

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Maurício Zanon Antunes

**VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS
ANIMAIS**

Cachoeira do Sul, RS
2019

Maurício Zanon Antunes

VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS ANIMAIS

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Juan Galvarino Cerda Balcazar
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Mariana Vieira Coronas

Cachoeira do Sul, RS
2019

Ficha Catalográfica
Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul | UFSM-CS
Biblioteca Setorial de Cachoeira do Sul
Bibliotecário-Documentalista Carlos Eduardo Gianetti - CRB-10/2485

A636a Antunes, Maurício Zanon, 1991-
Viabilidade da produção de biogás a partir de dejetos
animais / Maurício Zanon Antunes. - Cachoeira do Sul, RS :
[s.n.], 2019.
Orientador: Juan Galvarino Cerda Balcazar.
Coorientadora: Mariana Vieira Coronas.
Monografia (graduação) - Universidade Federal de Santa
Maria, Campus Cachoeira do Sul.
61 p. ; il.

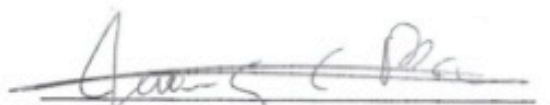
1. Sustentabilidade 2. Biodigestor anaeróbio 3. Dejetos
4. Metanização 5. Resíduos sólidos 6. Engenharia Mecânica
I. Balcazar, Juan Galvarino Cerda, 1985- II. Coronas, Mariana
Vieira, 1982- III. Universidade Federal de Santa Maria,
Campus Cachoeira do Sul IV. Título.

Maurício Zanon Antunes

VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS ANIMAIS

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

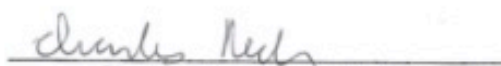
Aprovado em 05 de dezembro de 2019:



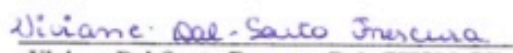
Juan Galvarino Cerdá Balcazar, Dr. (UFSM-CS)
(Presidente/Orientador)



Mariana Vieira Coronas Drª. (UFSM-CS)



Charles Rech Dr. (UFSM-CS)



Viviane Dal-Souto Frescura Drª. (UFSM-CS)

Cachoeira do Sul, RS
2019

DEDICATÓRIA

*À minha namorada Mayara Ribeiro da Silva,
Aos meus pais Eni Salete Zanon Antunes e Valcir Antunes dos Santos,
Aos meus irmãos Gabriel Zanon Antunes e Gustavo Zanon Antunes.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Eni Salete Zanon Antunes e Valcir Antunes dos Santos por todo amor e carinho. Também, pelos ensinamentos, incentivos, motivação, apoio e ajuda sempre que precisei.

A minha namorada Mayara Ribeiro da Silva por todos os “puxões de orelha”, contribuições, motivações, apoios e paciência de sempre.

Ao meu professor Orientador Juan Galvarino Cerda Balcazar e Co-orientadora Mariana Vieira Coronas por toda a dedicação em me auxiliar nessa jornada, pela confiança, motivação e por todos os ensinamentos proporcionados.

Aos avaliadores do trabalho, professores Charles Rech e Viviane Dal-Souto Frescura.

Aos meus familiares, amigos e colegas por todo o apoio, carinho e compreensão.

A todos os professores da graduação pelo conhecimento e dedicação para meu aprendizado.

*“É justamente a possibilidade de
realizar um sonho que torna a vida
interessante”*

Paulo Coelho (O Alquimista)

RESUMO

VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS ANIMAIS

AUTOR: Maurício Zanon Antunes
ORIENTADOR: Prof. Dr. Juan Galvarino Cerda Balcazar
COORDINADORA: Prof^a. Dr^a. Mariana Vieira Coronas

Promover a gestão adequada dos resíduos e efluentes gerados nos processos produtivos é um dos principais desafios enfrentados pela atual sociedade. Dentre os diversos tipos de resíduos e efluentes gerados, aqueles compostos por materiais orgânicos, quando não são tratados de forma adequada, tornam-se uma potencial fonte de contaminação do solo e corpos hídricos, proliferação de vetores e doenças, geração de maus odores e emissão de gases nocivos e de efeito estufa. Nesse sentido, a metanização, ou digestão anaeróbia, é um processo com ampla aplicabilidade para a conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás e biofertilizante, associando o tratamento adequado à geração de energia renovável. A implantação de biodigestores para produção de biogás pode-se configurar com uma alternativa viável e que auxilia o ciclo de produção e consumo, promovendo um retorno dos resíduos e efluentes orgânicos à cadeia produtiva, incrementando significativamente a sustentabilidade dos processos agroindustriais. Os biodigestores permitem que o dejetos seja tratado e transformado em biogás, e posteriormente podendo ser utilizado em sistemas para produção de energia, o restante da matéria pode ser convertido em biofertilizante e utilizado em lavouras, contribuindo com a diminuição do uso de adubos químicos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a potencialidade de dejetos bovinos e suínos para geração de biogás através da biodigestão anaeróbia. Para isso, foi feito um levantamento, a partir de revisão bibliográfica, dos benefícios econômicos e ambientais da produção, além de quantificar o potencial de produção do biogás. A partir dessas informações, o objetivo do presente estudo foi dimensionar um sistema de produção de biogás provindo de biomassa de dejetos animais por meio da digestão anaeróbia. O modelo do biodigestor foi desenvolvido no campus da UFSM Cachoeira do Sul. Nestes modelos foram avaliadas a produção do biogás nas diferentes biomassas. Foi observada uma redução de 36,32% e 3,98% de Sólidos Totais nas biomassas de suínos e bovinos, respectivamente. Essa redução de sólidos está diretamente relacionada com a produtividade de biogás gerada nos biodigestores. A menor produção de biogás a partir dos dejetos de bovinos pode estar relacionada a vários fatores como condições ambientais, umidade e a própria constituição da biomassa. A partir disso, um biodigestor modelo Indiano para os dejetos suínos foi dimensionado visando o seu uso para conversão térmica.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Biodigestor anaeróbio, Dejetos, Metanização, Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

FEASIBILITY OF BIOGAS PRODUCTION FROM ANIMAL WASTE

AUTHOR: Maurício Zanon Antunes
ORIENTADOR: Prof. Dr. Juan Galvarino Cerda Balcazar
COORDINADORA: Prof^a. Dr^a. Mariana Vieira Coronas

Promoting proper management of waste and effluents generated in production processes is one of the main challenges of today's society. Among the various types of waste and effluents generated, organic material compounds, when not properly treated, become a potential source of soil and water body contamination, vector proliferation and diseases that generate bad odors and gas emissions harmful and greenhouse gases. In this sense, methanization, or anaerobic digestion, is a process with wide applicability for the conversion of waste and effluents used in biogas and biofertilizer, associated with the appropriate treatment for renewable energy generation. The implementation of biodigesters for biogas production can be configured as a viable alternative and assist in the production and consumption cycle, promoting a return of waste and effluents used in the production chain, increasing the sustainability of agroindustrial processes. Biodigesters allow the waste to be treated and transformed into biogas and can later be used in energy production systems, the remaining matter can be converted into biofertilizer and used in crops, contributing to the reduction of the use of chemical fertilizers. Thus, the present work aims to evaluate the potential of cattle and swine manure in biogas generation through anaerobic digestion. For this, a survey was conducted, based on a literature review, of the economic and environmental benefits of production, as well as quantifying the production potential of biogas. From this information, the objective of the present study was to design a biogas production system from animal waste biomass through anaerobic digestion. The biodigester model was developed at the UFSM campus in Cachoeira do Sul. These models evaluated biogas production in the different biomass. There was a reduction of 36.32% and 3.98% of total solids in swine and bovine biomass, respectively. This solids reduction is directly related to the biogas productivity generated in the biodigesters. The lower production of biogas from cattle manure may be related to several factors, such as environmental conditions, humidity and biomass constitution. From this, an Indian model swine manure biodigester was designed for its use in thermal conversion.

Keywords: Sustainability, Anaerobic Digester, Animal Waste, Methanization, Solid Waste.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Matriz energética Mundial 2016 (IEA, 2018)..... | 14 |
| Figura 2 – Oferta interna de energia por fonte (BEN,2018). | 14 |
| Figura 3 - Representação esquemática do ciclo do carbono. | 16 |
| Figura 4 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa..... | 17 |
| Figura 5 - Representação de biodigestor modelo Indiano | 24 |
| Figura 6 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo Indiano..... | 24 |
| Figura 7 - Biodigestor modelo Chinês..... | 25 |
| Figura 8 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo Chinês..... | 25 |
| Figura 9 - Representação de biodigestor modelo Canadense..... | 26 |
| Figura 10 - Biodigestor modelo Canadense instalados em propriedade rural | 26 |
| Figura 11 - Biodigestor modelo Alemão | 27 |
| Figura 12 - Representação esquemática da composição do biogás..... | 28 |
| Figura 13 - Sequência do sistema de biodigestão anaeróbia..... | 32 |
| Figura 14 – Amostras de dejetos suínos. | 34 |
| Figura 15 – Modelo de biodigestor por batelada..... | 36 |
| Figura 16 - Modelo de biodigestor de forma contínua. | 37 |
| Figura 17 - Médias diárias de temperatura do ar nos dias de funcionamento dos biodigestores. | 43 |
| Figura 18 – Rompimento do biorreator devido a pressão interna gerada pelo biogás. | 45 |
| Figura 19 - Esquema do dimensionamento de biodigestor para propriedade 2 (dejetos suínos). | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos. | 19 |
| Tabela 2 - Potencial de geração de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais. | 20 |
| Tabela 3 - Conteúdo médio de nutrientes (NPK) dos dejetos de suínos, de acordo com o teor de sólidos | 21 |
| Tabela 4 - Concentração média de nutrientes e teor de matéria seca de alguns materiais orgânicos ⁽¹⁾ | 21 |
| Tabela 5 - Características e composição do biogás de diferentes fontes..... | 29 |
| Tabela 6 - Componentes utilizados para construção do modelo por batelada. | 35 |
| Tabela 7 - Componentes utilizados para construção do modelo contínuo..... | 36 |
| Tabela 8 – Valores tabelados da metodologia do IPCC para parâmetros qualitativos..... | 38 |
| Tabela 9 - Valores tabelados da metodologia do CIBiogás-ER para parâmetros qualitativos. | 40 |
| Tabela 10 – Valores do pH e percentual de Sólidos Totais presentes nos dejetos avaliados no primeiro dia e último dia de experimento. | 44 |
| Tabela 11 – Estimativa de produção do biogás..... | 46 |
| Tabela 12 - Resumo das estimativas de produção de dejetos (m ³ /dia), biogás e metano nos locais (propriedades) de coleta dos dejetos..... | 49 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 | ENERGIA E SUA IMPORTÂNCIA..... | 13 |
| 2.1.1 | Energias não renováveis e renováveis..... | 15 |
| 2.2 | BIOMASSA | 15 |
| 2.2.1 | Problemática e contextualização de produção de dejetos | 17 |
| 2.3 | TECNOLOGIAS DOS BIODIGESTORES..... | 22 |
| 2.3.1 | Modelos de biodigestores | 22 |
| 2.3.2 | Escolha do tipo de Biodigestor..... | 27 |
| 2.4 | PRODUÇÃO DO BIOGÁS E DO BIOFERTILIZANTE | 28 |
| 2.4.1 | Caracterização da biomassa..... | 29 |
| 2.4.2 | Digestão anaeróbica | 31 |
| 2.4.3 | Condições operacionais dos biodigestores | 32 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 34 |
| 3.1 | BIOMASSAS UTILIZADAS E ORIGEM..... | 34 |
| 3.2 | MATERIAIS UTILIZADOS PARA O MODELO | 35 |
| 3.3 | PRODUÇÃO DO BIOGÁS E DO BIOFERTILIZANTE | 37 |
| 3.4 | DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR | 40 |
| 3.5 | ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS..... | 41 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 43 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES E BIOMASSAS | 43 |
| 4.2 | MONTAGEM DO BIODIGESTOR E PRODUÇÃO DO BIOGÁS | 44 |
| 4.3 | ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE DEJETOS E BIOGÁS | 47 |
| 4.4 | DIMENSIONAMENTO DO MODELO DE BIODIGESTOR..... | 49 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 52 |
| | REFERÊNCIAS..... | 53 |

