UFG.....	60
4.2.1	Digestor Tubular.....	61
4.2.2	Digestor de Cúpula-flutuante (Sertanejo).....	62
4.2.3	Digestor CSTR - Reator Brasileiro.....	66
5	DISCUSSÃO.....	69
6	CONCLUSÃO.....	71
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
8	REFERÊNCIAS.....	73
	RESUMO DO CURRÍCULO LATTES.....	77

1 INTRODUÇÃO

Inevitavelmente as atividades ligadas as práticas da agropecuária intensiva, são responsáveis por liberar grandes quantidades de gases promotores do efeito estufa (GEE). As mudanças climáticas ocasionadas pelo aumento da concentração desses gases na atmosfera, tem gerado uma problemática ambiental a nível mundial. Políticas internacionais têm sido elaboradas pela Organização das Nações Unidas (ONU), como estratégias para atingir metas de redução das emissões. O Relatório Especial de 2018 aponta que para conter o aquecimento global é necessário a redução de 45% na emissão atmosférica de CO₂ até 2030. Também recomenda o aumento de 70 a 80% no fornecimento de energias renováveis até 2050 (WBA, 2019). Diante desse cenário, é emergencial o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para a redução das emissões de GEE e a descarbonização da matriz energética. No intuito de alcançar esses objetivos, ficou acordado entre os países participantes da ONU um Plano de Ação para o Desenvolvimento Sustentável, chamado Agenda 2030. Nesse contexto, a agricultura é uma peça chave para alcançar os objetivos da Agenda 2030. De um lado, existe uma pressão cada vez maior em fornecer alimentos suficientes para uma população em constante crescimento, de outro, é preciso lidar com as mudanças climáticas e os impactos causados pela agricultura extensiva convencional.

Devido ao exponencial crescimento da população mundial, associado à necessidade cada vez maior de incrementar a produção de alimentos, as emissões relacionadas às fontes agrícolas, assim como o uso quase irrestrito de combustíveis fósseis, têm proporcionado um significativo aumento da concentração dos GEE na atmosfera nos últimos séculos, que cresce em ritmo exponencial desde a revolução industrial (WUEBBLES; HAYHOE, 2000).

Para alimentar o mundo de forma sustentável, faz-se necessária uma mudança urgente e radical nos sistemas de produção. O fortalecimento da agricultura familiar (AF) é crucial neste contexto. Como medida de reforço, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) lançou a Década das Nações Unidas para a Agricultura Familiar 2019-2028, dando protagonismo para a AF na agenda internacional por dez anos (FAO; IFAD, 2019).

Os pequenos produtores rurais são muito vulneráveis aos efeitos negativos das mudanças climáticas. Além de alterar drasticamente as condições de produção, os atingem também economicamente, através das flutuações cambiais, aumentando os preços dos combustíveis e dos insumos agrícolas. Diante disso, é preciso fortalecer os seus sistemas de produção, tornando-os mais independentes de recursos externos.

Para se tornar mais competitiva, a AF necessita de tecnologias para melhorar os seus processos produtivos. Contudo, a tecnologia deve estar ao alcance dos agricultores familiares, que em muitos casos contam com recursos financeiros limitados.

Inevitavelmente, algumas atividades da agricultura familiar, ocasionam a geração de resíduos orgânicos em grandes quantidades. Sobretudo na criação de animais confinados, principalmente bovinos e suínos, acarretando o acúmulo dos dejetos, que se dispostos indiscriminadamente no meio ambiente, poluem o solo, os mananciais e a atmosfera.

Uma alternativa tecnológica sustentável é o uso de biodigestores para o tratamento dos resíduos orgânicos gerados. Biodigestor é o nome dado a um tipo de reator anaeróbio, em que determinado material orgânico é digerido por meio da ação de microrganismos. Como produtos deste processo, são gerados: o biogás, combustível que pode ser aproveitado como fonte de energia renovável; e uma nova biomassa chamada de *digestado*, que tem grande potencial para uso como fertilizante orgânico.

Com o propósito de contribuir na disseminação tecnológica de biodigestores, foi iniciado um centro de pesquisa dedicado ao desenvolvimento de pesquisas direcionadas ao aproveitamento dos resíduos orgânicos através da digestão anaeróbia (abrev. DA), o BiogasLab IFG-UFG. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo principal pesquisar o potencial do uso de biodigestores, desenvolvidos para pequenas e médias propriedades rurais, para assim, possibilitar o manejo adequado dos dejetos, evitando assim a poluição ambiental, além disso, aproveitando-os como fonte de energia alternativa e fertilizante orgânico.

Foi realizado uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) sobre biodigestores com potencial de ser utilizado em pequena escala, para assim, comparar o desempenho, as propriedades, a construção, o manuseio, os custos e de implementação dos três modelos diferentes de biodigestores recomendados e já instalados durante esta pesquisa no BiogasLab IFG-UFG.

Essa dissertação faz parte do projeto internacional WWEF-Nexus (www.wweef-nexus.org) desenvolvido em parceria entre o Instituto Federal de Goiás, a Universidade Federal de Goiás, e a *University College London* (Reino Unido) e da FH Aachen (Alemanha). Este projeto contou com apoio do CNPq, *Newton Fund*/FAPEG e do Ministério Alemão para Educação e Pesquisa (BMBF). O WWEF-Nexus surgiu como a finalidade de integrar o manejo sustentável dos recursos naturais, através da relação entre o uso responsável da água, dos resíduos da energia e o alimento e estimular o desenvolvimento rural no Brasil, estimulando a sustentabilidade na agricultura orgânica, através da recuperação de nutrientes e energia a partir dos resíduos orgânicos, por meio dos pequenos produtores rurais.

1.1 OBJETIVO GERAL

- Pesquisar tecnologias para biodigestores aptos a serem utilizados na agricultura familiar.

1.2 OBJETIVO(S) ESPECÍFICO(S)

- Realizar uma revisão bibliográfica sistemática sobre biodigestores utilizados.
- Selecionar os digestores com potencial para ser adaptado para a agricultura familiar AF no Brasil.
- Desenvolver e realizar a construção de três digestores de tecnologias diferentes para ser instalados como modelos para a AF.
- Testar e descrever o uso das tecnologias.
- Comparar os modelos descritos identificando a aptidão de cada reator.

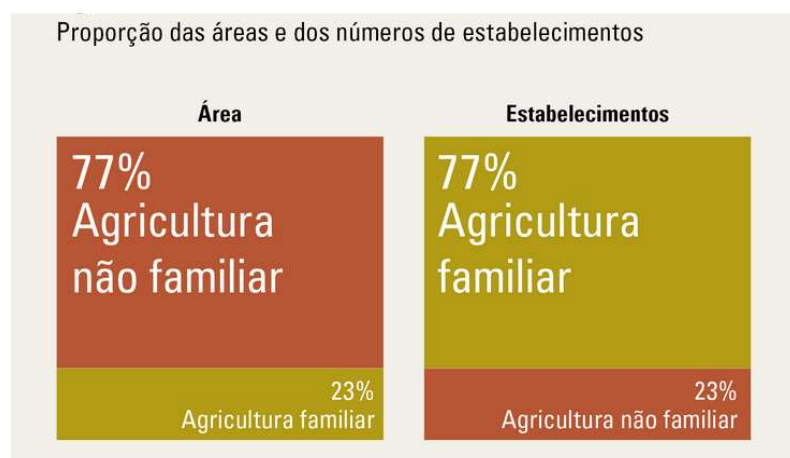
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AGRICULTURA FAMILIAR

As atividades da AF possuem características e dinâmica diferente da agricultura não familiar. No modelo de AF, a gestão da propriedade é controlada pela própria família. A principal fonte geradora de renda é a atividade agropecuária. No Brasil, a Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais foi estabelecida inicialmente pela Lei nº 11.326 de 2006, que foi modificada em 2017 pelo Decreto nº 9.064. É definida como Unidade Familiar de Produção Agrária (UFPA) uma propriedade com área de até quatro módulos fiscais, e que utilize mão-de-obra da própria família nas atividades econômicas do estabelecimento (BRASIL, 2006). Contudo, a realidade dos estabelecimentos é significativamente variável, dependendo da localidade onde estão situados. O tamanho de um módulo fiscal varia muito, podendo ir de 5 a 110 hectares, dependendo de fatores relacionados ao município, como o tipo de exploração predominante e a renda obtida com essa exploração (EMBRAPA, 2017).

Segundo o Censo Agro 2017, apenas 23% da área agrícola do país é ocupada por propriedades que se enquadram na modalidade de AF. Se considerarmos o número total de estabelecimentos, 77% deles, cerca de 3,9 milhões, enquadram-se na modalidade.

Figura 1 - Distribuição da Agricultura Familiar no Brasil



Fonte: IBGE (2019).

Mesmo com uma área produtiva bem menor do que a agricultura convencional, a AF é responsável pela produção da maior parte dos alimentos que chegam às mesas dos brasileiros, e, também, pela maioria dos postos de trabalho no campo. De todas as pessoas ocupadas em atividades

agropecuárias no Brasil, 67% delas, cerca de 10,1 milhões, estão envolvidas com a AF. Além disso, a atividade é a base da econômica de 90% dos municípios brasileiros com até 20 mil habitantes (IBGE, 2019).

A extensa dimensão territorial do Brasil resulta em diferenças geográficas e culturais, diversidade econômica e heterogeneidade social em cada região. Assim, AF desenvolvida no país, possui características distintas que proporcionam realidades heterogêneas resultantes das condições regionais, clima, formação histórica e cultural e políticas públicas. Enquanto na Região Nordeste a AF representa 46,6% das atividades agrícolas, na Região Centro-Oeste essa modalidade representa apenas 5,5%, a menor do país por região.

Enquanto as principais práticas exercidas nas unidades de produção agrícolas familiares em Rondônia são: bovinocultura de leite, seguido por suinocultura, bovinocultura de corte e horticultura (PEREIRA; ROCHA; TEIXEIRA, 2014). Na região sul do Brasil observa-se a predominância das atividades de origem vegetal de culturas temporárias (STOFFEL, 2006).

2.1.1 Uso da Lenha

O uso de lenha como fonte de energia em propriedades rurais é muito comum. A queima da madeira para o preparo de alimentos tem aumentado devido à alta do preço do botijão de gás liquefeito de petróleo (GLP) (GIODA; TONIETTO; DE LEON, 2019). Essa prática traz consequências negativas, tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde das pessoas. A queima da biomassa libera uma fumaça tóxica constituída por partículas finas e compostos cancerígenos que provocam uma série de doenças respiratórias graves. A exposição aos poluentes emitidos durante a queima ineficiente de biomassa em fogões rústicos é agravada em ambientes insuficientemente ventilados. Globalmente, pelo menos 2 bilhões de pessoas estão expostas a essas condições, sendo que mulheres e crianças geralmente são as mais afetadas. As doenças respiratórias estão entre as causas mais comuns de morte e de incapacidade no mundo (FIRS, 2017). No Brasil, a lenha é o segundo combustível mais utilizado para se cozinhar, estimando-se que em torno de 9 milhões de brasileiros ainda dependam exclusivamente desse recurso (GIODA; TONIETTO; DE LEON, 2019).

A crise econômica agravada pela recessão global diante da pandemia, tem provocado constantes aumentos nos insumos domésticos. Segundo o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) o gás de cozinha encerrou 2020 com alta de 9,24%, representando mais que o dobro da inflação registrada para o ano que foi de 4,52% (IBGE, 2021).

Sendo assim, torna-se importante o desenvolvimento de soluções alternativas, que contribuam na redução dessa prática. Uma delas é o uso de biodigestores domésticos, considerados uma tecnolo-

gia limpa e ambientalmente correta, podendo atender diferentes necessidades da agricultura familiar. Assim, a utilização de biodigestores em pequenas propriedades rurais não seria somente uma alternativa para se reduzir a contaminação ambiental, mas também uma alternativa para a geração de gás combustível, que pode contribuir para a redução no consumo de lenha no preparo de alimentos, gerando qualidade de vida para essa população.

Deste modo, faz-se necessário o desenvolvimento de políticas de apoio ao uso de fontes alternativas de energia no setor rural, e que tenham como público alvo pequenos produtores, beneficiando-os e os incentivando ao uso do biogás produzido na propriedade (SALCEDO; GUZMAN, 2014).

2.1.2 Resíduos Orgânicos

Embora a alta produtividade de suínos e bovinos proporcione o desenvolvimento econômico e social para o meio rural, vale ressaltar que as atividades da bovinocultura e suinocultura inevitavelmente produzem resíduos altamente poluentes. Portanto, questões ambientais relativas a essas atividades econômicas devem ser indagadas. Nesse sentido, o uso de biodigestores para promover o tratamento e aproveitamento destes resíduos é uma alternativa atraente para o produtor rural, se destaca como forma de promover a geração de energia renovável, evitar poluição e promover a reciclagem dos nutrientes (RESENDE *et al.*, 2015).

Resíduos orgânicos dispostos indiscriminadamente no meio ambiente possuem o potencial de poluir, seja contaminando o solo e os mananciais, bem como a atmosfera, devido à emissão dos GEE. Para o produtor rural que gera grande quantidade, estes resíduos se tornam um ativo ambiental. É responsabilidade do gerador promover o tratamento adequado para reduzir a carga poluidora antes de serem finalmente reintroduzidos no meio ambiente. A reutilização dos resíduos oriundos das atividades agrícolas em biodigestores possui duas vertentes significativas: a geração de fontes alternativas de energia e a redução dos impactos ao meio ambiente, permeando, desta forma, a construção de uma consciência sustentável e visando a preservação dos recursos naturais (LOPES *et al.*, 2020).

Segundo Soares *et al.* (2019), o uso do biogás é importante para a AF, pois, além de viabilizar o desenvolvimento sustentável, proporciona mais autonomia e mantém a identidade do meio rural, contribuindo para garantir a sobrevivência do homem do campo e seu patrimônio familiar. Ainda afirma que o biogás e o biofertilizante produzidos a partir de resíduos agropecuários dão maior autonomia de recursos às propriedades rurais (como, por exemplo, suprimento autônomo de combustível), segurança financeira, revalorizam a vida no campo, e proporcionam qualidade de vida,

pois, quando dispensados ou dispostos incorretamente, os resíduos orgânicos podem causar sérios prejuízos, como a contaminação ambiental e a disseminação de doenças (SOARES et al., 2019).

2.2 A BIOMASSA

Por biomassa, no sentido energético, denomina-se um determinado tipo de material de origem orgânica que tenha potencial de ser aproveitado energeticamente. Cada tipo de material orgânico possui uma aptidão ou por vias termoquímicas ou biológica. A biomassa é um recurso natural renovável que pode ser usado para a produção de biocombustíveis, seja na forma de queima direta, seja na produção de carvão vegetal, etanol, biodiesel ou biogás, por meio da digestão anaeróbia como proposto neste trabalho.

As criações de animais confinados, principalmente bovino e suinocultura, são atividades comumente desenvolvidas na AF. Essas práticas geram consideráveis quantias de dejetos, que, na perspectiva da digestão anaeróbia, são matérias primas promissoras para o processo. O biogás gerado pode servir como fonte de energia alternativa, utilizado como substituto do gás de cozinha, ou, dependendo da escala e complexidade da tecnologia implantada, produzir e fornecer eletricidade para consumo próprio ou dispor à rede de energia na modalidade de geração distribuída. Este potencial tem motivado a busca por novas tecnologias nas últimas décadas, visando o desenvolvimento dos sistemas produtivos, de modo a impulsionar os índices de produtividade e colaborar para uma pecuária mais eficiente e sustentável (ABIEC, 2016).

O potencial de geração de biogás de determinada biomassa é diretamente proporcional à concentração de sólidos voláteis (SV) contidos nela. Os teores de sólidos voláteis caracterizam a fração orgânica de material que poderia ser fermentado para produzir o biogás, ou seja, quanto maior for a concentração de SV na biomassa, maior será a produção de biogás, considerando a eficiência do biodigestor (LIMA; PESSOA; LIGO, 2002).

A tabela 1 mostra os parâmetros quantitativos relevantes para estimar o potencial da produção de biogás a partir da biomassa residual da criação de suínos e bovinos.

Tabela 1- Valores médios da concentração de sólidos voláteis (SV), potencial de geração de metano (B₀) e quantidade de efluente produzido na criação de suínos e bovinos.

Tipo de criação	SV (g_{sv} L⁻¹)	B₀ (m³CH₄ kg_{sv}⁻¹)	Produção de efluentes (L animal⁻¹ dia⁻¹)
SUÍNOS	35,38	0,32	10,28
BOVINOS	74,38	0,22	68,83

Fonte: Adaptado de (MITO et al., 2018).

2.3 DIGESTADO

Digestado (ou biofertilizante) é o nome dado à biomassa formada após a digestão pelos microrganismos anaeróbios. É o substrato tratado que sai do biodigestor, e, por isso, possui a carga orgânica reduzida, apresentando menor potencial poluidor. Ele é composto por uma mistura de biomassa microbiana com material não digerido, além de água (>90% v/v) e também possui todos os nutrientes contidos no substrato original, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio.

Na ótica da agricultura familiar, o uso da biomassa digerida, denominado digestado, é tão importante quanto o uso energético do biogás. Rico em nutrientes, o digestado pode ser reutilizado na agricultura como fertilizante. Através da digestão anaeróbia, esses nutrientes são transformados da forma orgânica para mineral, que é mais facilmente absorvida pelas raízes das plantas (LANSING et al., 2010).

Estes componentes atribuem ao digestado propriedades nutritivas ao solo e grande potencial de ser aproveitado na adubação de culturas, por meio da fertirrigação. A qualidade do digestado e os valores típicos de nutrientes contidos têm relação direta com o tipo de matéria-prima utilizada como substrato no biodigestor. Devido à grande variabilidade dos teores de nutrientes no digestado, faz-se imprescindível uma análise laboratorial para caracterização do biofertilizante antes de ser aplicado ao solo (PALHARES et al., 2008).

O digestado é considerado um adubo orgânico supostamente menos agressivo ao meio ambiente e com menor custo associado, levando a um aumento da sustentabilidade do sistema agrícola de produção, e reduzindo os impactos ambientais negativos associados a boa parte dos cultivos convencionais. O uso de biofertilizantes líquidos na agricultura vem mostrando bons resultados ao serem aplicados de forma alternativa na proteção das plantas. Essa estratégia é indicada principalmente para as pequenas propriedades, onde os recursos financeiros e tecnológicos são escassos, aproveitando os subprodutos da agropecuária, que muitas vezes são descartados (MEDEIROS; LOPES, 2006).

Dependendo das necessidades da propriedade rural e da composição do biofertilizante, este pode ser aproveitado após separação líquido-sólido por decantação. Para a AF, esse produto da DA tem extrema importância, pois proporciona a redução de custo com insumos fertilizantes convencionais e pode gerar mais renda para o produtor rural, por meio do aumento da produção agrícola. O manejo e o tratamento correto do digestado afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes do biofertilizante, e sua aplicação pode melhorar as reservas de nutrientes do solo e aumentar sua capacidade de suprir nutricionalmente as plantas.

Barlóg *et al.* (2020) demonstraram que a aplicação do digestado no solo como fertilizante é uma prática segura a curto prazo, pois, favorece a absorção de nutrientes pelas plantas, porém, a

longo prazo, pode ser restringida, devido ao acúmulo de elementos metálicos, e ao aumento da salinidade, biodegradabilidade e fitotoxicidade, sendo, portanto, recomendadas análises periódicas do solo para o monitoramento das propriedades físico-químicas (BARŁÓG; HLISNIKOVSKÝ; KUNZOVÁ, 2020).