1 INTRODUÇÃO

A energia como recurso é essencial para a sobrevivência do planeta e associada a sustentabilidade de seu consumo, tem figurado como tema das principais discussões entre a sociedade civil, indústria e lideranças governamentais. A exaustão das reservas de combustíveis fósseis e os problemas ambientais causados pelos poluentes emitidos por eles, comprovam que esses recursos energéticos não poderão continuar sendo as fontes principais de energia utilizadas pelo homem. Por isso a importância fundamental de se discutir e desenvolver o uso de energias renováveis, essencialmente por serem menos poluentes e não dependerem de fatores geopolíticos (GOLDEMBERG; PALETTA et al., 2012).

A eficiência no uso da energia entrou na agenda mundial a partir do elevado aumento no preço do petróleo nos anos 1970, quando ficou claro que o uso das reservas de recursos fósseis teria custos crescentes, tanto do ponto de vista econômico, quanto do ponto de vista ambiental. Logo se reconheceu que um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia, conseqüentemente, com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais. Posteriormente, a busca pela eficiência energética ganhou nova motivação culminada pela preocupação com as questões de mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global do planeta (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Mais recentemente, nos anos 2000, com a motivação de segurança do abastecimento (redução da dependência do petróleo) adicionou-se preocupações locais e globais com o meio ambiente. O potencial dos biocombustíveis no combate aos desafios socioambientais, causados pelas mudanças climáticas, foi incorporado como objetivo de políticas públicas do Brasil, levando em consideração seu papel para a redução das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), em particular, no setor de transportes. Nesse contexto, além da ampliação do papel do etanol carburante, a partir do lançamento dos veículos *flex-fuel* ou veículos de combustível duplo, o biodiesel, a bioeletricidade, o biogás e o biometano foram inseridos na matriz energética nacional nas últimas décadas. A preocupação ambiental também motiva a pesquisa e o desenvolvimento de novos biocombustíveis e biomateriais, em direção a uma economia de baixo carbono (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

Segundo Konrad et al. (2016) o aproveitamento da biomassa pode ser realizado por meio de várias opções tecnológicas para converter a energia da biomassa. Essas tecnologias de conversão podem liberar a energia diretamente, sob a forma de calor ou eletricidade, ou convertê-la em outra forma, como o biocombustível líquido ou biogás.

Uma rota tecnológica interessante para melhorar a eficiência econômica e reduzir os impactos ambientais das atividades agroindustriais, o qual gera efluentes e resíduos com alta taxa orgânica, é o aproveitamento energético do biogás gerado a partir da degradação anaeróbia dos resíduos orgânicos. Esse processo pode ser muito bem utilizado no tratamento de dejetos animais, sendo considerado um sistema de produção mais sustentável, devido à redução do uso de energias convencionais e fertilizantes comerciais, além de fornecer um método altamente eficiente para reciclagem de recursos e fechamento do ciclo de produção (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012).

Devido à presença majoritária de metano (CH_4) em sua composição, o biogás é caracterizado como um gás energético, configurando-se como um biocombustível com grande potencial de expandir a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira. O biogás pode ser considerado um combustível estratégico para o país, podendo se transformar em uma importante ferramenta para vencer os desafios econômicos e de infraestrutura, ao mesmo tempo em que reduz os passivos ambientais no gerenciamento de resíduos e efluentes. Além dos benefícios decorrentes do tratamento adequado dos resíduos e geração de energia renovável, o material orgânico resultante do processo de biodigestão pode ser utilizado como condicionante do solo e também como biofertilizante (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2015).

Os biodigestores permitem que o dejetos seja tratado e transformado em biogás, posteriormente podendo ser utilizado em sistemas para produção de energia, o restante da matéria pode ser convertido em biofertilizante e utilizado em lavouras, assim contribuindo com a diminuição do uso de adubos químicos. Adicionalmente, a captura do gás metano gera créditos de carbono, com valor de mercado entre países com maior índice de poluição, visando compensar a emissão excedente.

A gestão dos resíduos baseada na revalorização energética é uma das estratégias da Lei 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), propondo a prática de hábitos de consumo sustentável, propiciando o aumento da reciclagem, reutilização dos resíduos sólidos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE).

O Sul do Brasil é uma região com forte presença da agroindústria. O aproveitamento dos resíduos agroindustriais, para geração de energia térmica e elétrica pode impactar positivamente os custos de produção. Visando isso, o presente trabalho busca avaliar a potencialidade de dejetos bovinos e suínos, via digestão anaeróbia, para obtenção de biogás. Foram empregados reatores de alimentação descontínua por batelada, visando verificar a

viabilidade do aproveitamento do potencial energético dos dejetos, podendo contribuir para redução de custos com o tratamento de resíduos e de demanda energética.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Fazer um levantamento dos benefícios econômicos e ambientais da produção e utilização do biogás provindo de biomassa de dejetos animais.
- 2) Desenvolver um modelo para um sistema de produção de biogás provindo das biomassas de bovinos e suínos.
- 3) Estimar o potencial de produção de biogás provindo das biomassas de bovinos e suínos através da biodigestão anaeróbia.
- 4) Dimensionar um sistema de biodigestão anaeróbia que atenda a demanda de produção de dejetos da propriedade estudada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA E SUA IMPORTÂNCIA

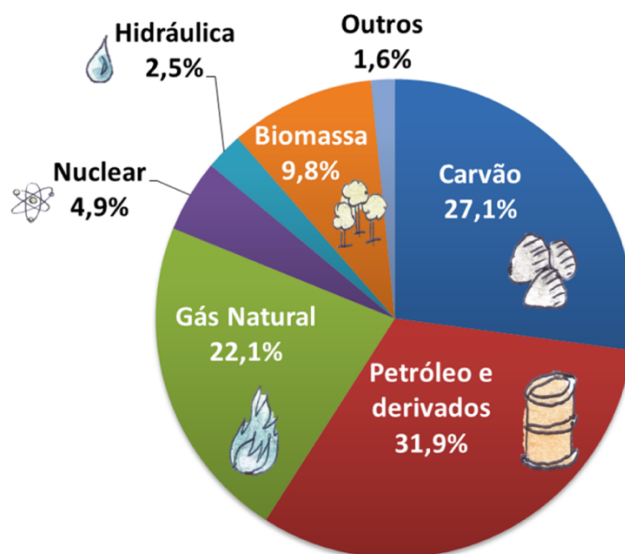
A demanda cada vez maior por energia da sociedade moderna tem trazido inúmeros benefícios para seu desenvolvimento, mas também malefícios para o meio ambiente. O intensivo uso de recursos naturais para atividades industriais, domésticas e veiculares é a origem da maior parte dos poluentes atmosféricos (MOREIRA et al., 2017).

Em 1850, a biomassa representava 85% do consumo mundial de energia e, mais ainda, antes disso era praticamente a única forma de energia usada pelo homem, além da força dos ventos (para navegação), animais domesticados (na agricultura) e pequenas quantidades de carvão para aquecimento residencial. Com a Revolução Industrial que se iniciou com o uso das máquinas a vapor no fim do século XVIII, a importância do carvão, que era pequena, usado principalmente para aquecimento residencial, aumentou para 15% em 1850 e cresceu rapidamente para 50% no fim do século XIX (GOLDEMBERG, 2009).

Nos dias de hoje os atuais padrões de produção e consumo de energia são baseados nas fontes de combustíveis fósseis, que geram emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa, e colocam em risco o suprimento à longo prazo no planeta. É necessário mudar esses padrões estimulando a produção e uso de energias renováveis, e nesse sentido o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo (GOLDEMBERG et al., 2007).

O rápido crescimento da população mundial tem acelerado a busca por energia de forma significativa, sendo ainda a maior parte dela obtida com a queima de combustíveis fósseis, não renováveis, que atualmente representam 81,1% da energia ofertada (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019). Fontes renováveis representam 9,8 % da energia disponível a nível mundial, dentro desta porcentagem de biomassa estão representados os biocombustíveis, como pode ser observado na figura 1 que mostra a oferta de energia por fonte (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

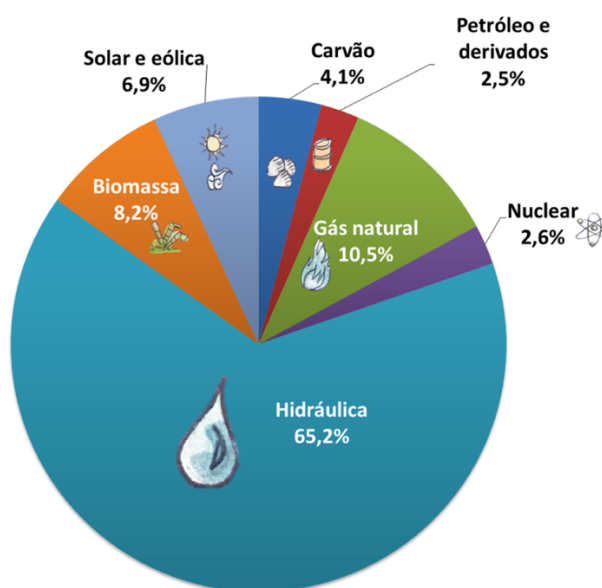
Figura 1 - Matriz energética Mundial 2016 (IEA, 2018).



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2019).

O Brasil possui muitas opções e disponibilidades de matéria prima e recursos, que diversificam sua fonte de energia, representando uma grande vantagem em comparação a outros países. A matriz elétrica de origem predominantemente renovável, apresentando 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil. Como pode ser observado na figura 2, destaca-se a geração hidráulica com 65,2% seguida pela Biomassa 8,2%, Solar e Eólica com 6,9% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018).

Figura 2 – Oferta interna de energia por fonte (EPE, 2018).



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2019).