Faz-se importante considerar que, embora esses fertilizantes orgânicos possam ter uma eficiência reduzida se comparados aos fertilizantes minerais, devido a parte dos nutrientes se encontrarem em formas ainda indisponíveis para as plantas (PALHARES et al., 2008), isso só se aplica no curto prazo, tendo em vista que, nos médio e longo prazos, os fertilizantes orgânicos propiciam um melhoramento do solo mais equilibrado, além de menos risco de intoxicação das plantas por adubação excessiva e de contaminação ambiental, por exemplo, com a emissão de amônia a partir da ureia.

2.4 BIOGÁS

A fração volátil, proveniente das reações bioquímicas que acontecem com a biomassa dentro do biodigestor é onde está o potencial de aproveitamento energético da DA. Por ser inflamável, essa parte gasosa pode ser queimada e aproveitada como fonte de energia limpa e renovável. O biogás é uma mistura de gases, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de vapor d'água (H_2O) e outros gases em menor quantidade como: gás sulfídrico (H_2S), monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e outros gases traços. A composição do biogás depende da sua origem, dependendo do tipo de substrato e das condições as quais são submetidos durante o processo.

Tabela 2 - Variação na composição de biogás.

COMPOSTO	% NA MISTURA
METANO (CH_4)	50 a 75%
DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)	25 a 40 %
GÁS SULFÍDRICO (H_2S)	0,01 a 0,5 %
HIDROGÊNIO (H_2)	1 a 3%
NITROGÊNIO (N_2)	0,5 a 2,5%
ÁGUA (H_2O) *	4 %

* o biogás geralmente é saturado com vapor de água, o teor do H_2O depende da temperatura.

Fonte: adaptado de (TORRES; PEDROSA; MOURA, 2012).

Naturalmente, na decomposição de MO, quando na ausência de oxigênio, a geração de biogás acontece de forma espontânea. O metano é o principal componente do biogás, sendo comumente encontrado em ambientes como: fundo de lagos, pântanos, rúmen de animais, entre outros ambientes

livres de oxigênio, condição esta que favorece a atividade metabólica dos microrganismos anaeróbios (DEUBELIN; STEINHAUSER, 2008).

Apesar do biogás ocorrer de forma natural, as atividades antropogênicas, principalmente a agropecuária intensifica as emissões atmosféricas, contribuindo ainda mais para o acréscimo de GEE, principais causadores do aquecimento global, especialmente quanto aos componentes CH_4 e CO_2 , que, juntos com vapor d'água, são os principais contribuintes para o efeito estufa. As emissões globais de metano são estimadas entre 400 a 600 Tg/ano, dos quais 70% são provenientes de atividades humanas, enquanto apenas 30% são originadas por fontes naturais (LAPA et al., 2004).

Observa-se que o biogás é também abundante em aterros sanitários e lixões, assim como em reservatórios de hidrelétricas, plantações de arroz e resíduos de animais de criação, sendo o seu aproveitamento um minimizador dos impactos negativos da atividade humana na estabilidade do clima global. Segundo Associação Mundial de Biogás, atualmente aproveita-se ainda somente cerca de 2% do potencial total de geração global de biogás (WBA, 2019).

O metano é o gás componente mais importante do biogás, sendo vinte e três vezes mais agressivo para a atmosfera do que o dióxido de carbono. Isso ocorre devido a molécula de metano ter como propriedade, uma maior capacidade de absorver a radiação infravermelha (ATCHA; VANSOON, 2002). Ou seja, para o efeito estufa, a emissão de uma tonelada de metano é equivalente à emissão de 23 toneladas de dióxido de carbono.

2.4.1 Aproveitamento energético

Por ser uma composição inflamável, o biogás possui o potencial de ser aproveitado como fonte de energia limpa e renovável. Pode ser utilizado como biocombustível, na geração de energia, elétrica ou mecânica, dependendo do nível de tecnologia disponível e das necessidades.

O biogás oferece muitos benefícios aos produtores rurais podendo ser usado como gás encanado, gás de cozinha, aquecedor de chocadeiras, secador de grãos, resfriamento, energia elétrica e pode ser usado como combustível em motores de combustão interna (BARICHELO, 2010).

Porém, para se utilizar o biogás como combustível em motores, faz-se necessário investimento de tecnologias de tratamento do biogás para remoção do gás sulfídrico (H_2S), que, por ser extremamente corrosivo, pode danificar, por exemplo, os motores e outros equipamentos.

Considerando o biogás contendo 65% de metano, a quantidade de energia contida em 1 m^3 é equivalente em termos de poder calorífico a 0,628 litros de gasolina, $0,6 \text{ m}^3$ de gás natural ou 1,602 kg de lenha seca (SANTOS; JORGE; SILVA, 2007). A quantidade de biogás para atender as necessidades de uma família que utilize o biogás para necessidades domésticas, como cozinhar para 8 pessoas, varia de 0,35 até $0,6 \text{ m}^3$ (WAHYUNI et al., 2018).

2.5 DIGESTÃO ANAERÓBIA

Digestão anaeróbia (DA) é o nome dado ao complexo processo bioquímico de transformação e degradação da matéria orgânica (MO), em um ambiente sem disponibilidade de oxigênio (anaeróbio), sob a presença de uma comunidade microbiana especializada, semelhante àquele microbioma ativo no rúmen de bovinos. É um fenômeno natural que pode ser aproveitado como uma fonte geradora de energia renovável, por meio do uso de um biodigestor.

É uma técnica muito atrativa para realizar o manejo de determinados tipos de resíduos orgânicos, evitando a contaminação ambiental, e ainda gerar gás combustível e fertilizante orgânico. Na DA, os resíduos orgânicos não são vistos como um rejeito. Estes são considerados como biomassa e servem de substrato para o processo, tornando-se novamente uma matéria prima da qual se obtém um gás inflamável, denominado biogás, e uma nova biomassa, mais estável e com propriedades atrativas para aplicações como biofertilizante e condicionador de solos.

O processo de DA acontece por meio de uma série de atividades bioquímicas, mediadas por microrganismos, principalmente bactérias anaeróbias e arqueas, que juntas, oxidam e reduzem o carbono orgânico presente na MO e o converte em CO₂ e CH₄ reduzindo a carga orgânica e do potencial poluidor da matéria original (KOUGIAS; ANGELIDAKI, 2018).

Existe uma diversidade de materiais orgânicos passíveis de serem aproveitados com a DA, resíduos domésticos e agrícolas, como: efluentes sanitários, restos de colheitas e dejetos de animais, que representam um grande potencial de aproveitamento. No mundo, atualmente, segundo Associação Mundial de Biogás, aproveita-se somente cerca de 2% do potencial total de geração global de biogás (WBA, 2019).

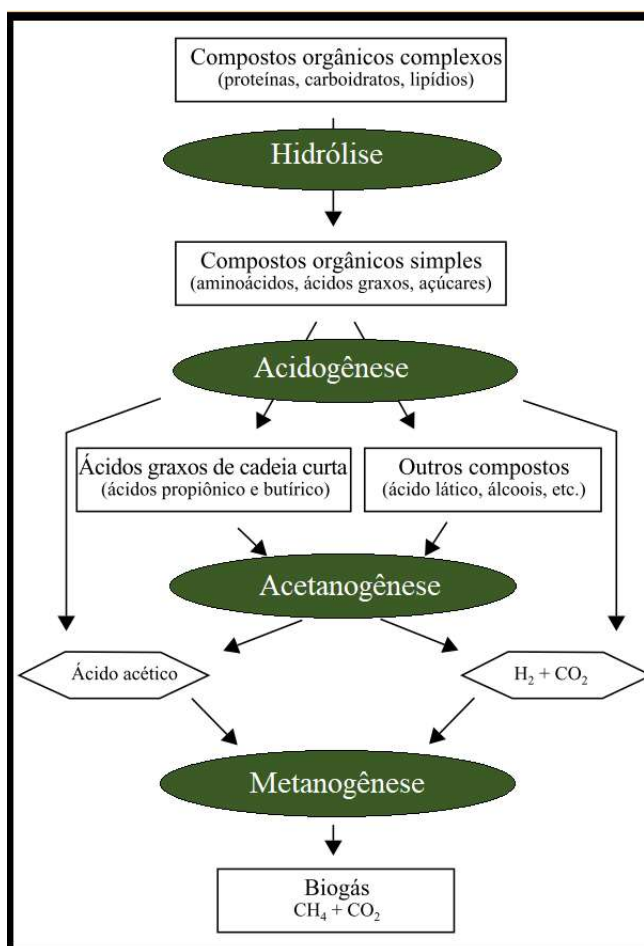
O domínio da DA, a partir do uso de biodigestores, é uma importante ferramenta para a AF, pois, além de promover o saneamento rural, gera também produtos ao final do processo, e que podem ser facilmente reintroduzidos no próprio ciclo produtivo da propriedade. Assim, o uso de biodigestores na agropecuária traz benefícios ao meio ambiente, promovendo a redução de emissões de GEE, evitando a contaminação do solo e das águas, além de estimular o manejo adequado dos dejetos dos animais de produção (PRACIANO et al., 2020).

2.6 A DINÂMICA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

O dinamismo da DA depende de um delicado equilíbrio no desenvolvimento metabólico destes variados grupos de microrganismos atuantes nas diferentes etapas do processo. Esse equilíbrio deriva de vários fatores, que interferem diretamente nas reações biológicas e na eficiência durante o desenvolvimento do processo.

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo em que um conjunto de reações bioquímicas reduzem a matéria orgânica complexa em compostos mais simples. Ela acontece através da ação de diferentes grupos de microrganismos, que se desenvolvem na ausência do oxigênio, e metabolizam as moléculas orgânica e produzem gás. O processo metabólico acontece em quatro fases (PROBIOGÁS, 2010):

Figura 2 - Dinâmica das fases da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de (PROBIOGÁS, 2010).

1. A **hidrólise** é a fase primária da DA. Nela, as bactérias fermentativas hidrolíticas liberam enzimas que permitem a primeira transformação da MO. Nesta fase, os compostos orgânicos complexos (como: carboidratos, proteínas e lipídios) são transformados em substâncias menos complexas, como: aminoácidos, açúcares e ácidos graxos (FNR, 2010).

2. Posteriormente, na segunda fase, a **acidogênese**, o grupo das bactérias fermentativas acidogênicas metaboliza os compostos formados durante a hidrólise e gera os ácidos orgânicos.

3. Na fase seguinte, a **acetogênese**, as bactérias acetogênicas promovem a oxidação dos ácidos orgânicos e os convertem em ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio.

4. No último e mais considerável estágio da DA, ocorre a etapa denominada **metanogênese**. Nesta fase, há a formação do gás metano, principal componente do biogás e responsável pelo seu potencial energético. Nesta etapa, o pH deve se manter em uma faixa entre 6,0 a 8,0, pois valores inferiores ou superiores podem diminuir ou paralisar por completo a produção de metano (CHERNICHARO, 2007).

2.6.1 Disponibilidade de nutrientes

Os diferentes grupos de microrganismos envolvidos na decomposição anaeróbia dependem das concentrações e disponibilidade de nutrientes disponíveis para o crescimento. A proporção equilibrada entre os macros e micro nutrientes é um pré-requisito para a estabilidade do processo. Os elementos Carbono e o Nitrogênio são elementos protagonistas nas reações bioquímicas da DA. O Carbono é utilizado como fonte de energia pelas células microbianas e o Nitrogênio é utilizado na síntese celular. O desempenho da produção da digestão anaeróbia e da produção de biogás, está diretamente condicionada com a composição do substrato, principalmente a relação de carbono e nitrogênio (C/N). A proporção ideal de C/N de um substrato é de 15-45. Uma relação mais alta ou mais baixa, pode diminuir a eficiência do processo (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

Uma elevada relação C/N não fornece nitrogênio suficiente para manutenção da massa celular, e o pouco disponível é rapidamente consumido, como consequência ocasiona a diminuição do biogás. Por outro lado, uma baixa relação também pode provocar o aumento da concentração de amônia prejudicando a formação do metano.

2.6.2 Controle do processo

O avanço das tecnologias, tem gerado o aperfeiçoamento de características tecnológicas, que contribuem significativamente na a eficiência de um biodigestor. A implementação de sistemas de controle de parâmetros importantes, melhoram as condições para a eficiência do processo.

Dentro de um biodigestor, a DA acontece de forma controlada. Porém, a eficiência do processo pode variar de acordo com as tecnologias disponíveis no modelo de reator adotado. O bom desempenho de um biodigestor está ligado à possibilidade de controle de parâmetros determinantes que interferem no processo, como: temperatura, pH, concentrações de sólidos e a composição do substrato (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).

A produtividade constante de biogás depende da estabilidade de parâmetros específicos, principalmente, a ausência de oxigênio, temperatura constante, valor do pH adequado, assim como a disponibilidade de nutrientes balanceados e a baixa concentração de substâncias inibidoras (PROBIOGÁS, 2010).

As diferentes frações do substrato apresentam rendimentos variados de biogás e de concentração de metano – somente biomassa pode ser transformado em biogás, água e material inorgânica não –, por isso, a separação dos sólidos por triagem e fixação por gravidade é uma possibilidade interessante. Amaral et al., (2016), em pesquisa sobre a influência da separação sólido/líquido por gravidade de dejetos suínos, relatou que a fração sobrenadante foi a que apresentou o maior rendimento de biogás se comparada às outras partes.

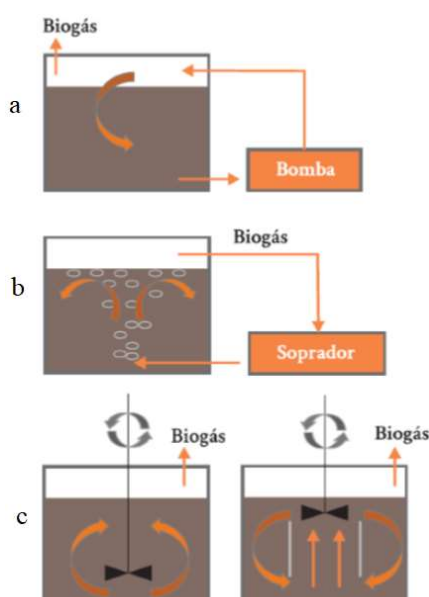
2.6.2.1 Mistura do substrato

A homogeneização do substrato dentro do biodigestor, é muito importante para a estabilidade do processo fermentativo. Promover a homogeneização do substrato utilizando mecanismos de agitação e mistura também regula a DA. Biodigestores que contam com sistemas de mistura são mais eficazes na degradação da biomassa e na produção do biogás. A agitação da biomassa proporciona aumento do contato entre as bactérias e a MO, e ainda elimina a formação de crostas e de sedimentos, facilitando a passagem e a liberação do biogás (PROBIOGÁS, 2010).

A agitação é um fator muito importante na otimização do processo. A agitação interna do substrato colabora na diminuição de formação de crostas, estimulando o desprendimento do biogás do lodo (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). A homogeneização também ajuda a absorver eventuais choques de substâncias inibidoras do processo por diluição. A agitação possibilita ainda que a temperatura do substrato se mantenha mais constante e homogênea, deixando o ambiente mais estável para os microrganismos se desenvolverem, proporcionando uma geração constante de biogás. Feiden *et al.*, (2005) constatou um aumento de 17,69% na geração de biogás em um biodigestor tubular alimentado com efluente suíno quando utilizando um sistema de agitação. Segundo

Os sistemas de homogeneização nos biodigestores se diferenciam a partir do tipo da tecnologia aplicada para movimentar a biomassa, podendo ser hidráulica, com o emprego de bombas que proporcionam a recirculação do substrato (figura 3.a); pneumática, com o uso de sopradores que promovam o refluxo do biogás (figura 3.b); ou mecânica, utilizando de motores e hélices que propiciam a mistura do material em seu interior (figura 3.c).

Figura 3 - Tipos de agitação.



Fonte: (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

2.6.2.2 Temperatura

O uso de mecanismos de aquecimento nos biodigestores pode aumentar significativamente a eficiência e produção de biogás. (SATHISH; VIVEKANANDAN, 2016). Os microrganismos envolvidos nos processos bioquímicos que envolvem a DA, se dividem em psicrófilos, mesófilos e termófilos, cada grupo possui uma faixa de temperatura ideal (PROBIOGÁS, 2010), ver tabela 3.

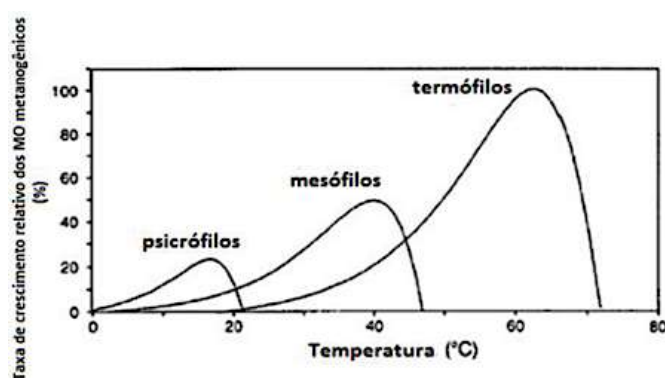
Tabela 3 - Classificação dos grupos de microrganismos de acordo com a temperatura.

Grupos de microrganismos	Temperatura ótima de crescimento
Termófilos	60 °C
Mesófilos	37 °C
Psicrófilos	15 °C

Fonte: (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

A temperatura do substrato influencia diretamente na dinâmica populacional e na velocidade de crescimento dos diferentes grupos de microrganismos envolvidos, pois, estes não possuem mecanismos de controle da temperatura interna, ficando, assim, sob influência de controles externos (CHERNICHARO, 2007).

Figura 4 - Taxa de crescimento dos microrganismos relativa à temperatura.



Fonte: (LINS, 2017) apud (ANGELIDAKI, 2004).

A maioria dos microrganismos produtores de metano se desenvolvem em condições mesofílicas ótimas, entre 35 e 37°C. No entanto, condições termofílicas aumentam a velocidade das reações bioquímicas ampliando a capacidade do reator em digerir a COV. Outras vantagens são a menor solubilidade do oxigênio, e a destruição de patógenos. (SAKAR; YETILMEZSOY; KOCAK, 2009).

2.6.2.3 pH

O valor de pH também é um fator determinante. Cada fase quatro da DA necessita de valores diferentes para o bom desenvolvimento. As arqueas metanogênicas crescem na faixa de 6,7-7,5.

O pH é outro parâmetro decisivo na DA. Para cada fase há um valor ótimo. Por exemplo, nas primeiras etapas, quando acontece a produção dos ácidos orgânicos, o substrato tende a reduzir o pH. Porém, na última e mais importante das fases, a metanogênese, quando ocorre a maior parte da produção do metano, o pH precisa estar entre 6,7 e 7,5 (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Quando pH está entre 5 e 7, ou seja, levemente ácido ou neutro, ocorre a produção de ácido butílico. Sob pH 8, ou seja, em condições básicas, acontece a produção de ácido acético e propiônico (HORIUCHI et al., 2002). O acúmulo dos ácidos orgânicos e a diminuição do pH podem inibir o crescimento grupo das arqueas metanogênicas e, conseqüentemente, inibir a geração de metano. Por esse motivo, o controle da concentração dos ácidos orgânicos é essencial para o bom desempenho de um biodigestor. A presença de nutrientes devidamente balanceados também é fundamental para o correto desenvolvimento dos microrganismos desejados. Para que o processo anaeróbio ocorra bem, faz-se necessário que as relações entre a demanda biológica de oxigênio (DBO), nitrogênio (N) e fósforo (P) estejam na proporção de 700:5:1. Alguns íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato são imprescindíveis para o bom funcionamento da DA. Outros componentes, como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio, são elementos traço importantes para o crescimento celular (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Estes são fatores que, alteram diretamente o crescimento dos microrganismos envolvidos, e influenciam na eficiência do processo. Impactando diretamente na quantidade e qualidade do biogás produzido, assim como na redução da carga orgânica do substrato.