2.1.1 Energias não renováveis e renováveis

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2019), fontes de energia não renováveis ou fontes de energia convencionais são as fontes finitas ou esgotáveis, para grande maioria, sua reposição na natureza é muito lenta, pois é resultado de um processo de milhões de anos sob condições específicas de temperatura e pressão. São exemplos de fontes não renováveis de energia: petróleo, carvão mineral, gás natural e nuclear. Hoje uma grande parte da energia consumida no mundo é proveniente de fontes não renováveis, visto que suas características e processos são bem conhecidos, além de possuírem um rendimento energético elevado e preços atrativos sendo empregados principalmente na geração de eletricidade e como combustíveis.

Já as fontes de energia renováveis, são aquelas consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem utilizadas. São exemplos de fontes renováveis: potencial hidráulico, radiação solar, eólica, geotérmica, oceânica e biomassa. Esta última, engloba diversas subcategorias como lenha, biocombustível, resíduos agrícolas e o biogás. As fontes renováveis de energia são consideradas limpas, pois emitem menos gases de efeito estufa (GEE) que as fontes fósseis e, por isso, estão conseguindo uma boa inserção no mercado brasileiro e mundial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019).

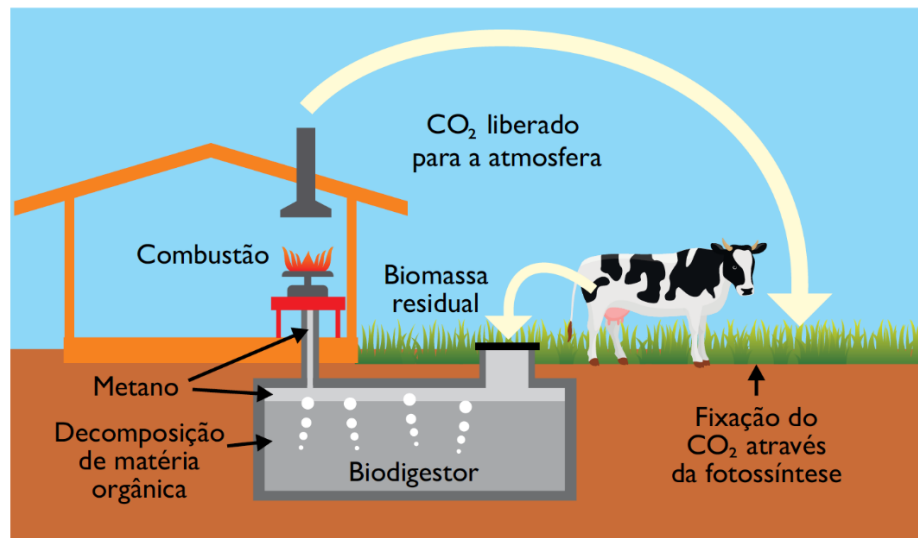
2.2 BIOMASSA

De acordo com a Aneel (2005), qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018), a biomassa destinada ao aproveitamento energético, é uma fonte primária de energia, não fóssil, que consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal.

Deste modo, a biomassa contém energia armazenada sob a forma de energia química. E em relação a sua origem, as biomassas para fins energéticos podem ser classificadas nas categorias de resíduos sólidos urbanos, resíduos da produção animal, resíduos vegetais, resíduos industriais e resíduos florestais.

A biomassa é considerada como recurso renovável porque faz parte do fluxo natural e repetitivo dos processos na natureza, sendo as plantas que iniciam o processo de fotossíntese para captar a energia solar. Quando a biomassa sofre combustão, a energia armazenada é liberada na forma de calor. Nesse processo é liberado CO₂, o qual é absorvido pelas plantas, e desta forma o ciclo do carbono é fechado (KONRAD, 2016). Como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática do ciclo do carbono.

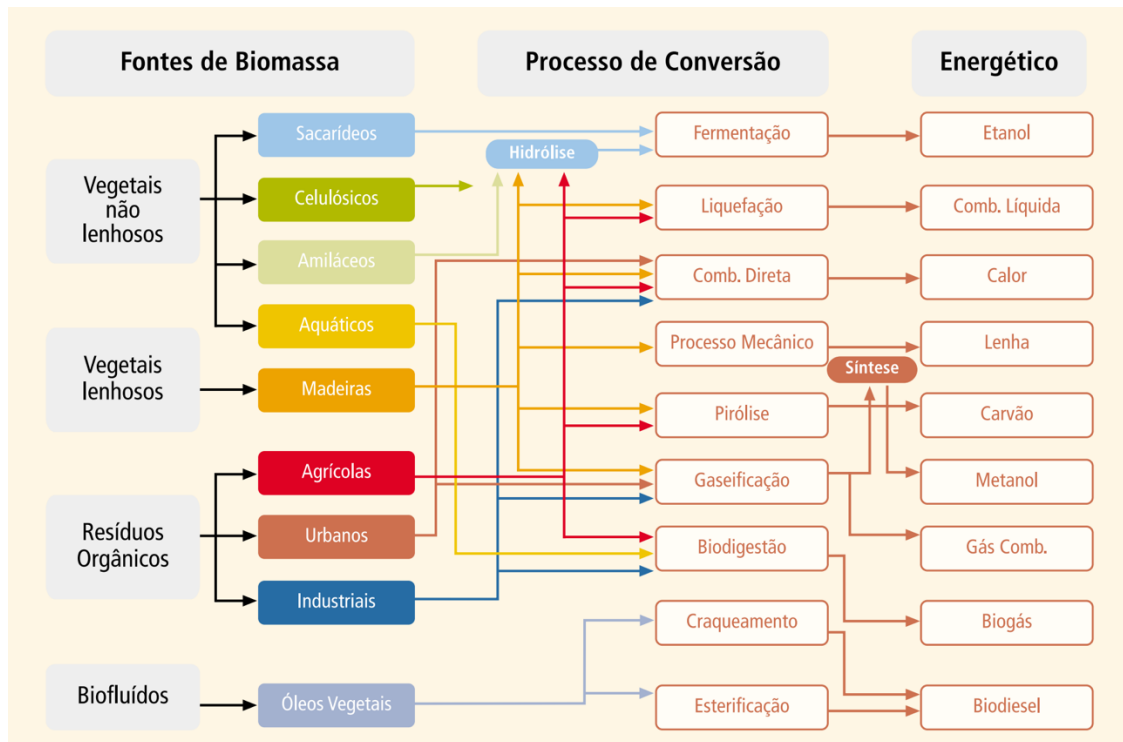


Fonte: Konrad et al., (2016).

Segundo Konrad et al. (2016) o aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio de varias opções tecnológicas para converter a energia da biomassa. Essas tecnologias de conversão podem liberar a energia diretamente, sob a forma de calor ou eletricidade, ou convertê-la em outra forma, como o biocombustível líquido ou biogás.

Todas as plantas, animais e seres vivos do sistema ecológico constituem a biomassa. Além disso, nutrientes, dejetos e bioresíduos são considerados biomassa. Apesar da biomassa ser rica em carbono a mesma não é considerada um fósil. O termo biomassa se refere a um vasto campo de materiais, com variadas e infinitas finalidades, podendo ser utilizada como combustível ou até mesmo como matéria prima. Como apresentado na Figura 4, a biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos e vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, também de resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Assim como também é possível obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais, por exemplo, mamona e soja. E assim cada fonte de biomassa tendo seu processo para conversão de energia (Figura 4).

Figura 4 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: Aneel (2005).

A energia do biogás a partir da degradação anaeróbia em estações de tratamento de dejetos animais é considerada uma opção de baixo custo, uma vez que pode beneficiar-se de créditos de carbono disponível através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Essa forma de energia de biomassa não só substitui a combustão de combustíveis fósseis, mas reduz as emissões de metano, um gás de efeito estufa mais potente do que o dióxido de carbono (GOLDEMBERG, 2009).

2.2.1 Problemática e contextualização de produção de dejetos

O Brasil possui diversos sistemas produtivos e seu vasto território reflete na diversificação dos produtos, desse modo torna-se possível atender qualquer mercado no mundo, desde nichos específicos, com carnes mais nobres, até cortes de menor valor, sob qualquer demanda ou volume. Este potencial tem motivado a busca por novas tecnologias aplicadas à suinocultura e bovinocultura nas últimas décadas, visando o desenvolvimento dos sistemas produtivos, de modo a impulsionar os índices de produtividade e colaborar para uma produção agroindustrial mais eficiente e sustentável.

Na suinocultura, os investimentos posicionaram o Brasil em quarto lugar no ranking de produção e exportação mundial, representando 10% do volume exportado de carne suína no mundo. A consequência destes investimentos refletiu no crescimento da produção que gira em

torno de 4% ao ano, sendo os estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul os principais produtores de suínos do País (EMBRAPA, 2019).

Quanto à bovinocultura, considerada um dos principais destaques do agronegócio brasileiro no cenário mundial, o Brasil aloja o segundo maior rebanho efetivo do mundo, com cerca de 200 milhões de cabeças. Além disso, desde 2004, assumiu a liderança nas exportações, com um quinto da carne comercializada internacionalmente e vendas em mais de 180 países. O rebanho bovino brasileiro proporciona o desenvolvimento de dois segmentos lucrativos: as cadeias produtivas de carne e leite. Portanto, a presença da atividade em todos os estados brasileiros evidencia a importância econômica e social da bovinocultura em nosso país (FOREST et al., 2014).

Contudo, embora a alta produtividade de suínos e bovinos proporcione o desenvolvimento econômico e social, é preciso ressaltar que este grande número de animais produz resíduos altamente poluentes. Portanto, há a necessidade de analisar as questões ambientais desta atividade econômica. Entre as alternativas viáveis atualmente, a digestão anaeróbia destes resíduos se destaca como uma forma de promover a reciclagem e a geração de energia, além do fato de que a natureza das transformações biológicas durante o processo de digestão fornece como produto final o substrato, com potencial uso fertilizante (RESENDE et al., 2015).

Seguindo o entendimento de Zanette (2009), o termo dejetos é utilizado coletivamente para designar as fezes e urina (excrementos sólidos e líquidos) produzidas pelos animais. A decomposição dos dejetos sob condições anaeróbicas durante a estocagem e tratamento produz o metano. Estas condições geralmente ocorrem quando se tem um grande número de animais mantidos em confinamento seja em fazendas de produção de leite, criação intensiva de gado, suínos ou aves, bem como quando os dejetos são dispostos em sistemas baseados em líquido.

A composição dos dejetos animais tem características diferentes e apresenta potenciais distintos para a geração de biogás. Os dejetos dividem-se em duas categorias, fase líquida e fase seca, dependendo do teor de sólidos secos que contêm em cada fase (KARLSSON et al., 2014).

A fase sólida geralmente tem um alto teor de carbono, e seu teor de sólidos secos pode ser 27% a 70% maior que na fase líquida, e também possui material fecal. Lodos são mais propensos à digestão, pois contêm maior quantidade de nitrogênio e teor de sólidos secos entre 5% e 10% (KARLSSON et al., 2014).

Geralmente, dejetos bovinos apresentam menor potencial de produção de biogás do que dejetos suínos e de aves. O principal motivo é que uma grande quantidade da matéria orgânica disponível no dejetos é degradada e convertida em metano no estômago dos animais ruminantes.

Se o dejetos for degradado juntamente com outros tipos de materiais, tais como resíduos de alimentos ou de forragem, a troca gasosa pode ser maior. Algumas vezes, o dejetos bovino pode causar um efeito estabilizador no processo de biogás, quando há algum tipo de perturbação no processo (KARLSSON et al., 2014).

A capacidade poluente dos dejetos suínos, em termos comparativos, é muito superior à de outras espécies. Utilizando-se do conceito de equivalente populacional, um suíno, em média, equivale a 3,5 pessoas. Em outras palavras, uma granja com 600 animais possui um poder poluente, segundo esse critério, semelhante ao de um núcleo populacional de aproximadamente 2.100 pessoas (EMBRAPA/EMATER, 2002).

A principal causa da poluição é o lançamento direto dos dejetos suínos sem o devido tratamento nos cursos de água, que acarreta desequilíbrios ecológicos e poluição em função da redução do teor de oxigênio dissolvido na água, disseminação de patógenos e contaminação das águas potáveis com amônia, nitratos e outros elementos tóxicos (EMBRAPA/EMATER, 2002).

A quantidade de total de dejetos produzida por um suíno varia de acordo com o seu desenvolvimento ponderal, como mostra a Tabela 1, contudo, apresenta valores decrescentes de 8,5% a 4,9% em relação a seu peso vivo/dia para a faixa de 15 a 100 kg. Cada suíno adulto produz em média de 7 a 8 litros de dejetos líquidos/dia ou 0,21 a 0,24 m³ de dejetos por mês (EMBRAPA/EMATER, 2002).

Tabela 1 - Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos.

| Categoria | Esterco (kg dia⁻¹) | Esterco + urina (kg dia⁻¹) | Dejetos líquidos (litros dia⁻¹) |
|-----------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Suínos (25 – 100 kg) | 2,30 | 4,90 | 7,00 |
| Porca gestante | 3,60 | 11,00 | 16,00 |
| Porca em lactação + leitões | 6,40 | 18,00 | 27,00 |
| Cachaço | 3,00 | 6,00 | 9,00 |
| Leitões na creche | 0,35 | 0,95 | 1,4 |

Fonte: EMBRAPA/EMATER, (2002).

No entendimento de Kunz e Oliveira (2006), a geração de biogás a partir de dejetos animais é dependente, além da temperatura, pH, alcalinidade, do manejo adotado no sistema de produção de animais confinados, também da própria característica do resíduo, que é o substrato para o crescimento dos microrganismos no biodigestor (Tabela 2). Essa diferença na capacidade de geração de biogás está associada a diversos fatores, como dieta dos animais e sistema

digestivo, que fazem com que sejam produzidos resíduos de características diferentes e com potencialidades distintas na produção de biogás.

Tabela 2 - Potencial de geração de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais.

| Animal (peso vivo) | kg esterco/animal/dia | m³ biogás/kg esterco | m³ biogás/kg SV* | m³ biogás/animal/dia |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Bovino (500 kg) | 10 - 15 | 0,038 | 0,094 - 0,31 | 0,36 |
| Suíno (90 kg) | 2,3 - 2,8 | 0,079 | 0,37 - 0,50 | 0,24 |
| Aves (2,5 kg) | 0,12 - 0,18 | 0,050 | 0,31 - 0,62 | 0,014 |

*SV: Sólidos voláteis.

Fonte: KUNZ; OLIVEIRA, (2006).

Após os dejetos passarem pelo processo digestivo no biodigestor, ou outro processo de fermentação, o material resultante do processo é o biofertilizante, com uma composição química com nutrientes que podem ser utilizados como fertilizante de culturas e pastagens.

A maior parte das granjas criadoras de suínos produzem dejetos líquidos com sólidos que variam de 1,7% a 3,0%. Os dejetos coletados em sistemas de lâminas de água e canaletas variam em conteúdo sólido de 1,7% a 2,6% e os da criação sobre cama chegam a atingir 78,5%. Outros processos criatórios e métodos de coleta líquida produzem dejetos que atingem de 3 a 4,5 % de sólidos. De acordo com a concentração de sólidos, os mesmos apresentam uma composição aproximada, como pode ser observado na Tabela 3.

As concentrações podem variar, dependendo da diluição causada pelo uso de maior ou menor quantidade de água no sistema de higienização e desperdiçada nos bebedouros. Com base nestes teores de material sólido, pode-se verificar que as quantidades de nitrogênio, fósforo e potássio variam de 3,0 a 9,0 kg/m³ (KONZEN, 2003).

Tabela 3 - Conteúdo médio de nutrientes (NPK) dos dejetos de suínos, de acordo com o teor de sólidos

| Sólidos | 0,72% | 1,63% | 2,09% | 2,54% | 3,46% | 4,37% |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nutrientes | kg/m ³ | | | | | |
| Nitrogênio | 1,29 | 1,91 | 2,21 | 2,52 | 3,13 | 3,75 |
| P ₂ O ₅ | 0,83 | 1,45 | 1,75 | 2,06 | 2,68 | 3,29 |
| K ₂ O | 0,88 | 1,13 | 1,25 | 1,38 | 1,63 | 1,88 |
| NPK | 3,00 | 4,49 | 5,21 | 5,96 | 7,44 | 8,92 |

Fonte: KONZEN, (2003).

Na Tabela 4 é apresentado os teores médios de carbono orgânico, de macronutrientes e de matéria seca.

Tabela 4 - Concentração média de nutrientes e teor de matéria seca de alguns materiais orgânicos ⁽¹⁾.

| Material Orgânico | C - org. | N ⁽²⁾ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | Ca | Mg | Matéria Seca |
|-------------------------------------------|-------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----|-----|-----------------|
| ----- % (m/m) ----- | | | | | | | |
| Cama de frango (3-4 lotes) ⁽³⁾ | 30 | 3,2 | 3,5 | 2,5 | 4,0 | 0,8 | 75 |
| Cama de frango (5-6 lotes) | 28 | 3,5 | 3,8 | 3,0 | 4,2 | 0,9 | 75 |
| Cama de frango (7-8 lotes) | 25 | 3,8 | 4,0 | 3,5 | 4,5 | 1,0 | 75 |
| Cama sobreposta de suínos | 18 | 1,5 | 2,6 | 1,8 | 3,6 | 0,8 | 40 |
| Esterco sólido de suíno | 20 | 2,1 | 2,8 | 2,9 | 2,8 | 0,8 | 25 |
| Esterco sólido bovino | 30 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 0,5 | 20 |
| Lodo de esgoto | 30 | 3,2 | 3,7 | 0,5 | 3,2 | 1,2 | 5 |
| ----- kg/m ³ ----- | | | | | | | |
| Esterco líquido de suínos | 9 | 2,8 | 2,4 | 1,5 | 2,0 | 0,8 | 3 |
| Esterco líquido de bovinos | 13 | 1,4 | 0,8 | 1,4 | 1,2 | 0,4 | 4 |

⁽¹⁾ Concentração calculada com base em material seco em estufa a 65°C. m/m = relação massa/massa.

⁽²⁾ A fração de N na forma amoniacal (N-NH₃ e N-NH₄⁺) é, em média, de 25% na cama de frangos, 15% na cama de poedeiras, 30% no lodo de esgoto, 25% no esterco líquido de bovinos e 50% no esterco líquido de suínos.

⁽³⁾ Indicações do número de lotes de animais que permanecem sobre a mesma cama.

Fonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, (2004).

No entendimento de Karlsson et al. (2014), fala-se em tratar o material em um biodigestor, ao invés de deixá-lo se decompor livremente no ambiente, isso porque o metano é 22 vezes mais impactante do que o dióxido de carbono em se tratando de aquecimento global.

Se o biogás é aproveitado de modo que o metano seja utilizado como combustível em substituição aos combustíveis fósseis, tem-se como resultado a emissão de dióxido de carbono, o qual já pertence ao seu ciclo natural. Se o biogás é apenas queimado, sem que seja aproveitada a energia nele contida, ainda assim é menos poluente que deixar o material orgânico se decompor naturalmente no meio ambiente, pois não haverá emissão de metano e sim, de dióxido de carbono. Outra opção é utilizar o material tratado como biofertilizante, disponibilizando ao solo os mesmos nutrientes contidos em terras agrícolas.

2.3 TECNOLOGIAS DOS BIODIGESTORES

Segundo Oliver et al., (2008), um biodigestor ou biorreator pode ser definido como uma câmara de fermentação fechada onde é colocado material orgânico para decomposição, essa decomposição ocorre de forma anaeróbia, ou seja, sem a presença de ar atmosférico. Desta forma os microrganismos presentes no interior da câmara degradam a matéria orgânica resultando na formação de produtos gasosos (biogás) como produto principal e biofertilizante como produto secundário.

O processo de biodigestão anaeróbia é dependente da ação de bactérias e ocorre em três fases: hidrólise ou redução do tamanho das moléculas, produção de ácidos orgânicos e produção de metano. O metano é o principal componente do biogás e não tem cheiro e nem cor, porém outros gases presentes apresentam um odor forte característico (OLIVER et al., 2008).

2.3.1 Modelos de biodigestores

Existem vários modelos de biodigestores, e na maioria são compostos basicamente por duas partes: um recipiente (tanque) para alojar e permitir a digestão da biomassa, e o gasômetro (campânula), para armazenar o biogás. Os modelos mais difundidos são chineses, indianos e canadenses, cada um com suas particularidades, porém, com objetivos semelhantes, que é criar um ambiente anaeróbio para que a biomassa seja completamente degradada. Em relação ao abastecimento da biomassa, o biodigestor pode ser classificado como contínuo ou descontínuo/batelada (GASPAR, 2003).

Segundo Karlsson (2014), nos *biodigestores de processo contínuo*, o material é bombeado de forma contínua para seu interior, o que permite que haja fluxo de matéria prima ao longo do dia e, portanto, constante produção de biogás.

Através da adição de materiais sólido-líquidos é possível que o material na entrada do biodigestor seja contínuo, tornando-se vantajoso para os microrganismos, pois haverá

distribuição uniforme de material durante o dia todo. Facilitando a interação entre os diferentes grupos de microrganismos na cadeia de degradação, e também reduz o risco de sobrecarga, caso se alimentem com uma grande quantidade de material em uma única vez. O fornecimento uniforme do substrato permite maior stress entre os microrganismos (KARLSSON et al., 2014).

Já nos modelos de *biodigestores de processo descontínuo ou batelada*, todo o material é digerido de uma única vez, sendo sempre o mesmo durante todo o processo de degradação. Não havendo adição de novo material, o que resulta em picos de produção de biogás, produzindo uma quantidade mais elevada de metano no início do processo, e assim diminuindo com o passar do tempo. Quando o material é digerido e posteriormente retirado do biodigestor, uma nova quantidade de substrato é adicionada. Esse sistema é vantajoso a partir de um material orgânico. Algumas vezes nesse processo pode ser difícil conseguir alta e constante produção de biogás, principalmente se o material tem alto teor de sólidos (KARLSSON et al., 2014).