Identificar a disponibilidade e a composição da biomassa, que será utilizada como substrato no biodigestor, é muito importante para saber qual o modelo é o mais apropriado para a ocasião. Todos os modelos de reatores estão sujeitos aos mesmos princípios da DA. Porém, possuem capacidades e necessidades operacionais diferentes, o que se deve também à técnica aplicada em cada um.

2.6.3 Parâmetros operacionais importantes para o correto funcionamento

Para garantir uma produção eficiente de biogás, faz-se necessário o monitoramento do desempenho dos biodigestores, por meio do controle de algumas variáveis determinantes para a DA. A alimentação demasiada, acima da quantidade que o reator consegue digerir, prejudica a efetividade da reação biológica, e, conseqüentemente, diminui a eficiência na produção de biogás. A fim de

evitar adversidades na operação dos digestores, certos parâmetros podem ser calculados para garantir pleno uso da capacidade dos reatores. A seguir, estão listados alguns parâmetros operacionais importantes para o correto funcionamento de um biodigestor.

2.6.3.1 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

O Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) é referente ao período médio em que o substrato permanece no interior do biodigestor. É definido pela razão do volume do biodigestor (V) e a vazão de alimentação (Q):

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Onde: TRH = Tempo de retenção hidráulica (d)

V = Volume do biodigestor (m³)

Q = Vazão de alimentação (m³.d⁻¹)

O TRH deve ser suficientemente longo para possibilitar o completo desenvolvimento dos microrganismos a DA. TRH curtos favorecem a lavagem da biomassa, provocando baixa produção de biogás um biodigestado não completamente digerido e com potencial poluidor. Biodigestores construídos em duas fases, proporcionam maior TRH para o sistema.

2.6.3.2 Carga Orgânica Volumétrica (COV)

A Carga Orgânica Volumétrica (COV) é relativo à quantidade de substrato que um reator é capaz de absorver em uma determinada faixa de tempo sem comprometer o equilíbrio do processo. A carga orgânica de um substrato é determinada pela quantidade de sólidos voláteis contidos contida por quilo do substrato (SV) multiplicado vazão de alimentação (Q) sobre o volume do biodigestor (V) (kg_{SV}. m⁻³ d⁻¹):

$$COV = \frac{(Q \times SV)}{V}$$

Onde: COV = Carga Orgânica Volumétrica (kg_{SV}. m⁻³ d⁻¹)

Q = Vazão (m³.d⁻¹)

SV: Concentração de sólidos voláteis presentes no substrato (kg m⁻³)

2.6.3.3 Equilíbrio ácido-base

A relação entre, o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis (AI) e a alcalinidade do substrato (AP), é um importante parâmetro de controle para biodigestores conhecido como AI/AP, ou internacionalmente FOS/TAC. Determinação da relação FOS/TAC é utilizada para estimar a quantidade máxima de alimentação que reator pode receber, sem perder eficiência. A técnica se baseia em um procedimento de titulação de uma amostra do substrato com ácido sulfúrico (ex.: 0,1 mol·L⁻¹), até pH 4,5. Para descobrir a relação entre o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e a capacidade de tampão do sistema (alcalinidade), utiliza se as fórmulas:

$$Alc = M \times E \times \frac{100.000}{D}$$

Onde: Alc = Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹)

M = Concentração de solução de ácido sulfúrico (mol·L⁻¹)

D = Volume de amostra (mL)

E = Volume de titulante gasto (mL)

100.000 = Coeficiente de ajuste da unidade de medida

$$AI/AP = \frac{\left((V_{pH4,4} - V_{pH5,0}) \cdot \frac{20}{V_{amostra}} \cdot \frac{M_{ácido}}{0,1} \cdot 1,66 - 0,5 \right) \cdot 500 \cdot V_{amostra}}{0,5 \cdot M_{ácido} \cdot V_{pH5,0} \cdot M_{CaCO_3} \cdot 1000}$$

Onde: AI/AP = Relação alcalinidade intermediária e alcalinidade parcial

V_{pH4,4} = Volume de ácido titulado até pH = 4,40 (mL)

V_{pH5,0} = Volume de ácido titulado até pH = 5,00 (mL)

V_{amostra} = Volume de amostra centrifugada (mL)

M_{ácido} = Molaridade do ácido (conc. molar do íon de hidrogênio dissociado no ácido)
(mol L⁻¹)

M_{CaCO₃} = Massa molar do carboneto de cálcio em 100 g mol⁻¹

Tabela 4 - Relação FOS/TAC e características do reator.

Relação FOS/TAC	Característica do reator
> 0,4	Reator em sobrecarga
0,3 - 04	Faixa ótima
< 0,3	Reator em subcarga

Fonte: Adaptado de (MÉZES; TAMAS; BORBELY, 2011).

2.7 BIODIGESTORES

Biodigestor é o nome dado a uma estrutura construída para reproduzir as condições ambientais favoráveis, e assim, estimular a decomposição da matéria orgânica, através o processo bioquímico conhecido como digestão anaeróbia (DA). Dentro de um biodigestor, determinados tipos de resíduos orgânicos se tornam matéria prima para o processo, em que estes materiais são submetidos à ação de microrganismos, responsáveis por os degradarem biologicamente. Como resultado deste processo são gerados dois produtos: o biogás e digestado.

2.7.1 Origem e difusão

Não é possível identificar com precisão quando o homem começou a se beneficiar do biogás. Por ser um processo natural, uso de biodigestores apresenta uma longa história. Os países asiáticos têm uma extensa tradição no uso de biodigestores. A relatos na antiga literatura chinesa do uso de tanques de esgoto cobertos construídos para produção de biogás a mais de dois mil anos atrás. Na Europa, o biogás proveniente das galerias de esgoto era usado para iluminação públicas desde 1895, e especialmente durante a época da Segunda Guerra Mundial foi utilizado como fonte energética (LEBUHN; MUNK; EFFENBERGER, 2014).

Os primeiros biodigestores descritos pela literatura foram projetados na província chinesa de Cantão (*Guangdong*), por volta de década de 1920 (NIANGUO, 1984), mas, sabe-se que o domínio da biodigestão é uma técnica difundida no continente asiático já há muito mais tempo. O uso de Biodigestores em pequena e média escala é uma técnica difundida ao redor do mundo. Teve origem particularmente em zonas rurais de países asiáticos como China (CHEN et al., 2014), Índia (SINGH; SOOCH, 2004), Nepal (PEDER; ARALDSEN, 2016) Bangladesh (KHAN et al., 2014) e Vietnam (AN; PRESTON; DOLBERG, 1997) entre outros. Mais de 40 milhões de biodigestores domésticos foram instalados na China (WANG et al., 2020). Na África o biogás também é bastante explorado, mais de 50 mil biodigestores foram instalados no continente até o ano de 2009 (GHIMIRE, 2013). Atualmente a tecnologia de geração de biogás já está sendo utilizada também em grande escala. Por exemplo, na Alemanha, mais que 9200 usinas de biogás já instaladas, totalizando uma capacidade elétrica de 4,3 GW (PROBIOGÁS, 2010).

Na América latina, o desenvolvimento de biodigestores começou a ser estimulada a partir do anos 70 durante a crise mundial do petróleo (GARFÍ et al., 2016) . No entanto o número de plantas ainda é pouco quando comparados com a Ásia. Em 2007 foi criada a Rede de Biodigestores Para América Latina e Caribe (RedBioLAC) com o princípio de reunir instituições relacionadas à pesquisa aplicada e à disseminação do uso da digestão anaeróbia no tratamento dos resíduos e aproveitamento energético.

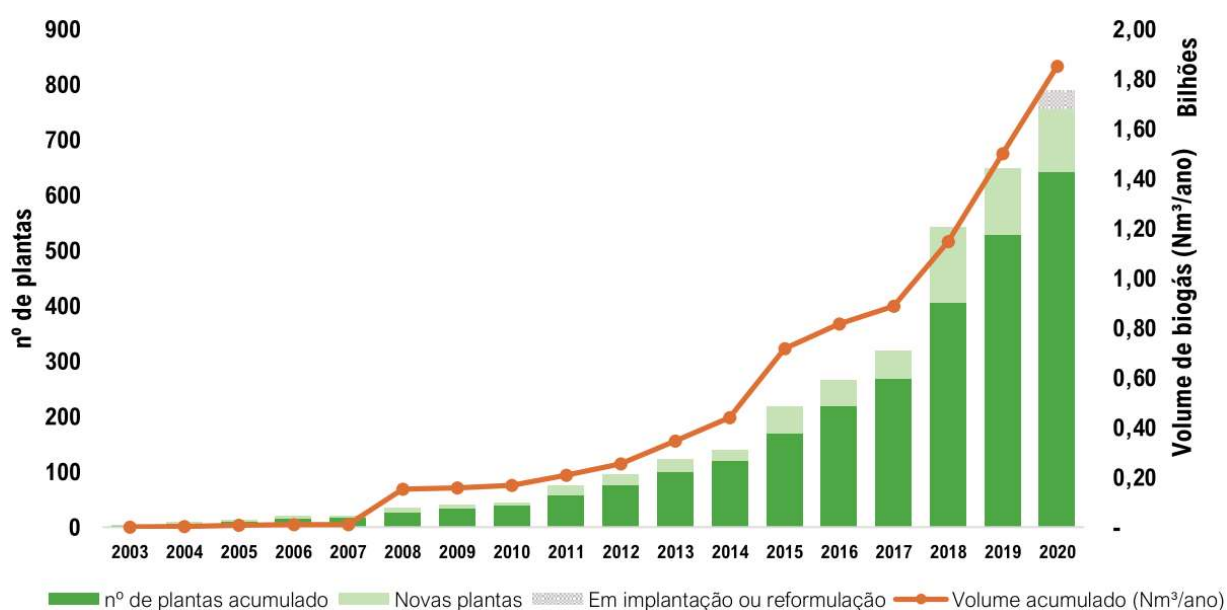
2.7.2 Biogás no Brasil

Em 1979 foi instalado um dos primeiros biodigestores no país, um modelo cúpula-fixa na casa de campo oficial da Presidência da República, a Granja do Torto em Brasília (PALHARES, 2007). Através do Programa de Mobilização Energética (PME) em 1982, a tecnologia começou a ser incentivada e mais biodigestores foram construídos. No entanto a implantação da tecnologia teve dificuldades de ser concretizada, principalmente devido a falta de capacitação dos usuários, fazendo com que tecnologia caísse em descrédito no meio rural. Segundo Andrade *et al.*, (2002) o PME não atingiu os objetivos sob alegação da falta de conhecimento técnico sobre a construção e operação dos biodigestores, além do alto custo de implementação e manutenção dos equipamentos para conversão do gás em energia elétrica.

A tecnologia apenas começou a se popularizar nos anos 2000, com a intensificação com a preocupação ambiental, como alternativa para redução das emissões dos GEE incentivado pelo mercado de Créditos de Carbono, através de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Em 2017 foi criado no Brasil a Política Nacional de Biocombustíveis, denominado RenovaBio, que estabeleceu novas regras para o mercado de descarbonização (ANP, 2020).

A expansão da busca por fontes renováveis de energia, resultante da necessidade de descarbonização da matriz energética, tem provocado significativo crescimento no número de biodigestores nos últimos anos. Segundo dados levantados pelo CIBiogás, considerando apenas plantas de biogás com fins energéticos, de 2015 á 2019 o crescimento médio do número de unidades instaladas foi de 20% ao ano. De 2019 a 2020, o índice de crescimento foi ainda maior, atingindo 23% (CIBIOGAS, 2021).

Figura 5 - Crescimento ao longo do tempo do número de plantas de biogás instaladas e volume de biogás.



Fonte: (CIBIOGAS, 2021).

2.7.3 Materiais utilizados na construção

Ao longo do tempo, diferentes tipos de materiais têm sido usados para a construção de biodigestores. Os primeiros modelos desenvolvidos eram construídos em alvenaria, as vezes chapas metálicas. Com os avanços tecnológicos e o surgimento de novos tipos de materiais com propriedades melhoradas e com custos reduzidos, como a fibra de vidro e as lonas plásticas, começaram também a serem utilizados (OBILEKE; ONYEAKA; NWOKOLO, 2021). A introdução de novos materiais, permitiu o desenvolvimento de novos modelos de biodigestores feitos com materiais flexíveis, e posteriormente os reatores tecnologicamente mais avançados com sistemas de controle de parâmetros importantes para o desenvolvimento dos microrganismos.

O surgimento de novos materiais e novas tecnologias vem resultando em processos mais eficientes, assim mais atraentes como investimento. Experimentos devem ser realizados para identificar materiais alternativos e mais baratos. No entanto, é preciso considerar sempre a resistência e durabilidade. O conhecimento das especificações dos materiais utilizados torna-se imprescindível para escolha de qual modelo adequado para cada situação. A durabilidade e o custo de um biodigestor estão diretamente ligados aos materiais utilizados, por isso, é preciso sempre analisar qual a melhor opção para cada caso. Considerando a disponibilidade de material, o custo, e a facilidade de operação.

2.7.4 Modelos existentes

Existem no mundo, distintos tipos de biodigestores, desenvolvidos com diferentes níveis de tecnologias e escalas aplicadas. Cada modelo, é adequado as condições climáticas e socioeconômicas específicas das regiões onde foram criados. As tecnologias aplicadas dependem de características técnicas específicas para de cada caso, principalmente a qualidade da matéria prima, a disponibilidade dela e a temperatura do processo. Outro fundamento que diferencia os modelos existentes, é o fluxo com que o reator pode ser operado. Pode-se classificar em três tipos: descontínuo (batelada), fluxo contínuo e semi-contínuo (GTZ, 1999).

Tabela 5 - Características operacionais dos biodigestores.

<i>Características</i>	<i>Variantes</i>
<i>Teor de sólidos do substrato</i>	• Digestão úmida • Digestão seca (>20%)
<i>Fluxo de alimentação</i>	• Contínuo • Semi-contínuo • Descontínuo
<i>Temperatura do processo</i>	• Termofílica • Mesofílica • Psicrofílica

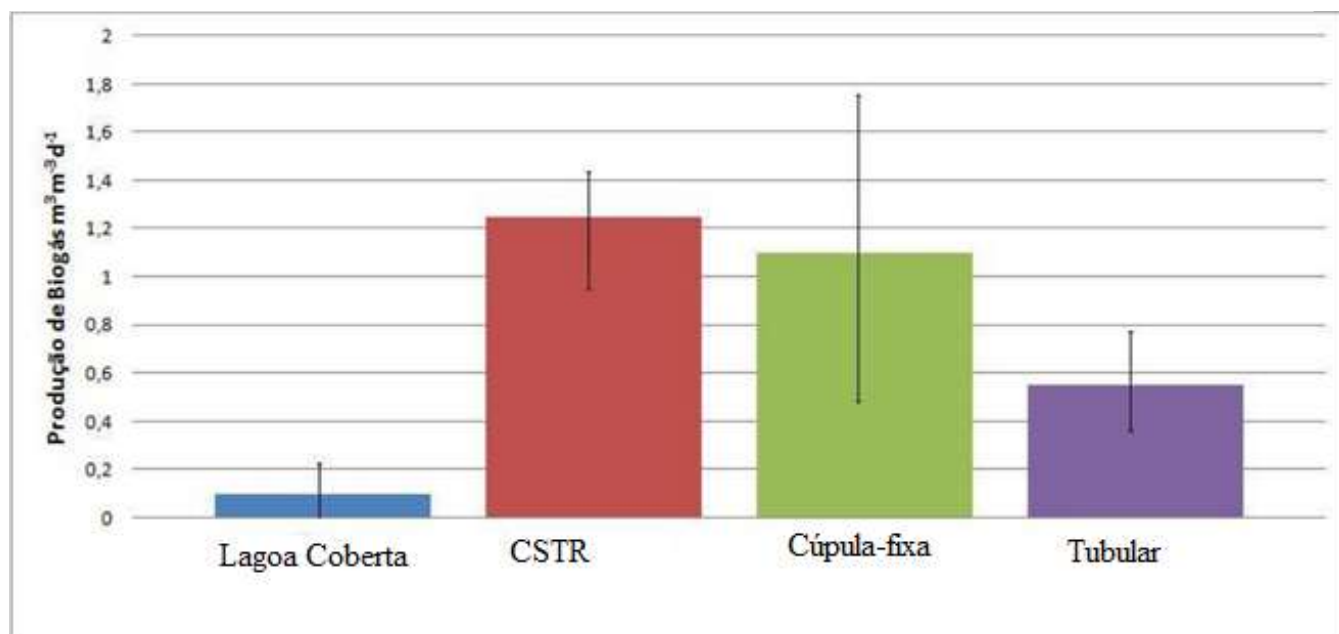
- Mecânico
- Hidráulico
- Pneumático

Opções de fluxo semi-contínuo e contínuos, são mais apropriados a realidade rural, pois podem ser alimentados frequentemente conforme a oferta de geração dos resíduos. Deste modo, a produção de biogás e biofertilizante acontecem continuamente conforme o biodigestor for alimentado.

A seguir serão descritos os principais modelos de biodigestores encontrados na literatura, e tradicionalmente aplicados no tratamento de resíduos orgânicos. Os modelos de biodigestores mais consagrados para aplicações rurais são os do tipo Cúpula-fixa e Cúpula-flutuante, assim como, os biodigestores de lona (tipo Tubular ou de Lagoa Coberta). Também o digestor apropriado para aplicações agroindustriais, tipo Tanque de Agitação Contínua (CSTR). Todos os modelos estão sujeitos aos mesmos princípios que envolvem a DA, porém devido a variação das tecnologias aplicadas, cada modelo possui capacidades diferentes de produção de biogás.

A figura 6 representa o gráfico com a capacidade de produção de biogás por quatro tipos de biodigestores comumente utilizados no meio rural. A barra de erros representa os intervalos dos valores reportados.

Figura 6 – Gráfico comparativo entre a capacidade de produção de diferentes modelos de biodigestores.



Fonte: Adaptado de (CANTRELL et al., 2008).

Além destes modelos de digestores citados existem mais, quais – entre outras – por causa da sua aptidão tecnológica, complexidade e custos envolvidos não foram vistos apto para o uso na AF, como, por exemplo, reatores tipo processo anaeróbio de reatores de manta de lodo (*UpFlow Anaerobic Sludge Blanket – UASB*) e reatores de fermentação a seca.

2.7.4.1 Biodigestores de cúpulas

Os sistemas tradicionalmente mais aplicados em países em desenvolvimento são aqueles conhecidos por biodigestores do tipo “chinês” (Cúpula-fixa) e do tipo “indiano” (Cúpula móvel). Ambos são modelos simples, construídos escavados no solo, geralmente são feitos de alvenaria, e formados principalmente por caixas de entrada e saída de biomassa, além de um compartimento central, onde o substrato fica confinado e DA acontece naturalmente, e biogás se acumula na cúpula, parte superior do digestor.

Na China, devido à numerosa população e à alta demanda pela produção de alimentos, o desenvolvimento do biodigestor foi focado na produção de fertilizantes, enquanto que, na Índia, os biodigestores são mais utilizados para geração de biogás (RODRIGUES; BLANS; SCLINDWEIN, 2019). Estes modelos são comumente aplicados em assentamentos rurais e pequenas propriedades.

A concentração de sólidos nos substratos adequados para digestores desta categoria varia entre 5% e 10%. Segundo Rajendran, Aslanzadeh e Taherzadeh (2012) caso o aumento da concentração de sólidos vá para 19%, diminui-se consideravelmente a produção de biogás. Os autores afirmam ainda que a carga orgânica volumétrica COV para estes modelos varia entre 2 e 3 $\text{kg}_{\text{SV}} \text{ m}^{-3} \text{ reator d}^{-1}$ sob condições mesófilas, e que a produção média de biogás varia de 0,26 a 0,55 $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{SV}}/\text{dia}$ (RAJENDRAN; ASLANZADEH; TAHERZADEH, 2012).