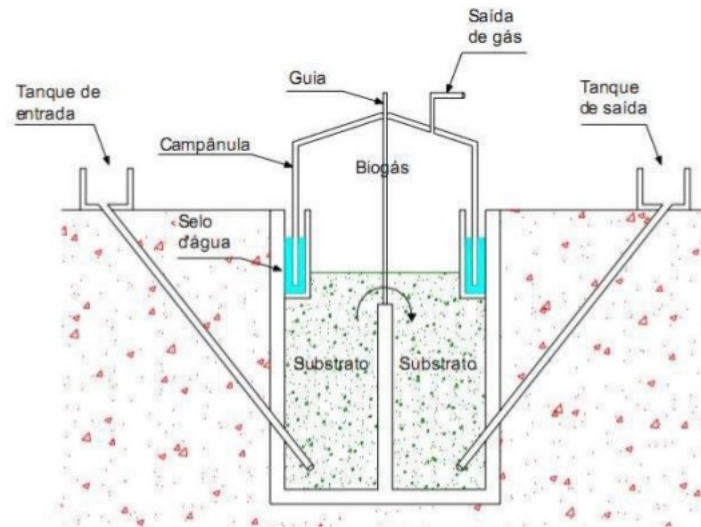
Biodigestor modelo Indiano

Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula¹ como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo d'água externo, para auxiliar na redução de perdas durante a produção do biogás. Também possui uma parede central, que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, fazendo com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação, como pode ser observado nas figuras 5 e 6.

À medida que o volume de gás produzido aumenta e não é consumido imediatamente, o gasômetro tende a se deslocar verticalmente, aumentando seu volume e mantendo a pressão de operação constante. Seu abastecimento deve ocorrer de forma contínua, e o substrato utilizado deve conter um Teor de Sólidos Totais (TST) de até 8%, com o intuito de facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara de digestão e também evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI et al., 2002).

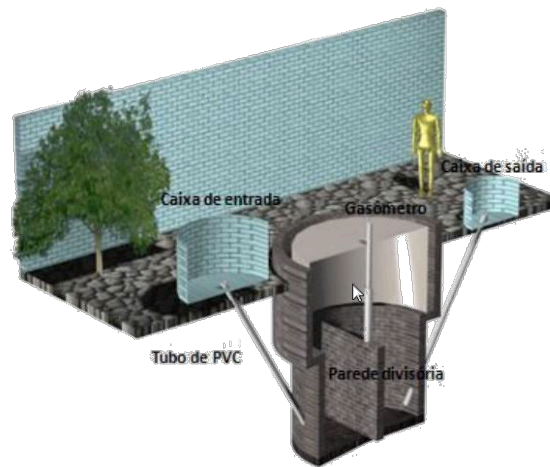
¹ Campânula: Câmara de digestão aonde o gás é armazenado.

Figura 5 - Representação de biodigestor modelo Indiano



Fonte: Araújo, (2017).

Figura 6 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo Indiano



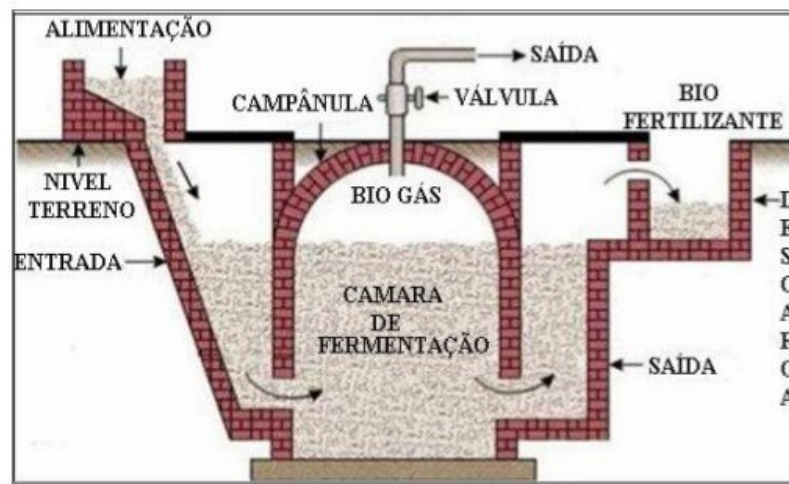
Fonte: Deganutti et al., (2002).

Biodigestor modelo Chinês

Este modelo é considerado o mais rústico, e consiste em uma câmara cilíndrica feita em alvenaria (tijolo) com teto em formato abobadado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás como pode ser observado nas figuras 7 e 8. Este modelo funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de maneira que aumentos de pressão em seu interior resultantes do acúmulo de biogás resultará em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão (EMBRAPA, 2019).

Assim como no modelo Indiano, o modelo Chinês necessita de um substrato com Teor de Sólidos Totais (TST) em torno de 8% para evitar entupimentos no sistema de entrada e facilitar a circulação do material, e sua alimentação deve ser contínua. Por poder ser construído em alvenaria, seus custos de implantação são reduzidos, contudo pode apresentar vazamentos do biogás caso sua estrutura não esteja impermeabilizada e vedada de maneira satisfatória (DEGANUTTI et al., 2002).

Figura 7 - Biodigestor modelo Chinês.



Fonte: Oliveira, Souza e Francisco (2017).

Figura 8 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo Chinês



Fonte: Deganutti et al., (2002).

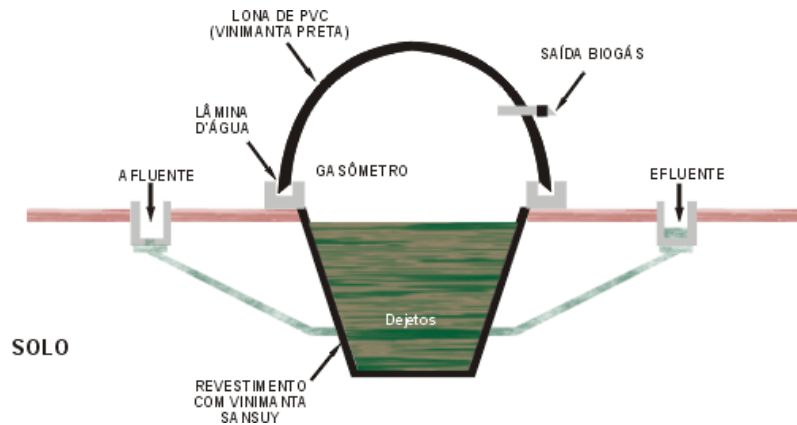
Biodigestor modelo Canadense ou modelo da marinha

Este modelo apresenta tecnologias mais modernas se comparado aos modelos Indiano e Chinês, mesmo que possua uma construção mais simples. É construído na horizontal, tem largura maior que a profundidade, podendo sua câmara de biodigestão ser construída abaixo do

nível do solo ou não, sua principal vantagem é apresentar uma maior área exposta ao sol, aumentando a taxa de biodigestão (JUNQUEIRA, 2014).

Sua cúpula (gasômetro) é constituída por uma manta maleável em PVC, que infla conforme o volume de biogás em seu interior aumenta, como pode ser observado nas figuras 9 e 10.

Figura 9 - Representação de biodigestor modelo Canadense



Fonte: IENGEP (2012).

Figura 10 - Biodigestor modelo Canadense instalados em propriedade rural



Fonte: Torres, Pedrosa e Moura, (2012).

Biodigestor modelo Alemão

Para Silva (2017), a Alemanha investiu fortemente no desenvolvimento de biotecnologia para o setor de biodigestão anaeróbia, e atualmente dispõe de tecnologia avançada para a construção de sistemas eficientes. Com projetos altamente eficientes, demandam de altos investimentos iniciais, e assim inspiram criadores a tentar desenvolver projetos mais baratos. A figura 11 apresenta um biodigestor modelo alemão.

Figura 11 - Biodigestor modelo Alemão



Fonte: Silva, (2017).

O biodigestor modelo Alemão é construído acima do solo, em formato redondo. Este modelo possui um processo altamente controlável e estável, sendo equipado com agitadores mecânicos que proporcionam uma boa mistura e produção contínua de gás. Possuindo também isolamento térmico e aquecimento para uma digestão rápida (SILVA, 2017).

2.3.2 Escolha do tipo de Biodigestor

A escolha adequada do biodigestor, para determinado resíduo particular, é o principal fator para o desenvolvimento e processo adequado. Assim, é importante entender seus princípios de operação para ajudar na seleção e planejamento de um modelo de tratamento a partir da biodigestão anaeróbia. A importância desse conhecimento está relacionada à elevada produção de metano e a taxas de produção do biogás, que são dependentes da relativa contribuição do resíduo e custo do biodigestor para assim estimar o custo final do biogás (FUKAYAMA, 2008).

Segundo Fukayama (2008), para estabelecer relações entre os principais tipos de biodigestores e suas características, é de suma importância o conhecimento de três parâmetros básicos que influenciam no modo de operação e em suas eficiências na produção do biogás, que são:

- Tempo de Retenção de Microrganismos (TRM);
- Tempo de Retenção Hidráulica (TRH);
- Tempo de Retenção e Sólidos (TRS).

O TRH é compreendido como o intervalo de tempo necessário de permanência do afluente para que ocorra o processo de biodigestão de maneira adequada. Os TRM e TRS são os tempos de permanência dos microrganismos e dos sólidos no interior dos biodigestores, esses tempos

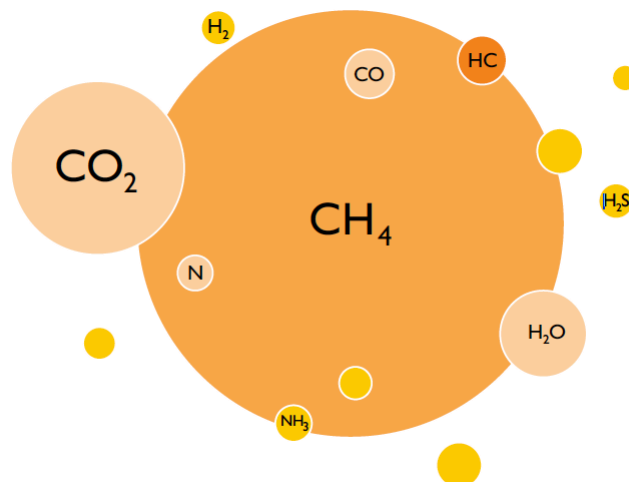
são expressos em dias. De forma resumida pode-se dizer que altas produções de metano são conseguidas, satisfatoriamente, com longos TRM e TRS. Porém quando se utiliza biodigestores do tipo batelada, é considerado apenas o TRH (FUKAYAMA, 2008).

A utilização de biodigestores apresenta algumas vantagens que podem ser levadas em consideração, tais como baixo custo operacional e de implementação, simplicidade de operação, manutenção e controle, pode ser instalado em pequenas áreas e tem elevada vida útil, além de produzir o biogás que pode ser transformado em energia térmica, mecânica ou elétrica, também produz biofertilizante que tem alto poder fertilizante e pode ser usado na agricultura em substituição aos adubos químicos (SAMULAK et al., 2010).

2.4 PRODUÇÃO DO BIOGÁS E DO BIOFERTILIZANTE

Segundo Persson et al. (2006), o biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da digestão anaeróbia, ou seja, pela biodegradação de matéria orgânica através da ação de bactérias na ausência de oxigênio, composto primariamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), traços de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), carboidratos saturados e halogenados e oxigênio (O_2) estão ocasionalmente presentes no biogás, na Figura 12 pode-se observar uma representação esquemática da composição do biogás.

Figura 12 - Representação esquemática da composição do biogás



Fonte: Konrad et al., (2016).

Como pode ser observado na tabela 1, a composição e o conteúdo energético do biogás podem variar de acordo com o material orgânico utilizado e o processo pelo qual foi produzido.

Trata-se de um processo que também pode ocorrer naturalmente em lagos, rios, pântanos e mangues, e é uma parte importante do ciclo bioquímico do carbono. (PERSSON et al., 2006).

Tabela 5 - Características e composição do biogás de diferentes fontes.

| Parâmetro | Gás de aterros¹ | Biogás – digestão anaeróbia² |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| Poder calorífico inferior (MJ/Nm ³) | 16 | 23 |
| Metano (% vol.) | 35-65 | 53-70 |
| Dióxido de carbono (% vol.) | 15-50 | 30-47 |
| Nitrogênio (% vol.) | 5-40 | - |
| Ácido sulfídrico (ppm) | <100 | <10000 |
| Amônia (ppm) | 5 | <100 |

¹ Produzido a partir da matéria orgânica e resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

² Produzido a partir da matéria orgânica e resíduos agropecuários em reatores anaeróbicos.

Fonte: Adaptação de PERSSON et al., (2006, p. 6).

Segundo Weiland (2009), a produção de biogás através de digestão anaeróbia oferece significativas vantagens sobre outras formas de produção de bioenergia. A geração de energia através do biogás reduz drasticamente a emissão de gases de efeito estufa (GEE) se comparada aos combustíveis fósseis, podendo utilizar recursos disponíveis localmente. Além disso, a queima do combustível transforma o metano em dióxido de carbono, o qual é 23 vezes menos poluente em termos de impacto sobre mudanças climáticas.

Contudo, Lora et al. (2012) comentam, que a utilização do biogás não deve ser tida como a solução para os problemas energéticos do país, mas como uma complementação para a matriz atual, que deve ser composta por várias fontes alternativas. Com grande aplicação no setor agroindustrial, o uso do biogás como matéria prima para a geração de energia elétrica está diretamente ligado à sustentabilidade e tem se mostrado muito interessante, tanto para geração de energia elétrica como alternativa para a disposição de resíduos sólidos e efluentes orgânicos.

2.4.1 Caracterização da biomassa

Diferentes tipos de materiais orgânicos podem ser decompostos em um biodigestor e utilizados para a produção de biogás. Os substratos mais comuns para a produção de biogás são os resíduos de frigoríficos, de indústria de alimentos e dejetos. Futuramente, outros resíduos provenientes do setor agrícola se tornarão importantes substratos para produção de biogás. Os materiais usados com menos frequência são algas, ervas, madeira e penas de galinha.

Segundo Karlsson et al., (2014), existem alguns materiais que têm mais potencial que outros, isso porque alguns fatores devem ser levados em consideração, como a quantidade de substrato, a temperatura, o tempo de retenção etc., influenciando o pré-tratamento ao qual o material foi submetido na geração de biogás. Por exemplo, se o material vai ser digerido na presença de outro substrato ou não, pois muitas vezes adiciona-se inóculo para acelerar o processo de decomposição. A presença de substâncias tóxicas e lignina, que não são metabolizadas em um processo de digestão anaeróbia, também são limitantes na produção de biogás.

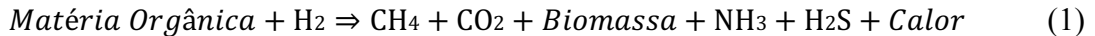
Os substratos são compostos por diferentes moléculas orgânicas, sendo que, na maioria dos casos, um grupo de substâncias predomina. É possível observar que substratos com alto teor de carboidratos (cana-de-açúcar, restos de frutas) são convertidos mais rapidamente em biogás, enquanto os que contêm elevado teor de gordura (ex. plantas oleaginosas) são convertidos mais lentamente, atingindo maiores taxas de produção (PROBIOGÁS, 2015).

A composição dos substratos oriundos de animais tem características diferentes e apresenta potenciais distintos para a geração de biogás. Os dejetos dividem-se em duas categorias, fase líquida e fase seca, dependendo do teor de sólidos secos que contêm em cada fase. A fase sólida geralmente tem um alto teor de carbono, e o teor de sólidos secos entre 27% e 70% maior que na fase líquida, e também contêm material fecal. Lodos são mais acessíveis à digestão, pois contêm maior quantidade de nitrogênio e teor de sólidos secos entre 5% e 10%.

Geralmente, dejetos bovinos apresentam menos potencial de produção de biogás do que os de suínos e de aves. O motivo é que uma grande quantidade da matéria orgânica disponível no dejetos é degradada e convertida em metano no estômago dos animais ruminantes. Se o dejetos for degradado juntamente com outros tipos de materiais, tais como resíduos de alimentos ou de forragem, a troca gasosa pode ser maior. Algumas vezes, o dejetos bovino pode causar um efeito estabilizador no processo de biogás, quando há algum tipo de perturbação no processo. Além disso, a diluição pode diminuir os níveis de componentes inibidores, tais como amoníaco ou ácidos graxos voláteis. O dejetos que apodrece também oferece muitos benefícios ambientais, sobretudo a redução das emissões de metano. Dejetos de suínos e aves contêm mais proteína do que o dejetos bovino, o que pode resultar em inibição no processo causada pela amônia, quando eles são digeridos na ausência de material rico em carbono (KARLSSON et al., 2014).

2.4.2 Digestão anaeróbica

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). A representação da digestão anaeróbia pode ser descrita pela equação (1), (LUSTOSA; MEDEIROS, 2014).



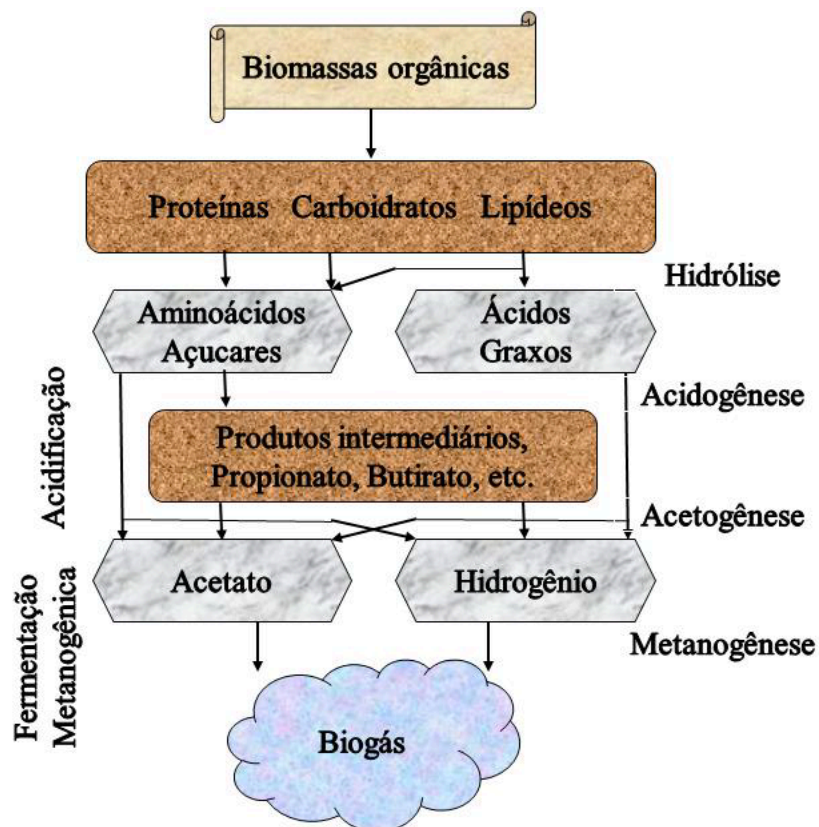
Conforme Reis (2012) explica, a digestão anaeróbia é um processo bioquímico de estabilização da matéria orgânica que ocorre em quatro fases, através da atuação de diferentes tipos de microrganismos anaeróbios (na ausência de oxigênio).

- a) Hidrólise: fase em que matérias orgânicas complexas (carboidratos, proteínas e lipídios), são fragmentadas e convertidas em compostos dissolvidos de menor peso molecular por meio de exoenzimas, enzimas que são excretadas por bactérias fermentativas, também denominadas bactérias hidrolíticas. As proteínas são degradadas em (poli) peptídeos, os carboidratos em açúcares solúveis (mono e dissacarídeos) e os lipídeos, em ácidos graxos de cadeia longa (C15 a C17) e glicerol. Em certas situações, a alta complexidade do material orgânico pode resultar em uma baixa velocidade de hidrólise, tornando-se a etapa limitante de todo o processo de digestão (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).
- b) Acidogênese: por meio de bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias, os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis de cadeia curta (AGV), álcoois, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, para além de novas células bacterianas. A acidogênese é executada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, principalmente as espécies Clostridium e Bacteroids.
- c) Acetogênese: os produtos metabólicos da fase anterior servem como substrato a outro grupo de bactérias que os transformam em moléculas de menor peso molecular. As bactérias acetogênicas, na digestão anaeróbia, tem como principal função a produção de acetato, CO₂ e H₂, que em seguida são convertidas pelas Arqueas metanogênicas (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).
- d) Metanogênese: compreendida como a etapa final do processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono; é efetuada pelas bactérias metanogênicas. As bactérias metanogênicas utilizam apenas um limitado

número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Elas são divididas em dois grupos principais: o primeiro que forma metano a partir de ácido acético ou metanol, e o segundo que produz metano a partir do hidrogênio e dióxido de carbono.

Na Figura 13, é apresentado um esquema que inclui as quatro fases do processo de digestão anaeróbia. Sendo assim, a digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo, composto de diversas reações sequenciais, cada uma com determinadas populações microbianas.

Figura 13 - Sequência do sistema de biodigestão anaeróbia.



Fonte: Hepp, (2016).

2.4.3 Condições operacionais dos biodigestores

A produção de biogás a partir de um determinado volume do biodigestor pode variar em relação a vários fatores, tais como, temperatura ambiente, acidez, homogeneidade do substrato, entre outros fatores. Outro fator que influencia na produção é o modelo de biodigestor implementado. Essas variações fazem com que a determinação exata de produção de biogás por um biodigestor seja difícil (ARAÚJO, 2017).

- 1) Temperatura: As milhares de bactérias coexistentes durante a biodigestão trabalham em temperaturas diferentes uma das outras. Cada grupo de bactérias possui uma temperatura ideal de trabalho onde sua eficiência é maior.