2.7.4.1.1 Cúpula-fixa

O biodigestor tipo “chinês”, (ver figura 6) se caracteriza principalmente por possuir na parte superior do reator uma cobertura feita em alvenaria, onde o biogás produzido é acumulado. O gás que se acumula entre o nível do substrato interno do digestor e a cobertura rígida cria a compressão necessária para provocar a saída da biomassa e a liberação do biogás.

Figura 7 - Biodigestor tipo “Chinês” com cúpula fixa.



Fonte: Biogás Nokan Ind. 2012, *apud* Zang *et al.*, 2021 (ZANG *et al.*, 2021).

2.7.4.1.2 Cúpula-flutuante

Já o modelo de cúpula-flutuante (tipo “Indiano”, ver figura 7) utiliza uma cobertura móvel, construída como um tambor invertido, geralmente feito de metal, e que tem a capacidade de se movimentar para cima e para baixo, de acordo com a quantidade de gás acumulado. O peso deste tambor invertido aplica a pressão necessária para proporcionar o fluxo de gás através da tubulação até a saída para utilização.

Figura 8 - Biodigestor tipo “Indiano”.



Fonte: (BARICHELLO, 2010).

2.7.4.1.3 Modelo Sertanejo

O biodigestor Sertanejo é uma adaptação brasileira do modelo Indiano, ambos podem ser chamados tecnicamente de modelos de cúpula flutuante. Esses são caracterizados por terem como mecanismos de retenção do biogás um compartimento que se movimenta verticalmente de acordo com a produção do biogás. O peso desse compartimento móvel é responsável por manter a pressão, podendo ser acrescentado peso adicional na forma de areia segurado por um anel de zinco. É chamado de Sertanejo por ser comumente aplicado entre comunidades rurais do interior do Brasil. Esse modelo foi projetado para ser construído utilizando materiais acessíveis e de baixo custo e que podem ser encontrados facilmente em qualquer loja de materiais de construção (SALZER et al., 2017).

A Diaconia, uma organização não governamental (ONG), desenvolveu um grande projeto de assessoria técnica e extensão rural, em que, durante a última década, implantou cerca de 700 unidades de biodigestores sertanejos em áreas rurais, especialmente na região do semiárido brasileiro (OLIVEIRA et al., 2019).

Segundo Barros (BARROS et al., 2020), a difusão da tecnologia social do biodigestor Sertanejo tem mudado a vida de inúmeras famílias no semiárido cearense, garantindo-lhes energia, ao mesmo tempo em que garante um compromisso com a agricultura sustentável.

Figura 9 - Biodigestor “Sertanejo” com cúpula flutuante de fibra, Itaberaí - GO.



Fonte: (ZANG et al., 2021).

2.7.4.2 Biodigestores de Lona

As membranas plásticas tem sido amplamente utilizadas no desenvolvimento de biodigestores em substituição às cúpulas mencionadas nos modelos anteriores. A introdução deste tipo de material está associada ao menor custo de implementação, a redução de mão-de-obra, bem como vazamentos comuns nos modelos construídos em outros materiais tradicionais. Os materiais plásticos utilizados na construção de biodigestores são caracterizados por serem material isolante, não corrosivo, bom, mais barato, fácil de fabricar e pouca manutenção. (SHARMA; KAR, 2015). Devido a essas especificações, projetos utilizando lonas plásticas geralmente são aptos para aplicações em grande escala.

Diferentes tipos de materiais poliméricos têm sido usados na fabricação de digestores, entre eles, polietileno (PE), polietileno de alta densidade (PEAD), poli cloreto de vinil (PVC) e muitos outros (OBILEKE; ONYEAKA; NWOKOLO, 2021).

2.7.4.3 Lagoa Coberta (BLC)

O BLC é um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material polimérico (PVC, PEAD, etc.) caracterizado pela baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. Sua geometria de base retangular de seção trapezoidal com inclinação do talude variável de acordo com as características do solo (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019) (ver figura 10).

Este modelo é adequado para o tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos (até 3%) e alta carga orgânica, como, por exemplo, resíduo suíno e vacas leiteiras. Também é chamado “*digestor canadense*” ou “*Lagoa Coberta de Fluxo Ascendente*” (ZANG *et al.*, 2021). Podem ser construídos em diferentes tamanhos, começando com volume útil de poucos até milhares metros cúbicos, dependendo da quantidade e composição dos efluentes. Tradicionalmente, o nível tecnológico aplicado neste tipo de digestores é baixo a intermediário. Geralmente o único controle do processo é dado pela variação da quantidade diária de entrada do substrato, que causa a saída da mesma quantidade de digestado. Neste modelo, o substrato está sujeito a pouca homogeneização, ocasionando uma baixa eficiência. O BLC geralmente é utilizado para tratamento de efluentes com baixa concentração de sólidos, até 3%, e a carga orgânica que pode receber é baixa, variando entre 0,3 a 0,5 $\text{kg}_{\text{SV}} \text{m}^{-3} \text{reator} \text{d}^{-1}$. A produtividade de biogás por volume de reator deste está entre 0,03 e 0,05 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \text{reator} \cdot \text{d}^{-1}$ (CANTRELL *et al.*, 2008). Esses parâmetros criam a necessidade do sistema operar com o elevado TRH, o que aumenta o requisito de área para instalação, ou até mesmo biodigestores serem feitos em series e seguidos de pós tratamento do digestado.

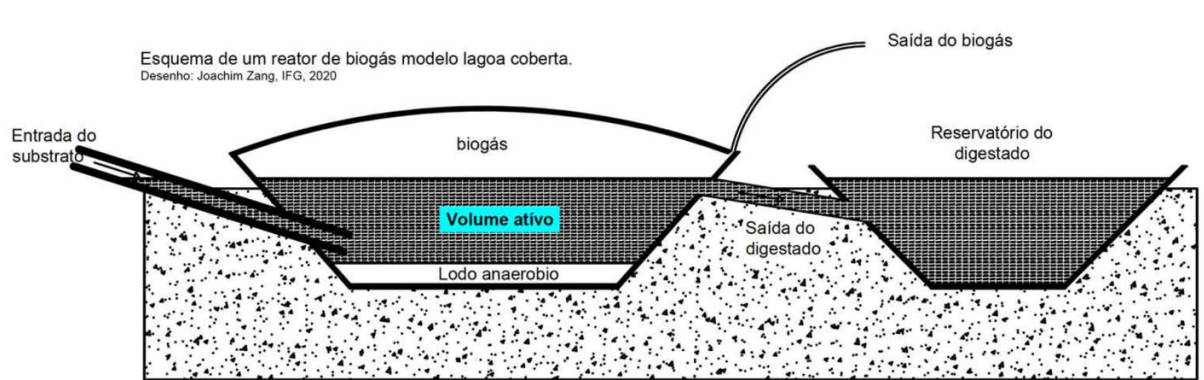
Atualmente, novas tecnologias já surgiram contribuindo para o desenvolvimento de modelos de BLC avançados, feitos também em formato circular, favorecendo a homogeneização do substrato e a implementação de sistemas de controle de temperatura e de agitação, como demonstrado na figura. 9.

Figura 10 - Reator BLC em formato circular e agitador mecânico em Entre Rios do Oeste – PR – Brasil.



Fonte: O autor (2020).

Figura 11 - Esquema de um reator de lagoa coberta.



Fonte: (ZANG et al., 2021).

Figura 12 – Série de biodigestores tipo lagoa coberta para tratamento de efluentes suínos, 500 KWel.



Fonte: AUMA Energia, Patos de Minas, MG, Brasil (2021).

2.7.4.4 Tubular:

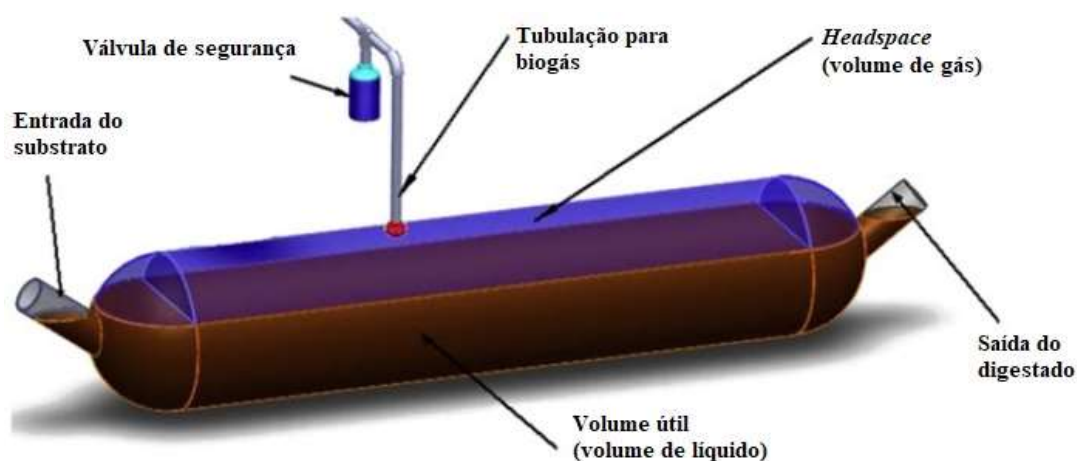
Biodigestores tubulares, assim como o modelo de Lagoa Coberta, são reconhecidos pelo formato comprido e na horizontal. Ambos os modelos possuem funcionamento e eficiência semelhantes, caracterizados pelo movimento interno longitudinal do substrato, proporcionando baixa mistura e pouca eficiência. Por isso, esse modelo de biodigestor também é chamado de reator de fluxo pistonado, ou, em inglês, de *Plug-flow*.

Confeccionado em integralmente lona plástica flexível, geralmente PVC ou PEAD; possuem o corpo cilíndrico, se apresentam como um balão inflado e meio enterrado. Também de origem asiática; foram desenvolvidos no final dos anos 80 em Taiwan (POUND, 1981). Posteriormente, muitos reatores desse modelo foram implementados em comunidades rurais da América Latina principalmente na agricultura familiar.

O modelo tubular tem vantagens em implantações de média e pequena escala, devido ao seu baixo custo de implantação e à sua facilidade de construção e operação (ALCÂNTRARA, 2019). Quanto mais resistente for a lona utilizada mais longa será a durabilidade do digestor.

Sob condições psicofílicas, digestores tubulares precisam ser adaptados com mecanismos de isolamento, estufa e paredes de proteção, contribuindo com inércia térmica do biodigestor, possibilitando, desta maneira, sua instalação em todas as zonas, seja tropical ou temperada (GARFÍ et al., 2011).

Figura 13 - Esquema de um digestor tubular.



Fonte: (FERRER et al., 2011)– traduzido e adaptado.

Figura 14 - Biodigestor tubular em Equador.



Fonte: (MARTÍ HERRERO, 2019).

2.7.4.5 Reator Tanque de Agitação Contínua (CSTR)

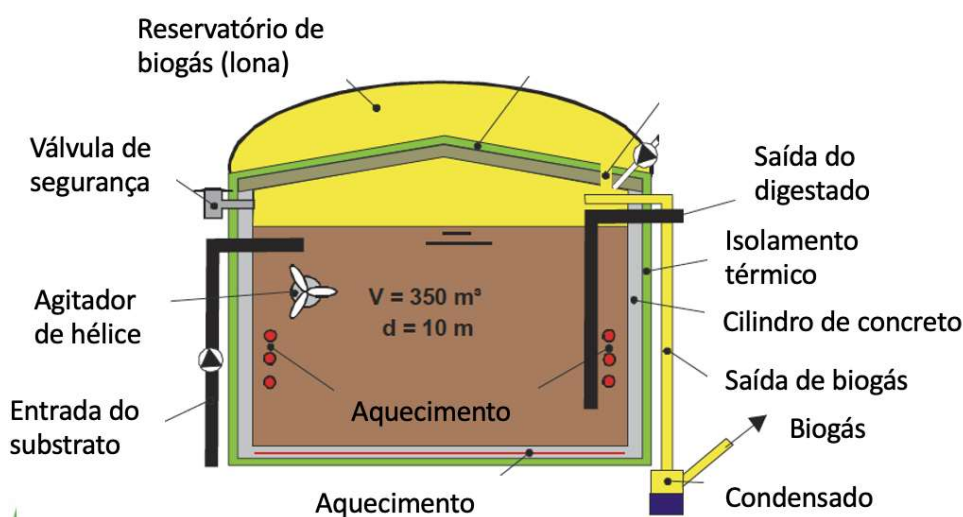
A sigla CSTR vem do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor* (Reator de Tanque Agitado Continuamente). Caracterizado pela constante homogeneização do substrato no seu interior, graças à

presença de sistema de agitação, também pode ser chamado de Reator de Mistura Completa. Esse é um biodigestor moderno de alto desempenho, incorporando tecnologias avançadas de automação de sistemas, que possibilitam o controle de parâmetros importantes, e oferece boas condições e estabilidade aos microrganismos. Esse modelo de biodigestor suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas (1 a 4 kg_{SV} m⁻³ d⁻¹). As concentrações de sólidos podem chegar às 15%.

Os CSTR é a configuração de biodigestor mais utilizada em plantas industriais de biogás, representando aproximadamente 90% dos reatores erguidos na Europa (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

A complexidade tecnológica é média a alta, implicando em elevados os custos de instalação geralmente. Na figura 14 são mostrados os principais componentes de um reator CSTR, a figuras 15 mostra exemplos de digestores CSTR.

Figura 15 - Esquema de um biodigestor CSTR (tipo “Alemão”).



Fonte: *Biogashandbuch Bayern*, 2007, modificado e traduzido.

O uso de sistema de aquecimento possibilita a manutenção da temperatura interna, colabora com o desenvolvimento e estabilização das populações de microrganismos, garantindo assim uma maior capacidade de produção de biogás.

Figura 16 - Biodigestores industriais de cúpula flexível. Biorreatores tipo "CSTR".



Fonte: DBFZ (Centro Alemão de Pesquisa em Biomassa), Leipzig, Alemanha. 2018.
(Fonte: Zang *et al.*, 2021).

2.7.4.6 Reatores de manta de lodo (UASB)

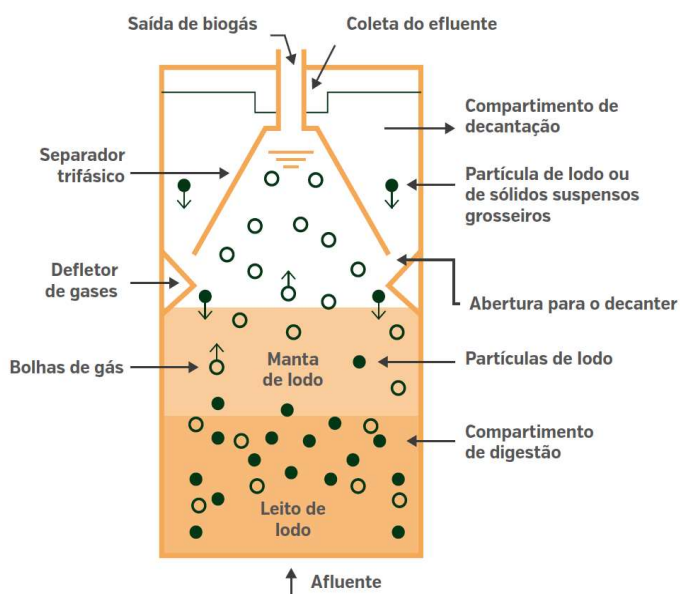
Os reatores Reator UASB (*UpFlow Anaerobic Sludge Blanket* - processo anaeróbio de reatores de manta de lodo) servem para tratamento de efluentes com alto teor de matéria orgânica e matéria seca total de até 3%. Esse tipo de resíduos (efluentes) são encontrados no âmbito da agricultura familiar ou em cooperativas na criação de suínos em média e grande escala.

Figura 17 - Reator industrial UASB - Tratamento de efluentes, Kraft/Heinz, Neropolis - GO.



Foto: Zang, (2015).

Figura 18 - Desenho esquemático de um reator tipo UASB BI-OPAQ®, Tipo "Holandês".

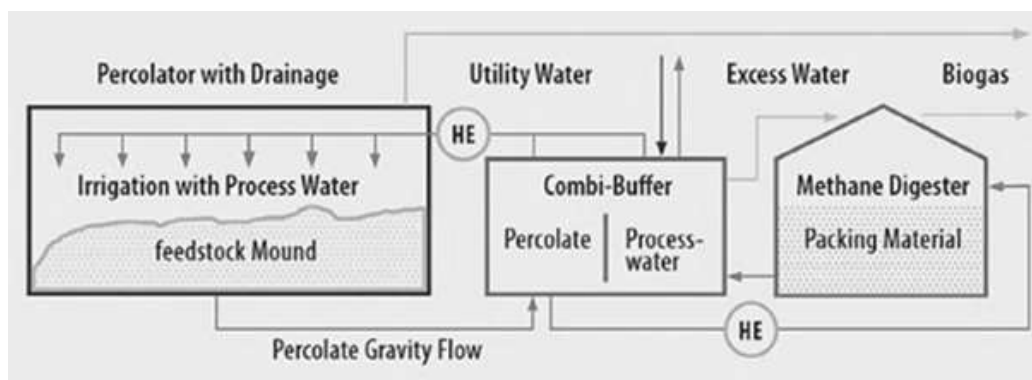


Fonte: (BRASIL, 2015).

2.7.4.7 Reator de fermentação a seca

Este é um biodigestor de tipo descontínuo, também chamado de biodigestor de batelada. Neste modelo de reator, o material orgânico a ser digerido fica reservado, geralmente em *containers* vedados (gás e líquido), que possuem mecanismos de recirculação do chorume, estimulando a produção contínua de biogás. Depois de determinado tempo, abre-se o *container* para a retirada do substrato, e para que uma nova biomassa seja adicionada. Este modelo de biodigestor é geralmente utilizado em grandes aterros sanitários, para promover a redução do volume da parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Estes são digestores modernos, com alto custo de implantação e operação, e, por esse motivo, este modelo não é apropriado para a AF (Figura 4).

Figura 19 - Esquema de um biodigestor modelo Batelada.



Fonte: (QIAN *et al.*, 2016).

Figura 20: Reatores de fermentação a seca tipo “contêiner” com digestado Braunau, Áustria.



Foto: Zang, Joachim, 2017

2.7.5 Periféricos

2.7.5.1.1 Reservatórios de biogás

Para biodigestores com fins de aproveitamento energético, os reservatórios de biogás são componentes importantes quando se objetiva um fornecimento constante do biocombustível (BRASIL, 2015). São utilizados como alternativa para amortecer as variações na produção, e assim equalizar o fornecimento diário de biogás. Quanto maior for o reservatório, menos energia será perdida se não houver consumo total do biogás produzido, evitando que seja queimado no “*flare*” ou lançado na atmosfera.

Uma grande vantagem da bioenergia perante outras fontes de energia renováveis como eólica e solar, é a possibilidade de armazenamento. Por isso, o biogás é considerado uma forma despachável energia, essa propriedade possibilita ser utilizada em horários de maior interesse econômico, ou utilizada como fonte complementar à outras fontes intermitentes.

Porém, reservatórios de biogás são caros e tem seus limites, a princípio, não podem ser muito grandes. Para biodigestores rurais, os reservatórios de biogás são geralmente pequenos. Frequentemente é recomendado um reservatório com a capacidade de absorver a quantidade de um dia de produção do biodigestor, e assim evitar problemas com o fornecimento. (DEUBELIN; STEINHAUSER, 2008).