Pode-se então classificar os microrganismos de acordo com o a sua mais elevada eficiência térmica em três principais grupos: Psicofílicos ($T < 25^{\circ}\text{C}$), Mesofílicos (de 37 a 42°C) e Termofílicos (entre 50 e 60°C). A maior parte das bactérias da Metanogênese são Mesofílicas e trabalham em uma temperatura de aproximadamente 39°C . Variações nessa temperatura podem até anular quase que completamente a produção de biogás de um sistema.

- 2) Acidez (pH): A acidez segue pelo mesmo princípio da temperatura. Cada grupo de bactérias possuem seu ponto ideal de acidez. Nas fases da hidrólise e da acidogênese o pH ideal fica em torno de $5,2$ a $6,3$. Já na Acetogênese e Metanogênese o pH ideal fica entre $6,5$ a 8 .

- 3) Homogeneidade do substrato: A eficiência na geração de biogás tem sua íntima ligação com o processo de mistura do substrato. Substrato não misturados tendem a formar camadas de acordo com a densidade da mistura no substrato. A maior parte das bactérias se acumulam no fundo do fermentador, devido a diferença de densidade enquanto que a maior parte do substrato fica na parte de cima. Nesse caso, devido a diminuição do contato entre as bactérias e o substrato, a geração de biogás diminui essencialmente. Devido a uma codependência das bactérias da Acetogênese e da Metanogênese, uma mistura excessiva pode ser prejudicial para a fase anaeróbia deste processo, pois essas bactérias precisam estar próximas umas das outras.

- 4) Concentração de oxigênio: As bactérias da Metanogênese trabalham de forma anaeróbia, ou seja, na completa ausência de oxigênio. Os mais baixos índices de concentração de oxigênio já podem reduzir significativamente a ação dessas bactérias. Por isso é de extrema importância um perfeito isolamento dos fermentadores. Se o biogás for usado para a geração de energia elétrica, acrescentamos então um gerador elétrico acoplado a um motor de combustão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no período de 04/10/2019 a 12/11/2019 totalizando 40 dias. Os biorreatores foram mantidos em condições naturais de temperatura e ambiente no campus da UFSM em Cachoeira do Sul – RS. A proposta do presente trabalho foi avaliar de forma quantitativa a potencialidade de dejetos bovinos e suínos para geração de biogás através de biodigestão anaeróbia. Na sequência, está descrito com maiores detalhes os materiais e métodos que serão utilizados para a realização dos experimentos.

3.1 BIOMASSAS UTILIZADAS E ORIGEM

Para a realização deste trabalho, as amostras foram coletadas na cidade de Santa Maria, região central do Rio Grande do Sul. Os dejetos bovinos foram coletados na propriedade 1, do Sr. Bruno de Pelegrini Santini, localizada em Pains, terceiro distrito de Santa Maria – RS, e conta com as atividades de agricultura e bovinocultura de leite. Essa propriedade conta com um rebanho total de 85 animais em regime de semiconfinamento, sendo 50 vacas em lactação e o restante dos animais sendo novilhas e vacas secas. Cerca de 35 litros de dejetos foram coletados após o procedimento de ordenha, onde é feita a limpeza do ambiente. Os dejetos suínos foram coletados no setor de suínos do departamento de Zootecnia da UFSM, onde há 3 matrizes com 7 leitões em média cada. Os dejetos gerados são conduzidos a um reservatório central, aonde é armazenado e de onde foram coletados aproximadamente 35 litros (Figura 14).

Figura 14 – Amostras de dejetos suínos.



Fonte: O autor.

De cada amostra de dejetos coletados foram separadas frações para estimativa de Sólidos Totais (ST) no início e ao final do experimento. Aproximadamente 30 ml de dejetos foram

pesados em balança semi-analítica modelo Marte AD-330 que conta com uma precisão de 0,001g e secos em uma estufa marca Nova modelo NI-1515 a 105°C até atingir massa constante.

O pH foi medido com papel indicador especial (pH – Fix 0-14, Machery Nagel) nas biomassas antes e após o biodigestor.

Os dados de temperatura média do ar e outros fatores climatológicos foram obtidos por meio da Estação meteorológica automática iMETOS 3.3, modelo IMT300.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS PARA O MODELO

A pesquisa foi realizada em escala reduzida no *campus* da UFSM - Cachoeira do Sul, sendo desenvolvido dois modelos de biodigestores, um primeiro sendo operado por batelada e um segundo modelo sendo operado por fluxo contínuo.

1) No modelo por batelada foram utilizados os materiais descritos na Tabela 6:

Tabela 6 - Componentes utilizados para construção do modelo por batelada.

| Componente | Medida | Quantidade |
|--------------------------------------------------|---------------|-------------------|
| Galão de água vazio | 20 litros | 1 |
| Luva LR PVC | 40 x 1.¼” | 1 |
| Plug roscável | 1.¼” | 1 |
| Espigão para mangueira | ¼ x ¼ | 1 |
| Manga cristal | ¼ x 1,5 | 1 metro |
| Válvula esfera mini | ¼; | 1 |
| Abraçadeira borboleta | | 1 |
| Borracha silicone | | 1 |
| Fita veda rosca | | 1 |
| Adesivo plástico cola cano | | 1 |
| Mangueira para bomba de encher pneu de bicicleta | | 1 |
| Câmara de ar | | 1 |

Fonte: O autor.

Figura 15 – Modelo de biodigestor por batelada.



Fonte: O autor.

2) No modelo contínuo foram utilizados os materiais listados na Tabela 7:

Tabela 7 - Componentes utilizados para construção do modelo contínuo.

| <i>Componente</i> | <i>Medida</i> | <i>Quantidade</i> |
|--------------------------------------------------|---------------|-------------------|
| Galão de água vazio | 20 litros | 1 |
| Adaptador com flange | 25 x ¾ | 2 |
| Tubo PVC soldável | 25 mm | 1 metro |
| Caps roscável | ¾ | 2 |
| LR adaptador | 25 x ¾ | 2 |
| Luva LR PVC | 40 x 1.¼" | 1 |
| Plug roscável | 1.¼" | 1 |
| Espigão para mangueira | ¼ x ¼ | 1 |
| Manga cristal | ¼ x 1,5 | 1 metro |
| Válvula esfera mini | ¼; | 1 |
| Abraçadeira borboleta | | 1 |
| Borracha silicone | | 1 |
| Fita veda rosca | | 1 |
| Adesivo plástico cola | | 1 |
| cano | | |
| Mangueira para bomba de encher pneu de bicicleta | | 1 |
| Câmara de ar | | 1 |

Fonte: O autor.

Figura 16 - Modelo de biodigestor de forma contínua.



Fonte: O autor.

3.3 PRODUÇÃO DO BIOGÁS E DO BIOFERTILIZANTE

O presente trabalho baseou-se em duas principais metodologias de estimativa do potencial de produção de metano e biogás desenvolvidas ou adaptadas por:

- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2006);
- Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás – ER (2009).

Neste trabalho, utilizou-se a metodologia original e a única adaptação foi a equivalência do resultado final de metano para biogás, considerando que o metano representa 60% do biogás.

a) Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2006):

Esta metodologia mensura as emissões de gás metano (CH_4), que é um gás de potencial efeito estufa, na atmosfera proveniente de tratamentos biológicos para os dejetos. Para este trabalho, utilizou-se a metodologia para o cálculo de emissões provenientes da digestão anaeróbia. A equação utilizada é a equação 3 apresentada abaixo:

Cálculo do fator de emissão de metano por animal:

$$FEM = SV * 365 * \beta_0 * 0,67 * \frac{FCM}{100} * SM \quad (2)$$

Onde:

FEM $\text{kg}_{\text{CH}_4} \text{cab}^{-1} \text{ano}^{-1}$ fator de emissão de metano por população/categoria

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| SV | $\text{kg}_{\text{SV}} \text{cab}^{-1} \text{dia}^{-1}$ | sólidos voláteis |
| β_o | $\text{m}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$ | capacidade de produção de metano pelo dejetos |
| 0,67 | adimensional | conversão de m^3 de metano para kg de metano |
| FCM | % | fator de conversão de acordo com o manejo |
| SM | adimensional | fator do sistema de gerenciamento dos resíduos |

Cálculo da emissão de metano da propriedade:

$$\text{CH}_4 \text{ dejetos} = \sum FEM * N \quad (3)$$

Onde:

| | | |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| $\text{CH}_4 \text{ dejetos}$ | $\text{Kg}_{\text{CH}_4} \text{ano}^{-1}$ | emissão de metano durante o manejo de dejetos |
| FEM | $\text{kg}_{\text{CH}_4} \text{cab}^{-1} \text{ano}^{-1}$ | fator de emissão de metano por população/categoria |
| N | número inteiro | número de animais da categoria em questão |

Tabela 8 – Valores tabelados da metodologia do IPCC para parâmetros qualitativos.

| Categoria | SV⁽¹⁾ (kg cab⁻¹ dia⁻¹) | β_o⁽²⁾ (m³_{CH₄}.kg_{SV}⁻¹) | FCM⁽³⁾ (%) | SM⁽⁴⁾ |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Suínos | 0,3 | 0,29 | 0,79 | 1 |
| Vacas em lactação | 2,9 | 0,13 | 0,79 | 1 |
| Outros bovinos | 2,5 | 0,1 | 0,79 | 1 |

⁽¹⁾SV= Sólidos Voláteis.

⁽²⁾ β_o = Capacidade de produção de metano pelo dejetos.

⁽³⁾FCM = Fator de conversão de acordo com o manejo.

⁽⁴⁾SM = Fator do sistema de gerenciamento dos resíduos.

Fonte: Adaptado de IPCC, 2006.

b) Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás – ER (2009).

Esta metodologia desenvolvida pelo CIBiogás – ER (2009) estima a produção de biogás e foi elaborada baseando-se na metodologia e nos parâmetros descritos no IPCC (2006). Ressalta-se que, na metodologia desenvolvida pelo CIBiogás – ER, foram adicionados dados referentes a massa dos animais e fração anual de permanência (suínos) e a fração diária de confinamento (bovinos), além de equações para calcular a produção de dejetos, conforme equações 4, 5, 6, 7 e 8 e tabela 9 que descreve os valores dos parâmetros qualitativos de metodologia.