Por questões de segurança, reservatórios de biogás devem sempre ser rigorosamente instalados e operados de forma a garantir a manutenção preventiva e evitar acidentes. Existem diferentes tecnologias para armazenagem do biogás, variando conforme a pressão, tamanho e design.

Para biodigestores de pequena e média escala, o mais utilizado é são os reservatórios de baixa pressão. É recomendada até $<0,1$ bar. Estes reservatórios chamados de “*Gas Bags*” são feitos com lonas plásticas, em membrana duplas, como as usadas nos próprios biodigestores.

Figura 20 - Reservatório tipo “Gas bag” no Projeto Entre Rios do Oeste - Paraná.



Fonte: O autor (2020).

2.7.5.1.2 *Flare*

Em situações que a produção de biogás é maior do que o consumo e não há possibilidade armazenamento, é utilizado um mecanismo de segurança chamado “*Flare*”, ou Queimador, responsável por consumir o biogás excedente, evitando que seja lançado diretamente na atmosfera (SEADI et al., 2008).

Figura 21 - Queimador de biogás em uma Granja de Suínos em Campo Verde – MT.



Foto: O autor (2018).

2.7.5.1.3 Tratamento do biogás

O aproveitamento energético do biogás pode ser feito através diferentes níveis de tecnologias. A maneira mais eficiente de se aproveitar a energia química contida no biogás, é através da queima direta. Para usar o biogás como fonte de calor, como substituto ao gás de cozinha ou outra demanda calorífica existente em uma propriedade rural, faz se necessário apenas retirar a umidade contida no gás pois ela afeta diretamente o seu poder calorífico.

Em pequenos reatores esse processo pode ser feito com o simples uso de drenos nas partes mais baixas da tubulação de biogás, onde a água condensada se acumula. Para sistemas de maior porte, as técnicas mais utilizadas são a separação física da água (adsorção, absorção, refrigeração e condensação) e secagem química (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Para uso mais elaborados do biogás, como o uso em motores a combustão interna, seja para geração de energia elétrica, ou bombeamento por exemplo do próprio biofertilizante, faz se necessário o uso de mecanismos de filtragem (ver figura 22). A filtragem do biogás reduz o volume e aumenta concentração de metano, elevando assim o seu potencial energético. Os sistemas de filtragem concentram o metano presente no biogás, transformando-o em um combustível com maior valor energético e pureza, chamado de biometano semelhante ao gás natural.

Outro objetivo principal da filtragem é remover o gás sulfídrico que mesmo em baixa concentração, é responsável por causar corrosão e deterioração da infraestrutura (GARCIA-ARRIAGA et al., 2010). Dependendo da composição do substrato utilizado na DA, o biogás bruto produzido, pode conter concentrações de H_2S variando entre 100 e 10.000 ppm ($mg.m^{-3}$) e, em casos extremos, até 30.000 (BEIL; BEYRICH, 2013).

Existem várias alternativas para redução de H_2S , uma frequentemente usada é a injeção de ar, ou oxigênio puro dentro da parte gasosa do biodigestor. Na presença de oxigênio o processo de dessulfurização é estimulado pelo o crescimento de bactérias que oxidam o H_2S (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Para remoção do H_2S fora do biodigestor utiliza se reatores na forma de colunas contendo material adsorventes, entre eles o carvão ativado e o óxido de ferro são os mais utilizados (ABATZOGLOU; BOIVIN, 2008).

Figura 22 - Equipamento industrial para purificação parcial de biogás (H_2O e H_2S) em Entre Rios do Oeste - PR.



Fonte: O autor (2020).

Uma alternativa é conhecida como “*iron sponge*”, ou esponja de ferro em português. Se baseia em utilizar uma base sólida, no caso a palha de aço em um filtro/reator para promover a oxidação do H_2S . Esta é uma técnica simples e eficiente para pequenos biodigestores, dependendo de qual uso for destinado o biogás.

2.7.5.1.4 Motores a combustão

O biogás depois de filtrado, pode ser utilizado como biocombustível em motores a combustão adaptados com a finalidade de gerar energia elétrica. A energia produzida pode ser aproveitada na propriedade ou, dependendo da escala do projeto, injetada na rede na modalidade de “Geração Distribuída”.

Figura 23 - Motogerador utilizado na geração distribuída de energia em uma agroindústria em Bela Vista – Goiás.



Fonte: O autor (2021).

O biogás também pode ser aproveitado na forma de energia mecânica, com uso de motobombas, e usado para bombeamento do biofertilizante em sistemas de irrigação de pastagens e outras culturas, representando grande vantagem ao produtor rural.

Figura 24 - Motobomba para aplicação do biofertilizante em uma granja de suínos em Campo Verde – MT.



Fonte: O autor (2019).

2.7.6 Procedimentos de Segurança

A operação e manuseio de biodigestores envolve uma diversidade de perigos ocupacionais, ambientais e também relativos a efetividade do processo. A mistura gasosa que compões o biogás, além da inflamabilidade, apresenta propriedades asfixiantes, corrosivas e tóxicas. Cuidados básicos como a delimitação da área ao redor dos biodigestores, sinalização de perigo, avisos para não fumar e evitar outras fontes de ignição, são importantes para evitar acidentes até mesmos com risco de vida. Distâncias mínimas entre os reservatórios e queimadores de gás deve sem respeitadas, assim como de qualquer outro edifício.

Outros riscos relacionados a manipulação dos substratos são de ordem biológicas e sanitárias. É recomendado o uso de equipamentos de proteção individual.

O monitoramento periódico é importante para avaliar se existem vazamentos. Uma maneira simples de verificação, é aplicar uma mistura de água e sabão nas partes do biodigestor, assim, a ocorrência de bolhas que indicará o vazamento de gás.

Para evitar problemas com excesso de pressão nos biodigestores, pode ser utilizado um sistema simples de escape de gás, tipo selo d'água no formato de "U", e preenchido com água agindo como selo hidráulico.

Figura 25 - Válvula para escape de gás e controle da pressão em um biodigestor tipo lagoa.



Fonte: O autor (2021).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

A partir de uma revisão realizada por meio da busca sistemática por publicações em bancos de dados livres da internet, como *Google Scholar*, e nas seguintes coleções: *Open File*, *Scielo*, *Scopus*, *Web of Science*, utilizando o portal de periódicos da CAPES/MEC, acesso via CAFE. O processo consiste em um conjunto de buscas utilizando palavras chaves relacionadas com o tema abordado, seguido da seleção dos trabalhos cujo o conteúdo fossem alinhados com o tema desta pesquisa, e a exclusão manual dos textos que estivessem fora do escopo proposto.

Utilizando a configuração de busca avançada, foram aplicadas as seguintes palavras chaves como termos de buscas “agricultura familiar, biodigestor, biogás e pequena escala” e “Family agriculture, biodigester, biogas small scale”.

Usou-se o software gratuito Mendeley Desktop da Elsevier para fazer o fichamento e gerenciamento das referências.

3.2 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE DIGESTORES NO BIOGASLAB IFG-UFG

Após a revisão bibliográfica sistemática e a análise dos modelos de digestores aptos para serem usados na agricultura familiar do Brasil, selecionado na base de facilidade de construção e uso, custos e potencial de geração de biogás a partir do resíduo com maior disponibilidade na agricultura familiar, o esterco de vaca.

Foram implementados três diferentes modelos de biodigestores de escala piloto: tubular, cúpula-flutuante e um reator tipo tanque de agitação contínuo (CSTR). A idealização dos biodigestores teve início com formação de um grupo de estudos interdisciplinar, constituído por estudantes e professores, envolvendo alunos de graduação e pós-graduação de ambas as instituições de ensino UFG e IFG, além do apoio de colaboradores externos.

Os croquis dos reatores pilotos foram primeiramente desenhados no computador, utilizando o programa AutoCad Educational software, pelo Professor Dr. Joachim Werner Zang, pesquisador líder do BiogasLab. Em seguida, os projetos foram executados com o apoio de pedreiro profissional.

Os reatores foram projetados com diferentes níveis de tecnologias, porém, sempre considerando alternativas de baixo custo, adequadas a realidade de pequenas propriedades ou cooperativas rurais. Os três digestores possuem dimensões semelhantes, aproximadamente entre 4 e 6 m³ de volume útil.

Através de reuniões periódicas, entre os integrantes do grupo de estudos, a construção foi avançando, sendo necessário ajustes constantes para resolver imprevistos que surgiram durante a implementação e operação dos biodigestores.

3.3 DESENVOLVIMENTO E INSTALAÇÃO DOS BIODIGESTORES

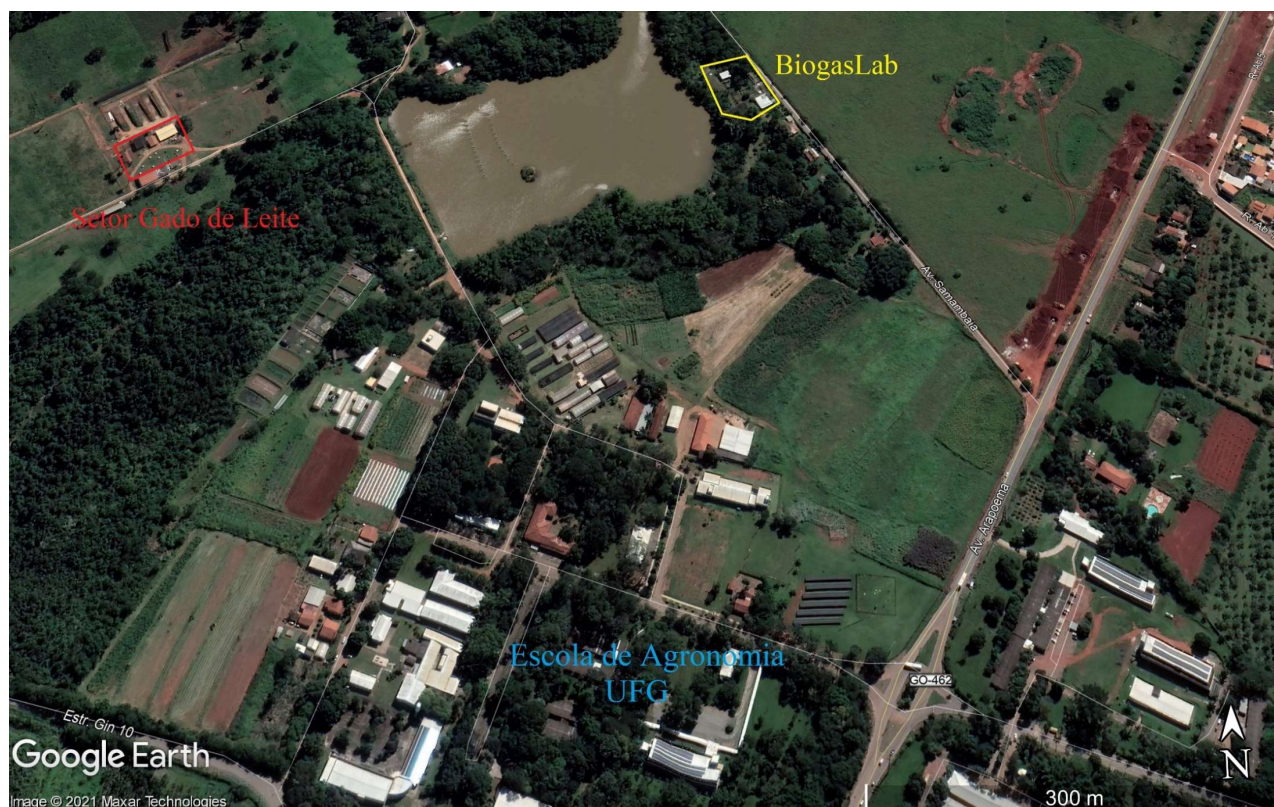
3.3.1 Local para implementação dos biodigestores

Como local para a instalação dos biodigestores pilotos foi selecionado o Espaço EDEM (Energia Desenvolvida em Equilíbrio com o Meio) da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia, capital do estado de Goiás, sob as coordenadas geográficas -16,593542° - 49,278138°, à altitude de 750 m acima do nível do mar. O local é um espaço tecnológico da Universidade dedicado ao estudo de plantas medicinais e energéticas, produção orgânica certificada e sustentabilidade.

O Laboratório de Biomassa e Biogás (BiogasLab) surgiu por meio de uma parceria entre a Universidade Federal de Goiás e o Instituto Federal de Goiás, com o apoio do CNPq, da FAPEG e do conselho Britânico (British Council) dentro dos projetos CVT-Apinajé, WWEF-Nexus e CarboxAiD.

No local existem diferentes tipos de resíduos orgânicos disponíveis e interessantes para a tecnologia de biogás numa distância de menos do que 1 km, bem como diferentes possibilidades de aplicação dos resíduos da digestão, como biofertilizante em diferentes culturas.

Figura 26 - Mapa da área de estudo.



Fonte: (GoogleEarth Pro, 2021) *Escola de Agronomia – UFG, Goiás*. Coordenadas -16.5935, -49.2785. Elevação 720 m. Disponível em: <https://goo.gl/maps/SmYnAmySfrWj47JK6>. Acesso: Julho 2021.

3.3.2 Matéria prima ou substrato

A disponibilidade da biomassa, utilizada como substrato para alimentação dos biodigestores, é proveniente da Fazenda Experimental da própria Universidade. Apesar de haver no local, outras fontes de resíduos orgânicos, optou-se em trabalhar somente com o estrume bovino, por se tratar de um material comum nas propriedades rurais.

A biomassa é coletada no Setor de Bovinocultura de Leite da Escola de Veterinária e Zootecnia da UFG, onde acontece diariamente o manejo de gado, durante as atividades de rotina no local. A biomassa disponível (estrume bovino) é oriunda do processo de ordenha das vacas em período de lactação, que ocorre duas vezes por dia, de manhã e de tarde. São 53 vacas com peso variando entre 350 a 750 kg por animal, com produção média de 500 l de leite por dia. Após os procedimentos de ordenha, as vacas ficam no curral enquanto recebem o respectivo tratamento e são alimentadas com ração concentrada de milho e silagem (durante o inverno).

Esse local foi escolhido como o fornecedor de biomassa devido à disponibilidade e à facilidade de coleta do estrume fresco. O espaço tem o piso impermeabilizado com cimento, desta forma é possível coletar o estrume bovino fresco e sem a presença de areia e outros sólidos inertes que podem prejudicar o funcionamento dos biodigestores. O curral possui um sistema de escoamento e armazenamento dos resíduos, chamado de esterqueira, que recebe o material junto com a água

proveniente da lavagem do ambiente. Na esterqueira, essa mistura já começa a sofrer a ação dos microrganismos e ocorre a decantação do material para posteriormente ser destinado ao campo, por técnica de fertirrigação. Na esterqueira, o material fica concentrado e disponível para recolhimento.

Figura 27 - Curral do Setor de Bovinocultura de Leite da EVZ/UFG.



Figura 28 - Coleta de biomassa proveniente da esterqueira



Fonte: O autor (2020).

O melhor horário para coleta da biomassa é logo após o encerramento das atividades de ordenha, quando a esterqueira está cheia com estrume fresco. A concentração do estrume fresco no reservatório é bastante variável, por isso, para garantir que o material esteja com a qualidade desejável é necessária uma prévia inspeção antes de coletar a matéria-prima. Deve-se levar em conta ocorrências indesejáveis, como a chuva nos períodos anteriores, assim como outros fatores externos que possam influenciar negativamente na qualidade da biomassa, podendo-se adiar a coleta de modo a garantir o mesmo padrão de condição da matéria-prima.

A coleta do estrume é feita de forma manual, utilizando uma pá para o enchimento dos tambores, que são transportados até o Biolabgas IFG-UFG, onde estão os biodigestores. São utilizados tambores de PEAD, de 50 litros, que possuem tampa com trava de segurança e alças laterais para facilitar sua manipulação. Cada tambor é enchido até pouco mais da metade da sua capacidade, em torno de 30 kg por tambor, para evitar derramamento e não ficar muito pesado para o manuseio.

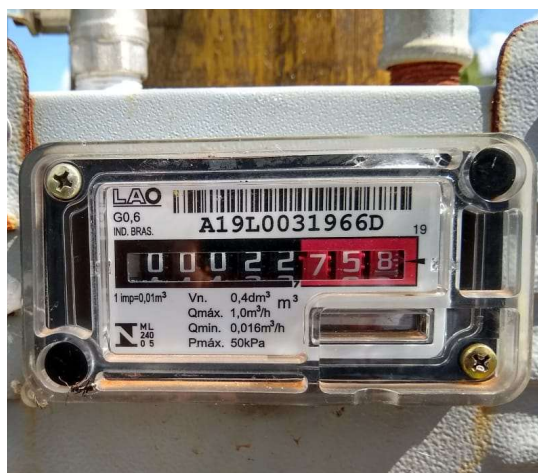
Os tambores com biomassa são pesados em uma balança, e o valor é anotado em uma Planilha de Controle de Dados. A distância do ponto de coleta da biomassa até os biodigestores é de aproximadamente 1 km. Para fazer o transporte do material de um ponto ao outro, faz-se necessário o uso de um veículo do tipo pick-up, disponibilizado pela UFG. Um carrinho manual também é utilizado para facilitar o transporte até a caixa de entrada e alimentação dos biodigestores.

3.3.3 Monitoramento dos biodigestores

Os biodigestores possuem na saída de gás torneiras comuns do tipo válvula esférica, que permitem o controle da vazão. Durante o manejo e a operação dos reatores, aproveita-se os intervalos entre o procedimento de alimentação frequente para abrir a saída de gás e assim liberar e contabilizar a quantidade de biogás armazenada antes da nova alimentação.

Medidores volumétricos independentes (Figura 29) implantados nas saídas de gás de cada digestor possibilitam a marcação da quantidade de gás acumulado em metros cúbicos. Os medidores de gás são do modelo LAO G 1.0 Predial, e possuem a capacidade de medição entre uma vazão máxima de 2,3 e uma mínima de 0,016 m³/hora para Gás Natural, equivalente ao biogás. Por isso, para garantir a medição, é necessário acumular a produção de gás nos biodigestores, mantendo sempre a torneira fechada. O volume de biogás tem de ser corrigido às condições pré-definidas de temperatura e pressão (273 K e 1013 hPa), o que permite a correta quantificação e posterior comparação de resultados (VDI, 2006 *apud* KUNZ, AMARAL, STEINMETZ, 2016).

Figura 29 - Medidor volumétrico de gás.



Fonte: O autor (2020).

O volume de biogás gerado, a concentração do gás metano (CH₄) e a quantidade de gás sulfídrico (H₂S), juntos com a quantidade e composição de substrato na entrada e na saída dos biodigestores, são os parâmetros importantes para verificar a qualidade do processo de DA e a eficiência dos reatores.

As análises da composição do biogás são realizadas utilizando o aparelho Optima7 (Figura 30), produzido pela empresa MRU GmbH/Alemanha. Neste instrumento, é possível fazer uma tomada de dados instantânea e obter as concentrações dos gases que compõem uma amostra do

biogás. Como medida de proteção do equipamento analisador, durante a medição foi instalado um sistema de segurança do tipo *trap* para remoção de umidade, constituído por um kitassato, preenchido com sílica-gel na saída de gás.

Figura 30 - Medição da composição do biogás no digestor Sertanejo (1) com analisador de biogás Optima7 (2) acoplado ao trap desumidificador (5).



Fonte: O autor (2020).

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Foram encontradas 180 publicações das quais 16 principais foram selecionados, entre revistas, cartilhas, dissertações, artigos e livros referentes a temática abordada na pesquisa. Para a seleção das publicações a serem utilizadas como base bibliográfica, no desenvolvimento dos biodigestores, foram selecionados preferencialmente trabalhos publicados em português, espanhol ou inglês.

Os modelos escolhidos como objetos de pesquisa foram os digestores Tubular, Cúpula-fixa e CSTR. Estes foram escolhidos para serem instalados no BiogasLab IFG-UFG devido apresentarem características favoráveis a serem aplicadas em propriedades rurais e da agricultura familiar. Os três modelos escolhidos apresentam níveis tecnológicos diferentes, e podem atender a variadas necessidades dos pequenos e médios produtores rurais. O aproveitamento do biogás pode ser, desde a simples produção para uso como substituto ao gás de cozinha, até projetos maiores com finalidade de geração de eletricidade.

Os parâmetros do processo, os substratos, o volume dos digestores, produção específica de biogás, a carga orgânica volumétrica (COV), o tempo de retenção (TRH), o volume de biogás gerado e o teor de metano foram extraídas das referências selecionadas e são mostradas na tabela 6.

Tabela 6 - Comparação dos parâmetros e resultados de diferentes digestores.

Ref.	Tipo	País	Temp.	substra- to(s)	volume útil [m ³]	COV ^{II} [kg _{SV} m ⁻³ . d ⁻¹]	TR ^{III} (dias)	vol. de bio- gás [m ³ dia ⁻¹]	produção espe- cífica de biogás m ³ /kg VS ^{IV}	Teor de CH ₄
A	Tub.	Bolívia	P	Bovino/ Roedor	4	0,3-0,5	80	0,9	0,15	-
B	Tub.	Rep. Domin.	M	Bovino	15	-	40	0,49	0,49	52-67
C	Tub.	Peru	P	Bovino	7,5	0,22	90	0,07	0,32	67
D	Tub.	Cuba	M	Suíno	12,3	1,17	15,9	0,28	0,28	NR
E	Tub.	Colômbia	M	Bovino	9,5	0,7	35	0,22	0,15	65
F	Tub.	Bolívia	P	Bovino	6,4	0,26	80	0,06	0,15	65
G	Tub.	Peru	P	Roedor	7,5	0,34	90	0,06	0,36	60
H	Flut.	Cuba	M	Bovino e Suíno	1,5	2	15-50	0,5	0,4	-
I	Flut.	Argentina	P	RSU	12	-	150	0,33	0,4	-
J	Fixo	Turquia	P	Bovino e Capri- no	12	0,38	45	0,49	0,35-0,5	65-70
K	Fixo	Índia	P	Bovino	2,4	<1	55	-	0,4-07	55-60
L	Tub.	Costa Rica	M	Bovino	25	0,4	39	0,2	0,32	62
M	Tub.	Costa Rica	M	Suíno	61	1	14	0,1	0,57	76
N	CST R	Bolívia	M	Bovino e Suíno	1,8 x 10 ⁻³	1,31	30	0,45	0,34	56
O	CST R	Brasil	M	Suíno	17 x 10 ⁻³	1,9	15	0,8	0,1	-
P	CST R	Finlândia	M	Suíno e Batata	5 x 10 ⁻³	2	15	-	0,33	-

A: Marti Herrero *et al.* (2014), B: Pound, Bordas e Preston (1981), C: Ferrer *et al.* (2011), D: Chao *et al.* (2008), E: Castro *et al.*, (2017), F: Marti-Herrero *et al.*, (2014b), G: Garfi *et al.*, (2011), H: Bernal *et al.* (2020), I: Giampaoli *et al.*, (2017), J: Taşdemiroğlu, (1988), K: Kalia e Kanwar (1998), L: Lansing *et al.*, (2008a), M :Lansing *et al.*, (2008b), Alvarez e Linden (2008), Lins (2017), Kaparaju e Rintala (2005).

Tub.: Digestor tubular, Flut.: Digestor de cúpula flutuante, Fixo: Digestor de cúpula fixa, CSTR: Digestor de mistura completa.

I: Faixa de temperatura do processo, sendo:

P: processo na faixa psicrófila com temperaturas <25 °C;

M: processo na faixa mesófila com temperatura na faixa entre 32 e 42 °C;

T: processo na faixa termófila com temperaturas na faixa entre 50 e 57 °C.

II: Carga orgânica volumétrica em quilogramas de sólidos voláteis per metro cúbico do reator por dia;

III: Tempo de retenção hidráulica;

IV: Sólidos voláteis

Marti-Herrero *et al.*, (2014) descreveram digestores tubulares de baixo custo feitos com material plástico normalmente utilizados estufas, com volume útil de 4 e 6 m³ para a digestão de estrume bovino e suíno. Estes foram implantados em comunidades tradicionais localizadas nos Andes bolivianos. Devido a altitude elevada e ao clima frio da região, os reatores sujeitos as condições psicrófilas, tiveram que projetados com alto TRH, entre 65 e 90 dias. Também foi construído uma cobertura como forma de isolante térmico para diminuir as variações de temperatura (MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2014).

Pound, Bordas e Preston (1981) caracterizaram a produção e funcionamento de um biodigestor tubular de 15 m³, alimentado com esterco bovino e com TRH de 40 dias, localizado na República Dominicana. Estimaram um custo de implantação em US\$ 890 e retorno do investimento em dois anos

e meio, com a produção média de 5 m³/dia de biogás, suficientes para 9 horas de queima em um fogão 3 bocas (POUND, 1981).

Ferrer *et al.*, (2011) compararam três digestores tubulares implantados em regiões de altitude, acima de 2800 m, localizados no Peru. Os autores investigaram os efeitos decorrentes das variações de temperatura do substrato e do ambiente na produção do biogás. Constataram que mesmo com alta amplitude da temperatura do ambiente (10-30°C), o substrato se manteve constante (entorno de 20°C) (FERRER *et al.*, 2011).

Chao *et al.*, (2008) estudaram o comportamento de um biodigestor tubular de 12,3 m³ para o tratamento de uma pequena granja suína em Cuba. Constataram a eficiência do tratamento similar à de um reator de cúpula-fixa, com 69% na remoção dos sólidos voláteis.

Castro *et al.*, (2017)) monitoraram um biodigestor tubular de 9,5 m³ alimentado com esterco bovino e TRH de 35 dias, localizado na Colômbia sob condições mesofílicas. No estudo verificaram a qualidade do digestado através de análises microbiológicas, evidenciando o potencial de uso agrícola do biodigestado como fertilizante. O processo de DA promoveu uma considerável redução na concentração de coliformes fecais e patógenos no substrato, porém o trabalho ainda mostra a necessidade de um pós-tratamento para o uso seguro como fertilizante.

Garfi *et al.*, (2011) acompanharam dois biodigestores tubulares de 10 m³ cada, sob condições psicofílicas, com TRH de 75 dias e COV de 0,6 kg de SV/m³. Sob condições climáticas de elevadas altitudes, eram utilizados por comunidade tradicionais das montanhas no Peru. O substrato utilizado foi esterco proveniente da criação roedores tipo porquinhos-da-índia e o biofertilizante foi testado na cultura da batata-doce. Foram comparados dois diferentes tipos de alojamento utilizado como proteção para digestor, tipo cabana e tipo estufa. A produção foi mais elevada na época seca, do que na temporada de chuvas, sempre com vantagens para cobertura do tipo estufa. A produção de batata-doce teve um aumento de 100% com o uso do digestado como biofertilizante.

Bernal *et al.*, (2020) avaliaram o potencial do biofertilizante produzidos em três diferentes modelos digestores (cúpula-fixa, flutuante e digestor tubular) alimentados com três diferentes tipos substratos (esterco suíno, bovino e misturados) localizados em comunidades rurais de Cuba. Os biofertilizantes. O melhor resultado quanto ao valor nutricional do biofertilizante foram obtidos da digestão do esterco suíno tratados do biodigestor de cúpula-fixa.

Giampaoli *et al.*, (2017) projetaram e executaram um biodigestor de cúpula-flutuante para ser usado no tratamento dos resíduos orgânicos proveniente do refeitório universitário na cidade de Santa Fé, Argentina. O reator com 12 m³ de volume interno recebe diariamente entorno de 40 kg de restos de alimentos e a produção de biogás foi estimada em 4 m³/dia (GIAMPAOLI *et al.*, 2017).

Em um levantamento sobre o uso de biogás na Turquia, o biodigestor tipo cúpula-flutuante foi o modelo mais aplicado em comunidades rurais. Um reator experimental de 12 m³ de volume foi ali-

mentado com uma mistura de esterco bovino e caprino e obteve-se uma produção aproximada de 6 m³ de bigas com a concentração de metano de 65 a 70% (TAŞDEMIROĞLU, 1988).

Kalia e Kanwar (1998) monitoraram por um período de 10 anos um biodigestor do tipo cúpula-fixa de aproximadamente 3 m³ instalados em na Índia em uma região de elevada altitude, alimentado diariamente com 20 kg de esterco bovino, com aproximadamente 55 de TRH. Devido ao clima temperado ao longo do ano, nos meses de março a outubro, houve maior produção de biogás devido as condições mesofílicas, enquanto no resto do ano houve queda na média da temperatura submetendo o digestor as condições psicofílicas provocando menor produção do biogás (KALIA; KANWAR, 1998).

Lansing *et al.*, (2008), avaliaram o funcionamento de dois biodigestores tubulares instalados em uma escola agrícola na Costa Rica, um alimentado com esterco bovino e outro com suíno. A produção de biogás somada de ambos os digestores foi de 33,5m³/dia, utilizado em um pequeno motor adaptado produzindo 2 horas de energia elétrica por dia, utilizado para suprir a demanda dos equipamentos utilizado no processamento de leite (LANSING *et al.*, 2008).

Alvarez e Lidén (2007) avaliaram o potencial da digestão anaeróbia em condições mesolíticas, utilizando diferentes combinações de substrato. Os experimentos foram feitos em escala de bancada, utilizando quatro reatores CSTR de 2 litros, alimentados semi continuamente a 35 °C. Foram avaliados os seguintes substratos: resíduos de frigorífico, esterco bovino e suíno, e resíduos de frutas e vegetais. Posteriormente, foram testadas dez composições de diferentes misturas. Em todos os casos, a codigestão foi melhor do que cada tipo de resíduo isolado. As taxas de produção de metano ficaram entre 0,27 e 0,35 m³ kg SV adicionado, e a concentração de metano variou entre 50 a 67%.

Lins (2017), demonstrou o efeito da progressão da COV sobre a geração e qualidade do biogás a partir de dejetos suínos nos seguintes tipos de biodigestores: CSTR, BLC e UASB. Para o biodigestor CSTR, foi utilizado um reator de 17 litros de volume útil a 37 °C, alimentado semi continuamente. A COV aplicada foi sendo aumentada gradativamente de 1 até 3 gramas de sólidos voláteis por dia. Os melhores resultados de teor de metano e produtividade de biogás foram com COV de 1,9 g SV adicionadas por Litros do reator por dia.

Kaparaju e Rintala (2005) também avaliaram um biodigestor tipo CSTR, alimentado por diferentes proporções entre resíduo de batata e esterco suíno. COV variou entre 2 e 3 kg SV m³ de reator por dia. O reator operou a 35 °C. A mistura 15 a 20% de resíduos de batata com esterco suíno mostrou ser bastante vantajosa quanto a geração de metano. Uma tonelada de resíduo de batata pode ser adicionada à 12 ou 13 m³ de esterco suíno e juntos produzir 328 m³ de metano.

O tamanho de digestores rurais pode variar dependendo das condições locais, da demanda por biogás e biofertilizante assim como da disponibilidade de água. Um reator comunitário (tipo chinês) construído para produzir biogás para atender de 10 a 20 casas, deve possuir um volume de 50m³ (GRUBER; HERZ, 1996).

Esperancini *et al.*, (2007) apontaram a viabilidade técnica e econômica na implantação de dois biodigestores cúpula flutuante em um assentamento rural no estado de São Paulo. Os custos financeiros para implantação, material e mão de obra foram apresentados totalizando o valor de R\$8.175 (equivalente 4.247 US \$, câmbio BCB, 30/6/2007). Esse montante foi possível de ser recuperado em 2,5 anos, devido a economia gerada através do uso biogás como substituto ao botijão de gás convencional e o biofertilizante substituindo insumos externos. (ESPERANCINI *et al.*, 2007).

Alcântara (2019) em um estudo sobre a viabilidade econômica de diferentes modelos de biodigestores, analisando vários cenários, estimou que plantas de pequena-escala opção mais vantajosa é o modelo Tubular, principalmente devido ao um custo inferior de implantação. O orçamento total para um biodigestor tubular de 11 m³ foi de R\$2.262 (equivalente 590 US\$, câmbio BCB, 28/6/2019).

4.1.1 Conclusão da revisão sistemática bibliográfica.

Os artigos selecionados pela revisão e destacados na tabela 6, demonstram a viabilidade do uso de biodigestores em diferentes escalas e níveis tecnológicos para a transformação de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizante através do tratamento biológico. Digestores anaeróbios tem sido utilizado em diversos países e já foram adaptadas as condições econômicas e ambientais de cada local.

Em países em desenvolvimento como os da América Latina, o modelo frequentemente aplicado em comunidades rurais são os digestores tubulares. Este modelo tem sido escolhido, devido ao seu baixo custo e facilidade de implantação. Em lugares de clima temperado, para melhor desenvolvimento da DA e produção eficiente de biogás é recomendado o uso de mecanismos para diminuir os efeitos negativos da amplitude térmica, como o uso de materiais isolantes e abrigos para os biodigestores. Para aplicações em escalas maiores, como em granjas suínas ou confinamentos bovinos, o biodigestor tipo Lagoa Coberta, tem representado maior aceitação por parte dos produtores rurais. Os digestores Tubulares e os Lagoa Coberta, são feitos de lonas plásticas e apresentam capacidades operacionais equivalentes, pois seguem o mesmo princípio de funcionamento chamado de Fluxo Pistão (*Pug-Flow*). Caracterizados pelo regime hídrico longitudinal ocasionando baixa homogeneização do substrato em seu interior, favorecendo a sedimentação e o acúmulo de sólidos. Estas características limitam o uso de substrato utilizado a concentração de sólidos não superior a 3%. Estes modelos possuem pouca capacidade em converter a biomassa em biogás quando comparado a outros modelos. A COV recomendada para estes digestores não deve ultrapassar 0,5 kg_{SV} m⁻³_{reator} d⁻¹. Consequentemente, necessitam de TDH elevado e de áreas maiores para instalação.

Os modelos tradicionais, cúpula-flutuante e cúpula-fixa, mesmo sendo os primeiros modelos de biodigestores criados, até hoje continuam sendo utilizados em novos projetos. O tamanho do digestor é limitado, podendo variar de 1 até 150 m³. Características como longa durabilidade e capacidade de receber maior quantidade de substrato, são suas principais vantagens. Mesmo não possuindo sistemas de homogeneização, mas por serem construídos em formatos redondos, estes modelos favorecem a circulação e mistura interna do substrato, garantindo condições mais estáveis para o desenvolvimento dos microrganismos. Assim, conseguem suportar alimentação com substratos mais concentrados, de até 10% de sólidos e com COV de até 3 kg_{SV} m⁻³_{reator} d⁻¹ e com menor TDH.

Com o avanço das tecnologias, novos modelos de digestores têm sido criados, com capacidades operacionais ainda mais elevadas. O digestor CSTR é um exemplo disso. Devido a presença de mecanismos de controle, como sistemas de agitação e aquecimento, este reator possui a melhor eficiência entre os modelos pesquisados. Pode receber COV elevada de até 4 kg_{SV} m⁻³_{reator} d⁻¹ e substratos com concentrações de até 15 %. O TDH é reduzido, geralmente entre 15 e 20 dias, podendo variar bastante em função da biomassa utilizada como substrato. A alta eficiência do modelo é garantida devido aos sistemas de integrados que controlam a alimentação, agitação, temperatura proporcionando o ambiente ideal e favorável para o desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos. Porém, o custo de implantação do digestor é mais elevado devido maior aporte de tecnologia implementadas. Os digestores CSTR representam a maioria absoluta dos reatores implantados na Europa.

Os parâmetros operacionais adotados para três biodigestores desenvolvidos e implantados no BiogasLab IFG-UFG são expostos na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros operacionais adotados para os três biodigestores no BiogasLab IFG-UFG.

MODELO	TUBULAR	CÚPULA-FLUTUANTE	CSTR
COV (KG _{SV} M ⁻³ _{REATOR} D ⁻¹)	0,2 – 0,5	2 - 3	1 – 4
CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS	<3%	<10%	<15%
TRH	longo	médio	médio
PRODUÇÃO DE BIOGÁS	0,35 – 0,4	0,26 – 0,55	1 – 1,45
REFERENCIA	a	b	c

A: Martí-Herrero et al., (2019);

B: Rajendran, Aslanzadeh e Taherzadeh (2012);

C: Cantrel et al., (2008).

4.2 BIODIGESTORES IMPLANTADOS NO BIOGASLAB IFG-UFG

Os reatores Tubular, Cúpula-flutuante e CSTR foram os modelos escolhidos para serem implantados como reatores experimentais, por serem tecnologias amplamente utilizadas e descritas na literatura, e apresentarem aptidão para aplicações agrícolas. Os três reatores pilotos constituem diferentes níveis tecnológicos que podem atender as variadas demandas do pequeno e médio produtor rural.

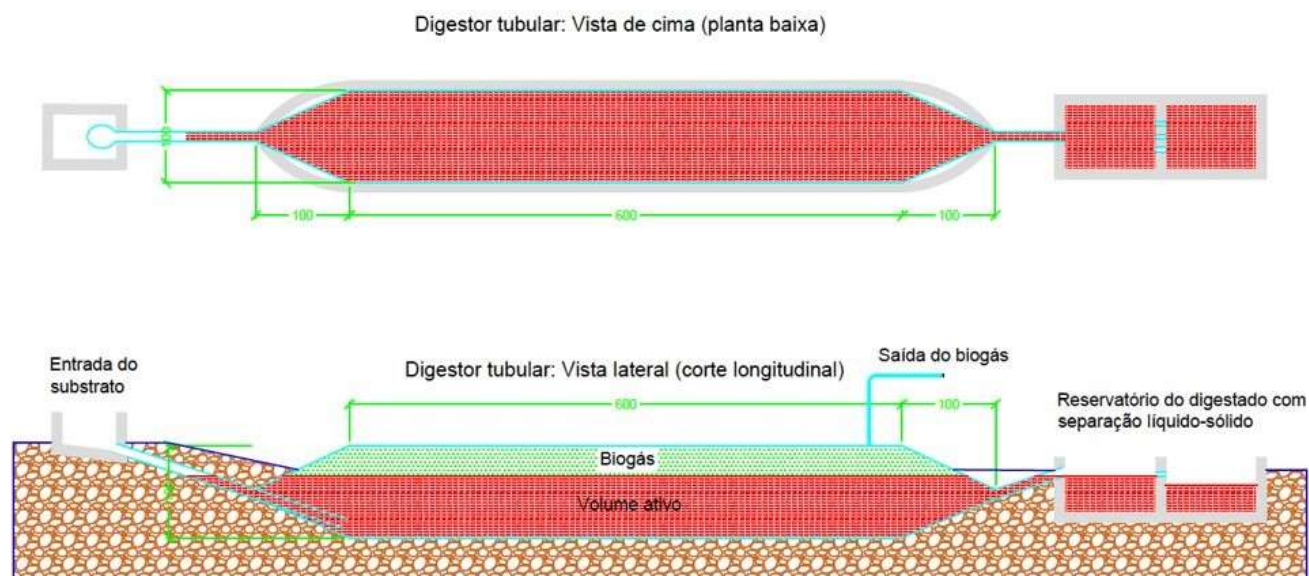
4.2.1 Digestor Tubular

O digestor desta categoria instalado no BiogasLab IFG-UFG foi confeccionado em uma empresa especializada em vulcanização, especialmente para este projeto. Como material, utilizou-se a lona reforçada dupla de PVC flexível, tipo KP1000 de 0,62 mm de espessura. Esta lona é muito utilizada na confecção de brinquedos infláveis, carretas de caminhão, cobertura de tendas entre outros. Este material foi o escolhido devido ao menor custo quando comparados a outras lonas disponíveis, e ainda assim, apresentar características importantes para o projeto de um biodigestor como: alta resistência a tração, proteção UV, propriedades antioxidante e autoextinguível (retardante de chama).

Projetado e construído no formato de um balão comprido, com seis metros de comprimento e um metro de diâmetro. Possui apenas três acessos ao seu interior, dois nas extremidades para entrada e saída da biomassa, e um na parte superior, para saída do biogás.

A entrada e a saída são constituídas de tubo de PVC de 100 mm, que liga a elevada caixa de alimentação até o corpo do digestor, e também outro tubo de mesmo diâmetro, fazendo a saída até a reservatório do digestado.

Figura 31 - Desenho técnico digestor tubular.



Fonte: Zang *et al.*, 2021.

Foram utilizados 23 m² de lona KP1000, a um preço R\$50 o m². O valor do material e o serviço de preparo e vulcanização do balão ficou em R\$1500. Como medida de proteção, foi erguido paredes de alvenaria ao redor da vala que aloja o corpo do digestor. Essa parede estrutural, não interfere no funcionamento do reator, servindo apenas como suporte, sendo portando, uma estrutura opcional, e que aumenta consideravelmente o valor do investimento. Possui entrada e saída com tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, caixa de concreto elevada para alimentação, reservatório de digestado com separador líquido-sólido.

Figura 32 - Biodigestor tubular implementado no BiogasLab IFG-UFG, Goiânia – GO.



Fonte: Zang *et al.*, (2021).

Dentro do digestor, o nível do substrato é limitado pela altura da saída. Esta característica propicia a divisão de fases (líquida e gasosa), neste caso, altura do substrato internamente é de 80 cm, ou 80% do volume do digestor, os 20% restantes são ocupados pelo biogás produzido. O volume total do reator tubular 4,7 m³ e o volume útil (fase líquida) de 3,8 m³.

Considerando o TRH de 30 dias e que biodigestores tubulares em condições mesofílicas podem receber uma COV de até 0,3 kg_{sv} m⁻³_{reator} d⁻¹ (MARTÍ HERRERO, 2019) e a produção média de 0,3 m³ kg_{sv} por dia. O reator tubular piloto pode receber aproximadamente 16 kg de esterco bovino por dia com a produção 0,5 m³/dia de biogás estimada.

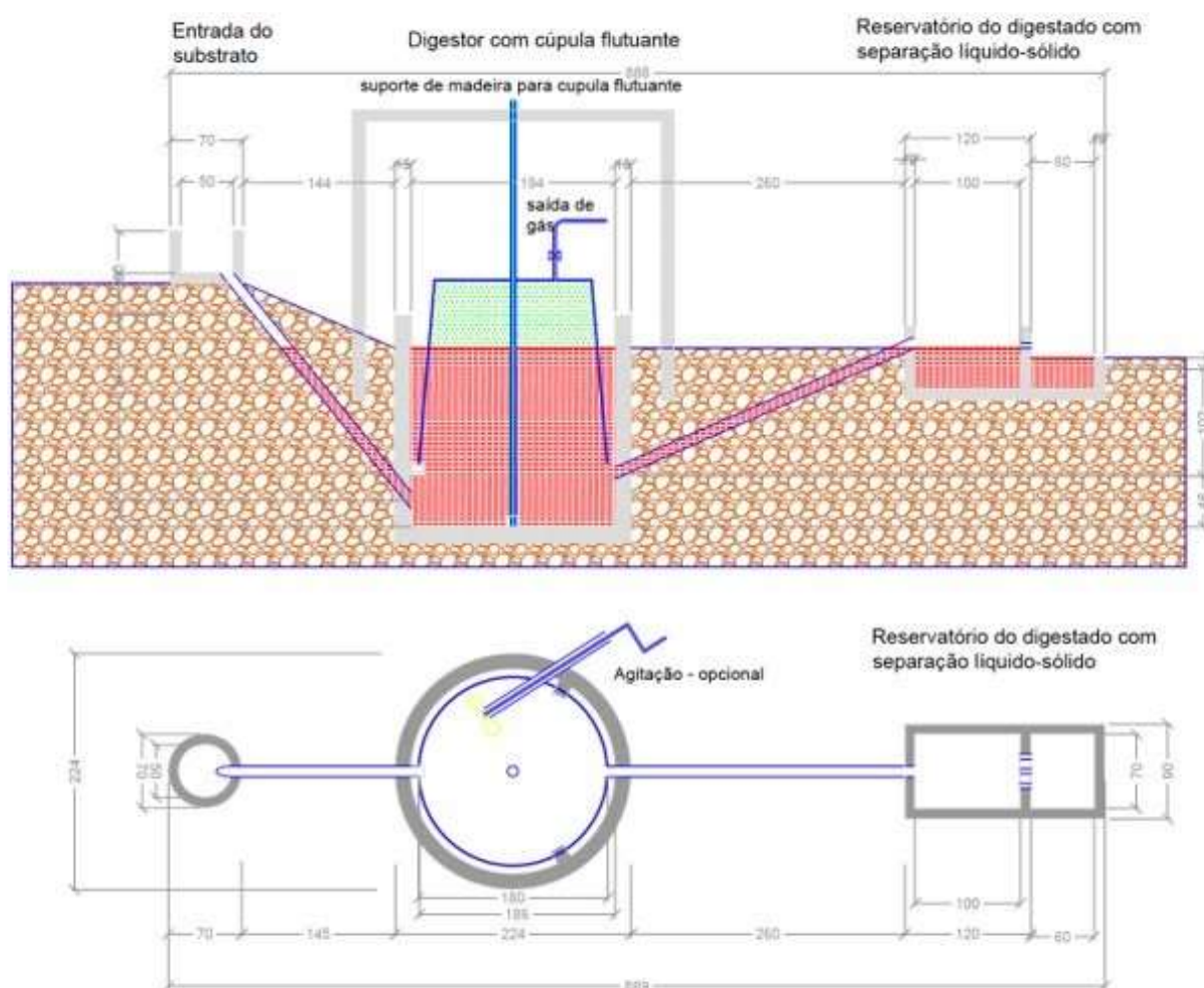
O esterco bovino deve ser diluído com água não clorada na proporção de 1:3, de forma que o substrato não possua mais do que 3% de sólidos.

4.2.2 Digestor de Cúpula-flutuante (Sertanejo)

O modelo de cúpula-flutuante, tipo Sertanejo instalado no BiogasLab IFG-UFG foi construído em um tanque escavado com 2 metros de profundidade e 1,85 de diâmetro. O volume útil aproximado do reator é de 5,3 m³. Considerando condições de temperatura mesofílicas, este modelo de reator suporta uma COV média de 2 kg_{SV} m⁻³_{reator} d⁻¹ e pode atingir uma produção de média biogás de 0,3 m³ kg_{SV} por dia. Se alimentado com esterco bovino, com a concentração média de 74 g SV por litro, o reator pode receber uma carga com até com 140 kg de esterco bovino ao dia, com a produção de biogás estimada em 3 m³ /dia de biogás.

O biodigestor Sertanejo é inspirado no modelo Indiano, utilizando, porém, ao invés da cúpula feita com chapas de aço, uma caixa d'água, de fibra ou plástico. Para a montagem do digestor Sertanejo nessa pesquisa, foi utilizado uma caixa de fibra de vidro com volume de 3 mil litros. O volume é suficiente para armazenar a quantidade diária de produção.

Figura 33 - Desenho técnico digestor Sertanejo.



Fonte: Zang *et al.*, 2021.

Os principais componentes que constituem esse modelo são:

- a) Caixa de entrada, local onde ocorre a diluição e pré mistura dos dejetos;
- b) Tubo de carga, responsável por conduzir o substrato até o interior de biodigestor;
- c) Câmara de biodigestão, local onde ocorre a digestão anaeróbia e a produção do biogás;
- d) Gasômetro, parte superior do biodigestor onde o gás produzido se acumula;
- e) Tubo-guia, funciona como um trilho que possibilita o gasômetro subir e descer;
- f) Tubo de descarga, conduz o material digestado para fora do digestor;
- g) Caixa de descarga, local onde o digestado é armazenado e ocorre a separação sólido/líquido do biofertilizante;
- h) Saída de gás, na parte superior do gasômetro, existe uma válvula que quando aberta possibilita a retirada do biogás;
- i) Acessórios, como o borbulhador que possibilita a retirada da umidade, filtro de palha de aço para retenção do gás sulfídrico e relógio medidor de vazão do gás produzido.
- j) Agitador Manual.

O substrato é adicionado na caixa de entrada, misturado com água na proporção 1:1. Por gravidade o substrato é transferido para a parte central do biodigestor, a câmara de biodigestão, onde acontece a digestão anaeróbia. Depois que o reator está completamente cheio, a cada quantidade adicionada na entrada, outra mesma quantidade de substrato já digerido é forçada a sair pelo tubo de descarga até o reservatório do digestado. Este reservatório é separado em dois compartimentos, onde ocorre a separação líquido e sólido do biofertilizante, este pode ser recolhido para aplicação em culturas vegetais.

Figura 34 - Biodigestor Sertanejo implementado no BiogasLab IFG-UFG.



Legenda:

- 1 = Cúpula flutuante com anel de zinco e lastro de areia;
- 2 = Borbulhador de gás;
- 3 = Filtro de gás com esponja de aço;
- 4 = Medidor de volumétrico gás;
- 5 = Agitador manual acoplado a bicicleta.

4.2.2.1 Agitador manual

Especialmente para o biodigestor Sertanejo, foi desenvolvido um sistema de agitação mecânica, um agitador manual. Este último fica posicionado no fundo do reator, e é composto por uma hélice de alumínio, acoplada a uma bicicleta por um eixo de aço inox e a um conjunto adaptado de engrenagens, de modo que, ao pedalar na bicicleta, a hélice gira e movimenta o substrato no fundo do biodigestor. Todas as peças que compõem esse sistema de agitação foram adquiridas como sucata, o que proporcionou um baixo custo de implantação. Para a montagem do sistema, foi necessário contratar o serviço de um torneiro para fazer os encaixes entre os componentes.

O sistema de agitação proposto é uma inovação opcional que pode melhorar a eficiência do processo. Foi pensado para ser um mecanismo que se utilizasse de tecnologias simples e que não

fugissem da realidade dos pequenos agricultores que optarem por esse modelo de digestor, que muitas vezes se encontram em áreas isoladas e não possuem recursos para adquirir ou construir sistemas mais sofisticados.

Figura 35 - Sistema de agitação manual



Figura 36 - Circulação interna do substrato

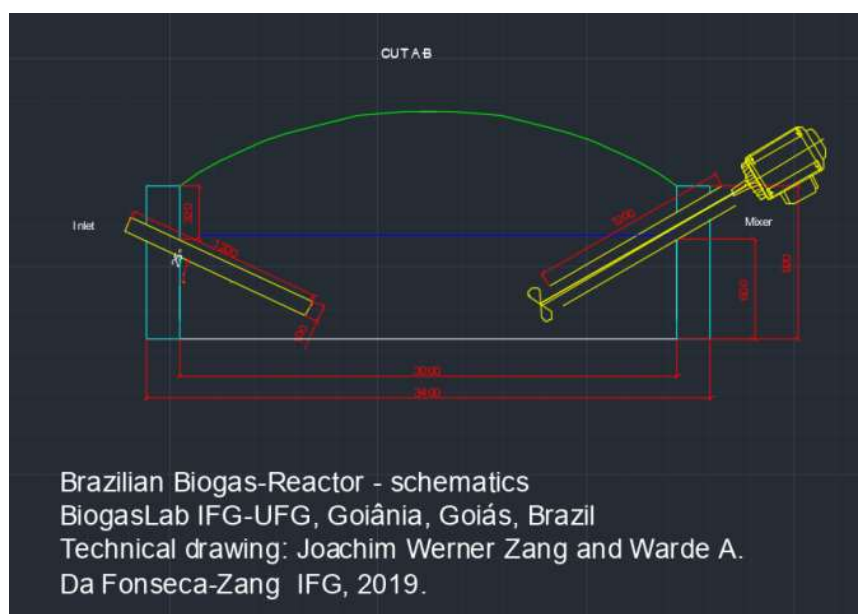


Fonte: O autor (2020).

4.2.3 Digestor CSTR - Reator Brasileiro

Este modelo foi desenvolvido através do princípio da tropicalização dos biodigestores modernos e automatizados, normalmente encontrados na Europa, porém adaptados aos materiais e condições brasileiras. O CSTR conta com um sistema de agitação automática, programada para agitar internamente o substrato por 5 minutos a cada hora. O modelo ainda possui um sistema de controle de temperatura, através de aquecimento solar térmico acoplado à uma bomba e controlado por microprocessador (termostato), garantindo assim a estabilidade da temperatura e homogeneização do substrato.

Figura 37 - Desenho técnico digestor CSTR (corte longitudinal).



Fonte: Zang e Fonsceca-Zang (2019).

Inicialmente, o projeto do digestor CSTR fora desenvolvido para operar com resíduos orgânicos proveniente da indústria sucroalcooleira, vinhaça e torta-de-filtro. Porém para efeitos de comparação nesse estudo será considerado como substrato o mesmo estrume bovino utilizado na alimentação dos outros dois biodigestores.

O reator possui o volume útil aproximado de 6 m³, considerando o TDH recomendado de 15 dias e uma COV de 3 kg_{SV} m⁻³_{reator} d⁻¹ e a produção de média biogás para esse tipo de reator de 1 m³ kgsv por dia, o biodigestor CSTR implantado no BiogasLab IFG-UFG tem a capacidade de receber aproximadamente 250 kg de esterco bovino, contendo 74 g de SV por kg. A produção estimada de 18 m³ de biogás por dia.

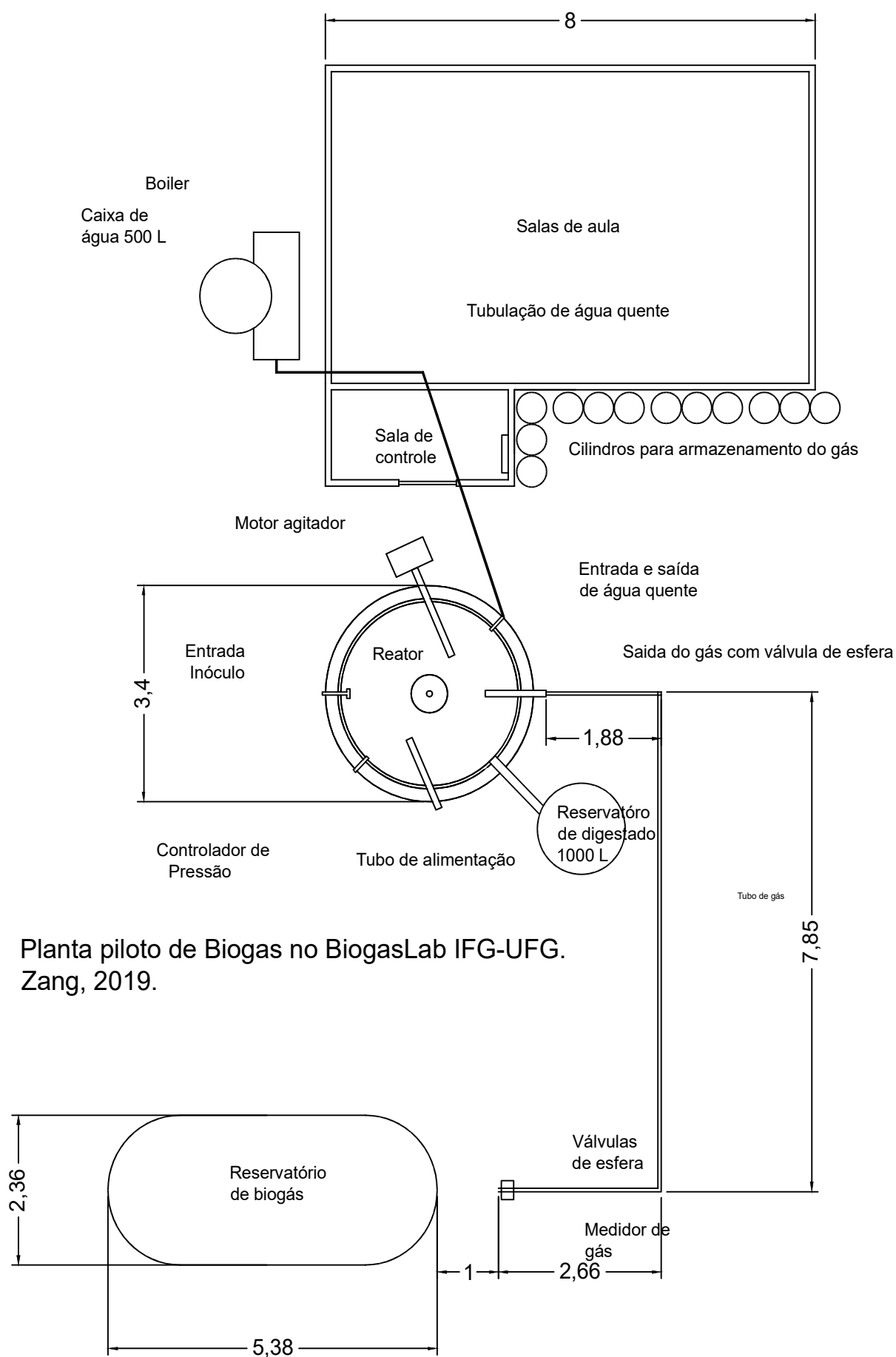
Figura 38 - Biodigestor CSTR no BiogasLab IFG-UFG.



Fonte: O autor (2021)

- 1 = Sistema de agitação por motor elétrico e hélice;
- 2 = Sistema de controle de temperatura solar, com ciclo fechado de água quente;
- 3 = Linha de biogás;
- 4 = Entrada de substrato;
- 5 = Saída de digestado;
- 6 = Reservatório do digestado;
- 7 = Medidor volumétrico de biogás;
- 8 = Reservatório de biogás;
- 9 = Sala de controle de operação;
- 10 = Biodigestor CSTR.

Figura 39 - Planta baixa do digestor CSTR e periféricos.



Planta piloto de Biogas no BiogasLab IFG-UFG.
Zang, 2019.

5 DISCUSSÃO

A responsabilidade ambiental com o tratamento e destinação correta dos dejetos e outros resíduos orgânicos provenientes das atividades agrícolas é responsabilidade do produtor rural. Um biodigestor é uma ferramenta versátil que pode fortalecer a agricultura familiar de múltiplas formas. O uso de biodigestores proporciona ao produtor rural, transformar a problemática da geração de resíduos, em oportunidade, gerando autonomia energética e financeira para a propriedade.

O domínio da digestão anaeróbia, e seu uso induzido em favor da produção do biogás, já é a muito tempo explorado, principalmente no meio rural. Os biodigestores de pequena e média escala já foram aplicados em diversos países até mesmo em condições ambientais desfavoráveis, como em regiões de altitude e clima temperado.

Adaptações nos projetos são feitas seguindo as particularidades de cada região onde são desenvolvidos. Dependendo de não apenas aspectos climáticos, mas tecnológicos, sociais, históricos e econômicos. Além destes aspectos, ao se escolher modelo de biodigestor, deve se sempre considerar a disponibilidade de substrato, água, demanda para o biogás e biodigestado.

Mesmo que a médio e longo prazo, o uso de biodigestores proporcionar diversos benefícios ao produtor rural, barreiras econômicas associadas à construção dos sistemas precisam ser superadas.

Na última década, tem crescido o número de iniciativas de aproveitamento dos resíduos para geração de biogás e fertilizante. Ainda assim, o número de plantas instaladas é muito inferior aos do continente asiático, porém iniciativas como a Redbiolac, tem sido responsável pela difusão da tecnologia na América Latina, apresentado significativo aumento nos casos bem-sucedidos, demonstrando os benefícios dos digestores domésticos nas comunidades rurais.

Os estudos abordados demonstraram a viabilidade da produção de biogás a partir de resíduos orgânicos comuns em propriedades rurais. Também foi evidenciado que o biogás pode satisfazer necessidades energéticas básicas como gás substituto ao GLP, e em casos maiores também apropriados para geração de eletricidade.

Os modelos adotados e construídos como digestores pilotos durante este trabalho representam alternativas tecnológicas aptas a atender a diferentes demandas da agricultura familiar. Na tabela a seguir, está descrito algumas características comparativas relevantes entre os modelos adotados.

Tabela 8 – Características relevantes dos biodigestores implantados no BiogasLab IFG-UFG.

MODELO	TUBULAR	CÚPULA-FLUTUANTE	CSTR
INSTALAÇÃO	fácil, rápido, em um a dois dias **	intermediária, em até uma semana ***	complexa, em várias semanas ou meses
MÃO DE OBRA	simples	simples	especializada
MATERIAIS	Leves: lonas plásticas, tubulações.	pesados: alvenaria, cúpula de metal ou fibra, tubulações	pesados: alvenaria, lona plástica, tubulações, sistemas de agitação e aquecimento, painel de controle etc.
CUSTOS	baixos	médio	alto
VIDA ÚTIL*	curta	longa	longa
EFICIÊNCIA	baixa	média	alta
SUBSTRATOS	Esterco líquido ou diluído	Esterco líquido e resíduos orgânicos diluídos	Esterco e outros resíduos sólidos orgânicos diluídos

*estimada

** lona pré-fabricada

*** cúpula-flutuante pré-fabricada

O modelo tubular tem vantagens para projetos em pequena escala, devido ao baixo custo de implementação e facilidade de construção e operação. Porém apresentam baixa eficiência de conversão da matéria orgânica, e não podem receber substratos concentrados. O risco de rompimento da lona deve ser considerado, medidas de proteção do biodigestor, como coberturas e acercamento da área são importantes para prolongar a vida útil do reator.

O digestor de cúpula-flutuante, modelo Sertanejo, tem a vantagem de ser mais robusto, e consequentemente uma vida útil mais longa que o tubular. Também possui uma capacidade de operação maior, podendo receber substratos mais concentrados. Outra vantagem importante para esse modelo, é a pressão constante, que o peso da cúpula (associado ao peso da areia utilizada como lastro) faz com que o biogás chegue mais facilmente ao destino. A instalação do agitador manual acoplado a uma bicicleta em um biodigestor dessa categoria é uma inovação que pode ser adotada em projetos posteriores. Estudos mais aprofundados devem ser elaborados para evidenciar e validar quais as alterações e os benefícios reais o sistema de agitação proposto pode trazer ao processo e à eficiência do biodigestor.

O biodigestor CSTR representa a tecnologia mais avançada até o momento entre todos os modelos de biodigestores apresentados. A implementação de sistemas de controle, como a agitação e aquecimento, dão a esse modelo a capacidade de digerir altas cargas orgânicas e produzir biogás com maior segurança e regularidade, independentemente da temperatura externa. Devido ao maior aporte de tecnologias nos CSTR, o custo de implantação tende a ser mais elevado quando comparados aos modelos anteriores descritos. Por isso, a viabilidade econômica de projetos que considerem esse modelo, deve ser investigada. O CSTR é indicado para projetos que podem contar com maior recursos

técnicos e orçamentários. Geralmente para produtores rurais que possuem alta demanda de calor, ou que pretendem gerar energia elétrica.

6 CONCLUSÃO

Todos os modelos de biodigestores apresentados têm vantagens e desvantagens e são adequados para aplicações diferentes. A escolha de qual tecnologia a ser adotada deve ser analisada individualmente pois depende das circunstâncias dos fatores locais, sociais, técnicos e econômicos do local onde será implantado, considerando principalmente a capacidade de investimento e a disponibilidade da biomassa e de água, bem como da demanda de energia na forma de calor e/ou de energia elétrica.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos em biodigestores é uma alternativa sustentável, que traz diferentes vantagens para os produtores rurais e ainda contribuem para a mitigação das mudanças climáticas. Desta maneira, não apenas o proprietário rural se beneficia do uso dos biodigestores, uma vez que ele evita a contaminação do solo e da água e evita a lançamento de GEE.

O biogás é uma fonte de energia, plenamente acessível ao produtor rural, porque resulta das próprias atividades produtivas. As características químicas do biogás, o asseguram como fonte renovável de energias térmicas, elétricas e mecânicas, podendo ser utilizadas para substituir as geradas em fontes externas à propriedade. Os produtores rurais podem ser tornar geradores de energias renováveis, utilizada em seus próprios processos produtivos, e ao mesmo tempo, colaborar na mitigação da emissão de GEE.

As tecnologias de biodigestão já são conhecidas, o maior desafio para seu uso não é apenas tecnológico, mas também cultural. O conhecimento sobre os benefícios, as limitações e parâmetros de segurança de plantas de biogás deve chegar até os produtores rurais.

O desenvolvimento programas que ofereçam a possibilidade de financiamentos de biodigestores é uma maneira para promover a difusão da tecnologia. Incentivos financeiros através de linhas de créditos e subsídios são importantes mecanismos de aumentar o interesse dos produtores rurais na implementação dos reatores. O Programa ABC, oficialmente denominado “Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura, é um plano de governo em colaborar com os compromissos de redu-

ção das emissões de carbono. Para o ano de 2021/22 o programa anunciou o R\$5 bilhões para financiar projetos sustentáveis. Neste programa está incluso o Plano Safra, que promete financiamentos subsidiados projetos de produção de biogás. Outros como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Ponaf) destinam financiamentos a implantação de estruturas em áreas rurais que visem a geração de renda e melhora dos sistemas produtivos. A inclusão de projetos de biodigestores nestes programas de incentivo além estimular o aumento no número de plantas instaladas, traz segurança financeira aos produtores rurais em optarem pelo o uso da tecnologia.

Este trabalho futuramente apresenta potencial para apoiar novas pesquisas sobre digestão anaeróbia, especialmente na agricultura familiar, de cooperativas e de pequenos e médios produtores rurais, bem como de aproveitamento de biomassas residuárias em outras fontes, por exemplo, em restaurantes, comércio, empresas de produção de alimentos e semelhantes.

Na ótica da Agricultura Familiar, o biodigestado é um produto que muito tem a contribuir para os meios produtivos, gerando economia ao produtor e trazendo resultados no aumento da produção devido sua capacidade de uso como adubo.

A geração e o aproveitamento de biogás e dos adubos gerados no processo de digestão anaeróbia a partir de resíduos já têm um papel muito importante e crescente para combater os efeitos das mudanças climáticas, diminuir desigualdades sócias e levar para uma produção e um desenvolvimento sustentável no âmbito de economia circular em todas as escalas do pequeno produtor familiar até as grandes indústrias.

8 REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, n. 3, p. 30, 2008.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE PROMOÇÃO DE EXPORTAÇÕES E INVESTIMENTOS. Perfil da Pecuária Anual. **Relatório Anual 2016**, 2016.

ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. **Renewable Energy**, v. 33, n. 4, p. 726–734, 2008.

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

AN, B. X.; PRESTON, T. R.; DOLBERG, F. The introduction of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in Vietnam. **Livestock Research for Rural Development**, v. 9, n. 2, p. 39–49, 1997.

ANDRADE, M. A. N. et al. **BIODIGESTORES RURAIS NO CONTEXTO DA ATUAL CRISE DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA E NA PERSPECTIVA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural. **Anais...** Florianópolis: 2002 Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/030.pdf>>

ANP. **RenovaBio — Português (Brasil)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>>.

ARAÚJO, A. P. C. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, dissertation of graduation in portuguese - Uberlândia. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**, p. 42, 2017.

ATCHA, S. Y.; VAN SON, V. T. **Opportunities with landfill gas** **Corporate Guide to Green Power Markets** Washington - DC World Resources Institute, , 2002.

BARICHELO, R. **O Uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso da região noroeste do Rio Grande do Sul**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

BARŁÓG, P.; HLISNIKOVSKÝ, L.; KUNZOVÁ, E. Effect of digestate on soil organic carbon and plant-available nutrient content compared to cattle slurry and mineral fertilization. **Agronomy**, v. 10, n. 3, 2020.

BARROS, G. C. et al. Biogás e agricultura familiar no nordeste brasileiro: a experiência da ONG CETRA apoiada pela cooperação internacional no semiárido cearense. **RedBioLAC**, v. 4, p. 45–49, 2020.

BEIL, M.; BEYRICH, W. **Biogas upgrading to biomethane**. [s.l.: s.n.].

BERNAL, L. O. et al. Biofertilizer potential of digestates from small-scale biogas plants in the Cuban context. **Revista de Ciencias Agrícolas**, v. 37, n. 2, p. 14–26, 2020.

BRASIL. **LEI Nº 11.326, DE 24 DE JULHO DE 2006**. Brasília, 2006. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/11326.htm>

BRASIL. **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás**. 1ª ed. Brasília - DF: [s.n.].

CANTRELL, K. B. et al. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource Technology**, v.

99, n. 17, p. 7941–7953, 2008.

CASTRO, L. et al. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. **Bioresource Technology**, v. 239, p. 311–317, 2017.

CHAO, R. et al. **A study on pig wastewater treatment with low cost biodigesters** **Livestock Research for Rural Development** Habana - Cuba, 2008. Disponível em: <<http://www.lrrd.org/lrrd20/9/chao20149.htm>>

CHEN, Y. et al. Status and prospects of rural biogas development in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 679–685, 2014.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores Anaeróbios**. [s.l: s.n.]. v. 5

CIBIOGAS. **Panorama do biogás no Brasil 2020** **Nota Técnica**. Foz do Iguaçu: [s.n.].

DEUBELIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Deggendorf: [s.n.].

EMBRAPA. **Módulos Fiscais**, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/area-de-reserva-legal-arl/modulo-fiscal>>

ESPERANCINI, M. S. T. et al. Economical and technical feasibility of the conventional energy source substitution by biogas in rural settlement of São Paulo State, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 110–118, 2007.

FAO; IFAD. **Decenio de las Naciones Unidas para la Agricultura Familiar 2019-2028**. Roma: [s.n.].

FEIDEN, A. et al. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM BIODIGESTOR TUBULAR NA SUINOCULTURA Colégio Estadual Entre Rios do Oeste , Município de Entre Rios do Oeste , PR . Colégio Estadual Entre Rios do Oeste , Município de Entre Rios do Oeste , PR . p. 7, 2005.

FERRER, I. et al. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1668–1674, 2011.

FIRS. **O Impacto Global da Doença Respiratória**. 2ª ed. Cidade do México: [s.n.].

GARCIA-ARRIAGA, V. et al. H₂S and O₂ influence on the corrosion of carbon steel immersed in a solution containing 3M diethanolamine. **Corrosion Science**, v. 52, n. 7, p. 2268–2279, 2010.

GARFÍ, M. et al. Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 6356–6359, 2011.

GARFÍ, M. et al. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 599–614, 2016.

GHIMIRE, P. C. SNV supported domestic biogas programmes in Asia and Africa. **Renewable Energy**, v. 49, p. 90–94, 2013.

GIAMPAOLI, O. et al. Diseño e instalación del Biodigestor del Comedor Universitario de la Universidad Nacional del Litoral. **RedBioLAC**, v. 1, p. 8–11, 2017.

GIODA, A.; TONETTO, G. B.; DE LEON, A. P. Exposição ao uso da lenha para cocção no Brasil e sua relação com os agravos à saúde da população. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 24, n. 8, p. 3079–3088, 2019.

HORIUCHI, J. I. et al. Selective production of organic acids in anaerobic acid reactor by pH control. **Bioresource Technology**, v. 82, n. 3, p. 209–213, 2002.

IBGE. Censo agropecuário 2017: resultados definitivos. **Censo agropecuário**, v. 8, p. 93, 2019.

IBGE. **Indicadores IBGE : sistema nacional de índices de preços ao consumidor : INPC-IPCA**. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.].

KALIA, A. K.; KANWAR, S. S. Long-term evaluation of a fixed dome Janata biogas plant in hilly conditions. **Bioresource Technology**, v. 65, n. 1–2, p. 61–63, 1998.

KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 43, n. 2, p. 175–188, 2005.

KHAN, E. U. et al. Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 7, p. 68–78, 2014.

KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I. Biogas and its opportunities — A review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, n. June 2018, p. 1–22, 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1ª ed. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LANSING, S. et al. Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. **Ecological Engineering**, v. 34, n. 4, p. 332–348, 2008.

LANSING, S. et al. Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 12, p. 1711–1720, 2010.

LAPA, K. R. et al. **Geração De Gás Metano Por Fontes Antropogênicas - Destaque Para Aterros**. Florianópolis: 2004Disponível em: <[https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS PDF/08/08-016.pdf](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/08/08-016.pdf)>

LIMA, M. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; LIGO, M. A. **EMISSÕES DE METANO DA PECUÁRIA**. Brasília - DF: [s.n.].

LINS, M. A. **EFEITO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO-SE DEJETO DE SUÍNO EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE REATORES ANAERÓBIOS**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ CAMPUS, 2017.

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

MARTÍ-HERRERO, J. et al. Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. **Bioresource Technology**, v. 167, p. 87–93, 2014.

MARTÍ HERRERO, J. **Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación**. EcuadorRedBio-lac, , 2019.

MEDEIROS, M. B.; LOPES, J. DA S. Biofertilizantes líquidos e sustentabilidade agrícola. **Bahia Agríc.**, v.7, n.3, nov. 2006, v. 7, n. 3, p. 3, 2006.

MÉZES, L.; TAMAS, J.; BORBELY, J. **Novel approach of the basis of FOS / TAC methodInternational Symposia "Risk Factors for Environment and Food Safety" & "Natural Resources and Sustainable Development" & "50 Years of Agriculture Researche in Oradea"**, Faculty of Environmental Protection, 2011.

MITO, J. Y. DE L. et al. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Concórdia - SC: [s.n.].

NIANGUO, L. Biogas in China. **Trends in Biotechnology**, v. 2, n. 3, p. 1098–1107, 1984.

OBILEKE, K. C.; ONYEAKA, H.; NWOKOLO, N. Materials for the design and construction of household biogas digesters for biogas production: A review. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 3, p. 3761–

3779, 2021.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS EM UNIDADES DE PRODUÇÃO DE SUÍNOS** Embrapa suínos. Concórdia - SC: [s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58216/1/doc115.pdf>>.

OLIVEIRA, P. I. et al. Produção de biogás no âmbito da agricultura familiar no Semiárido brasileiro como proposta de convivência e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas: a experiência da ONG Diaconia. **Red-BioLAC**, v. 3, p. 29–31, 2019.

PALHARES, J. C. P. Biodigestores, a solução? **Suínocultura Industrial**, v. 7, p. 9, 2007.

PALHARES, J. C. P. et al. **Produção Animal e Recursos Hídricos**. [s.l: s.n.].

PEDER, T.; ARALDSEN, R. L. Biogas in Nepal: Limitations for the Expansion of Community Plants. p. 1–35, 2016.

PEREIRA, E. S.; ROCHA, M. D. S.; TEIXEIRA, V. M. **Diagnóstico da gestão dos resíduos sólidos na agricultura familiar em Rondônia**. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais...**Belo Horizonte - MG: 2014

POUND, B. THE CHARACTERISATION OF PRODUCTION AND FUNCTION OF A 15m³ RED-MUD PVC BIOGAS DIGESTER. **Tropical animal production**, v. 6, n. 2, p. 146–153, 1981.

PRACIANO, A. C. et al. CONTRIBUIÇÃO DE BIODIGESTORES PARA A AGRICULTURA FAMILIAR 95 ALI-NE. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 1, p. 95–106, 2020.

PROBIOGÁS. Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização. **Governo Federal Do Brasil**, v. 5, p. 20–30, 2010.

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

SAKAR, S.; YETILMEZSOY, K.; KOCAK, E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment - A literature review. **Waste Management and Research**, v. 27, n. 1, p. 3–18, 2009.

SALCEDO, S.; GUZMAN, L. **Agricultura familiar en America Latina y el Caribe**. [s.l: s.n.].

SALZER, E. et al. **Relato técnico: O uso de biodigestor em pequenas propriedades da agricultura familiar no Município de Marechal Cândido Rondon – PR**. Anais do VI Simpósio Internacional de Gestão de Projeto, Inovação e Sustentabilidade. **Anais...**São Paulo - SP: Anais do VI SINGEP, 2017Disponível em: <<http://www.singep.org.br/6singep/resultado/555.pdf>>

SANTOS, T. M. B.; JORGE, L. J.; SILVA, F. M. Avaliação do desempenho de um aquecedor para aves adaptado para utilizar biogás como combustível. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 658–664, dez. 2007.

SEADI, T. et al. **Biogas handbook**. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

SINGH, K. J.; SOOCH, S. S. Comparative study of economics of different models of family size biogas plants for state of Punjab, India. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 9–10, p. 1329–1341, 2004.

SOARES, C. M. T. et al. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL COM AUTONOMIA BIOGAS PRODUCTION AS A SUSTAINABLE ENERGY ALTERNATIVE : TERRITORIAL DEVELOPMENT PERSPECTIVES WITH AUTONOMY danos causados ao ambiente . Uma alternativa que vem se mostrando promissora é a criação de. **Revista ORBIS LATINA**, v. 9, n. 2, p. 102–110, dez. 2019.

STOFFEL, J. **Agricultura familiar nos estados da região sul do brasil: caracterização a partir dos dados do censo agropecuário de 2006**° Encontro de Economia GaúchaHorizontina - RS, 2006. Disponível em: <http://cdn.fee.tche.br/eeg/6/mesa15/Agricultura_Familiar_nos_Estados_da_Regiao_Sul_do_Brasil-Characteri>

zacao_a_partir_do_Censo_Agropecuario_de_2006.pdf>

TAŞDEMIROĞLU, E. Review of the biogas technology in Turkey. **Biomass**, v. 17, n. 2, p. 137–148, jan. 1988.

TORRES, A.; PEDROSA, J. F.; MOURA, J. P. FUNDAMENTOS DE IMPLANTAÇÃO DE BIODIGESTORES EM PROPRIEDADES RURAIS. **Educação Ambiental em Ação**, n. 2, p. 58–66, 2012.

WAHYUNI, S. et al. Application of small digester biogas for energy supply in rural areas. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 141, n. 1, 2018.

WANG, X. et al. Biogas standard system in China. **Renewable Energy**, v. 157, p. 1265–1273, 2020.

WBA. Global potential of biogas. **World Biogas Association**, p. 1–56, 2019.

WUEBBLES, D. J.; HAYHOE, K. **Non-CO2 Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control and Implementation**. [s.l: s.n.].

ZANG, J. W. et al. **Biodigestores para Agricultura Familiar** GoiâniaCVT-Apinajé, , 2021. Disponível em: <<https://cvtapinaje.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Cartilha-Biodigestores-Site.pdf>>

Resumo do Currículo Lattes

<http://lattes.cnpq.br/8787966897560851>

Henrique Lacerda de Santana Azevedo

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (2013). Especialização em Gestão e Qualidade Ambiental pela UFG (2016). Tem experiência na área de Engenharia Sanitária, com ênfase em Tratamento de Águas de Abastecimento e Residuárias, atuando principalmente nos seguintes temas: Digestão anaeróbia, biomassa e biogás e biofertilizantes.