Suínos:

Cálculo da produção diária de dejetos suínos:

$$PDDS = \sum(N^o * PE) \quad (4)$$

Onde:

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| PDDS | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ dia}^{-1}$ | produção diária de dejetos suínos da categoria animal |
| Nº | número absoluto | número de cabeças pertencentes a categoria animal |
| PE | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ cab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ | produção específica de dejetos suínos por categoria |

Cálculo da produção anual de dejetos suínos:

$$PADS = \sum(PDDS * 365 * FAP) \quad (5)$$

Onde:

| | | |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| PADS | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ ano}^{-1}$ | produção anual de dejetos suínos da categoria animal |
| PDDS | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ dia}^{-1}$ | produção diária de dejetos suínos da categoria animal |
| FAP | adimensional | Fração anual de permanência (entre 0 e 1) |

Bovinos:

Cálculo da produção diária de dejetos bovinos:

$$PDDB = \sum(N^\circ * TC * PE) \quad (6)$$

Onde:

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| PDDB | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ dia}^{-1}$ | produção diária de dejetos bovinos da categoria animal |
| Nº | número absoluto | número de cabeças pertencentes a categoria animal |
| TC | tempo de confinamento | horas de confinamento por dia |
| PE | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ cab}^{-1} \text{ hora}^{-1}$ | produção específica de dejetos bovinos por categoria |

Cálculo da produção anual de dejetos bovinos:

$$PADB = \sum(PDDB * FAC) \quad (7)$$

Onde:

| | | |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| PADB | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ ano}^{-1}$ | produção anual de dejetos bovinos |
| PDDS | $m^3_{\text{dejetos}} \text{ dia}^{-1}$ | produção diária de dejetos suínos da categoria animal |
| FAC | adimensional | Fração anual de confinamento (entre 0 e 1) |

Cálculo da produção diária de biogás:

$$PDB = N^\circ \left(\frac{PM}{PP} \right) * FDC * SV_{\text{padrão}} * \left(\frac{FCM * B_0 * fb}{CH_4} \right) \quad (8)$$

Onde:

| | | |
|-----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| PDB | $m^3 \text{ dia}^{-1}$ | produção diária de biogás |
| Nº | número absoluto | número de animais |
| PM | kg | peso médio |
| PP | kg | peso padrão |
| FDC | adimensional | Fração diária de confinamento (entre 0 e 1) |
| SV | $kg_{SV} \text{ cab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ | produção diária de dejetos bovinos da categoria animal |
| FCM | adimensional | fator de conversão de metano para a linha de base do sistema |
| β_o | $m^3_{CH_4}.kg_{SV}^{-1}$ | capacidade de produção de metano pelo dejetos |
| f_b | adimensional | fator de correção de incertezas |
| CH₄ | % | porcentagem de metano no biogás |

Tabela 9 - Valores tabelados da metodologia do CIBiogás-ER para parâmetros qualitativos.

| Categoria | SV⁽¹⁾ ($kg_{SV} \text{ cab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) | β_o⁽²⁾ ($m^3_{CH_4}.kg_{SV}^{-1}$) | FCM⁽³⁾ | F_b⁽⁴⁾ | %CH₄ |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| | | | (%) | | |
| Suínos | 0,3 | 0,29 | 0,78 | 0,94 | 60 |
| Vacas em lactação | 4 | 0,18 | 0,78 | 0,94 | 60 |
| Outros bovinos | 2,5 | 0,1 | 0,78 | 0,94 | 60 |

⁽¹⁾SV= Sólidos Voláteis.

⁽²⁾ β_o = Capacidade de produção de metano pelo dejetos.

⁽³⁾FCM = Fator de conversão de acordo com o manejo.

⁽⁴⁾ F_b = Fator de correção de incertezas.

Fonte: Adaptado de Mito et al. (2018).

3.4 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Para dimensionar um biodigestor inicialmente é necessário escolher qual modelo de biodigestor será utilizado. Existem diversos tipos de biodigestores, sendo que cada um possui suas particularidades e é específico para a realidade do local onde será construído, conforme já foi abordado no item 2.3.1. Para a propriedade 2 onde encontram-se os suínos, optou-se em utilizar o biodigestor modelo Indiano de fluxo contínuo em função da quantidade de dejetos produzidos, e os cálculos foram baseados de acordo com Araújo et al. (2018).

O volume do biodigestor (V_b) pode ser obtido através do produto do tempo de retenção hidráulica (TRH) pela carga diária (VC), conforme a equação abaixo:

$$V_b = VC * TRH \quad (9)$$

O diâmetro do tanque de digestão (D_{tanque}) é calculado através da equação abaixo, onde h é a altura do biodigestor:

$$D_{\text{tanque}} = \sqrt{\frac{(Vb)*4}{h*\pi}} \quad (10)$$

As dimensões da caixa de entrada (D_{carga}) devem ser suficientes para que seu volume suporte o volume de carga diária, com acréscimo de 20%. Logo, o volume do tanque de alimentação é calculado pela seguinte equação:

$$D_{\text{carga}} = \sqrt{\frac{(PDDS*2)*1,20*4}{hc*\pi}} \quad (11)$$

A caixa de carga deve ser construída com o piso a 20 centímetros de altura acima do nível da borda do tanque de digestão. Diferentemente do tanque de digestão e da caixa de carga, que possuem formato cilíndrico, a caixa de descarga apresenta formato retangular e será dividida em dois compartimentos. De acordo com Oliver et al., (2008), ela deve ser dimensionada com no mínimo três vezes o volume da carga diária para permitir o armazenamento do biofertilizante. De modo que:

$$V_{\text{descarga}} \geq 3 * V_{\text{carga}} \quad (12)$$

$$V_{\text{descarga}} = hd * L * C \quad (13)$$

$$C = \frac{V_{\text{descarga}}}{hd*L} \quad (14)$$

A borda da caixa de descarga deve ficar 20 cm abaixo do nível da borda do tanque de digestão.

3.5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para a estimar o volume de gás produzido utilizou-se as equações 15 e 16:

$$V = \pi * h * (Re^2 * Ri^2) \quad (15)$$

Onde:

| | | |
|-----------|----------------|------------------------------------------------|
| V | m ³ | Volume de biogás produzido |
| h | m | Largura da banda de rodagem (altura da câmara) |
| Re | m | Raio externo da câmara |
| Ri | m | Raio interno da câmara |

Para estimar o volume da pressão atmosférica que ocupa este espaço, utiliza-se a lei dos gases, mantendo temperatura e quantidade do gás constantes:

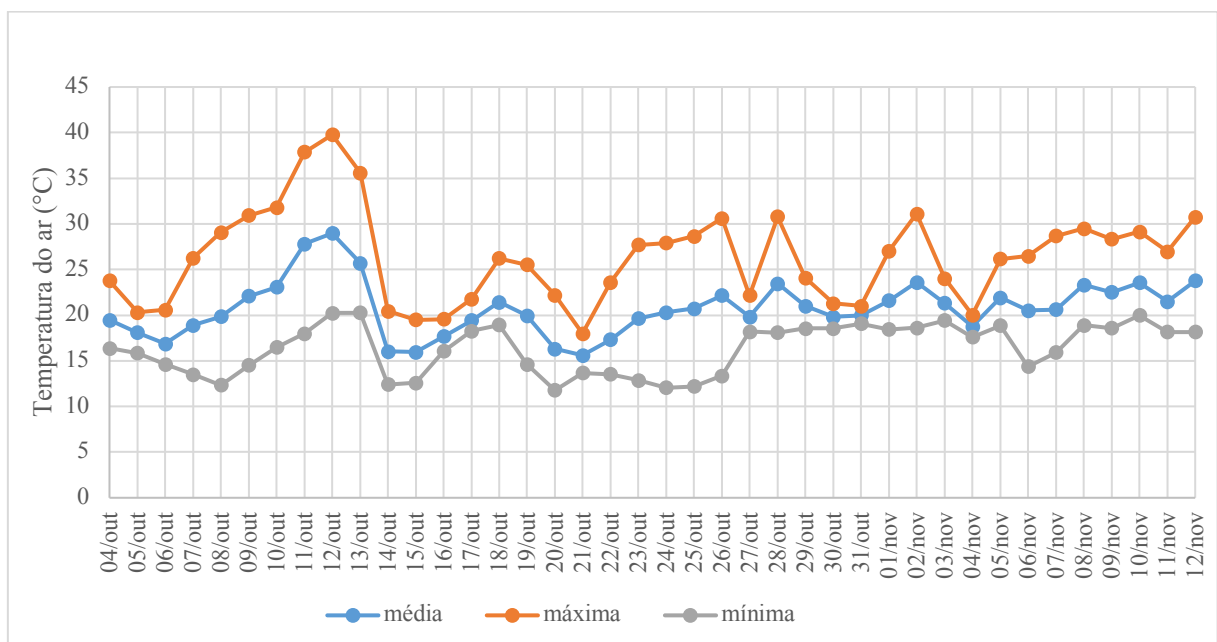
$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \quad (16)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES E BIOMASSAS

Os dados de temperatura média do ar e outros fatores climatológicos foram obtidos por meio da Estação meteorológica automática iMETOS 3.3, modelo IMT300. A temperatura média e média das máximas e mínimas diárias dos 40 dias de funcionamento dos biodigestores são apresentados na figura 17.

Figura 17 - Médias diárias de temperatura do ar nos dias de funcionamento dos biodigestores.



Fonte: Estação meteorológica automática iMETOS da UFSM campus Cachoeira do Sul

A estimativa do pH e a determinação de sólidos totais (ST) realizadas nas biomassas de dejetos suínos e bovinos antes e após os 40 dias no biodigestor são apresentadas na tabela 10. Foi possível observar uma redução de 36,32% e 3,98% de sólidos totais nas biomassas de suínos e bovinos, respectivamente. Enquanto foi observado uma tendência de aumento do pH nos dejetos de suínos, o oposto foi observado para bovinos.

Tabela 10 – Valores do pH e percentual de Sólidos Totais presentes nos dejetos avaliados no primeiro dia e último dia de experimento.

| | Dejetos | pH | Massa inicial (g) | Massa final (g) | Sólidos Totais (%) |
|---------------|----------------|-----------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| <i>Antes</i> | Suínos | 7,0 | 24,989 | 0,501 | 2,01 |
| | Bovinos | 7,0 | 29,047 | 1,856 | 6,53 |
| <i>Depois</i> | Suínos | 7,0-8,0 | 28,392 | 0,363 | 1,28 |
| | Bovinos | 6,0-7,0 | 33,379 | 2,243 | 6,27 |

Fonte: O autor.

A alteração do pH ao longo do processo de degradação anaeróbia ocorre devido as diferentes fases com atuação específica de diferentes microrganismos, já que existe uma faixa de pH ideal para cada uma delas (FERREIRA et al. 2017). A produção do gás tem sua ótima velocidade com pHs entre 7 e 8, e temperatura ao redor de 35 °C (TURDERA; YURA, 2006). Em pHs menores que 7 a geração do gás pode ser comprometida, pois diminuição do pH pode reduzir as atividades das bactérias metanogênicas (CASTRO; CORTEZ, 1998; FERREIRA et al. 2017).

Embora a da quantidade de sólidos totais no início do processo para dejetos de bovinos estivesse de acordo com a recomendação (TURDERA; YURA, 2006), alguns estudos utilizam uma concentração inferior, entre 2 a 3%, para adequada eficiência (RESENDE et al., 2015). A menor redução de sólidos em dejetos bovinos é esperada também devido à dificuldade de degradação do substrato fibroso que compõem a dieta de animais ruminantes. A quantidade de lignina é a principal responsável por retardar a velocidade de degradação de material orgânico e está diretamente relacionado a produção de biogás (ORRICO JUNIOR et al., 2012).

4.2 MONTAGEM DO BIODIGESTOR E PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Os dejetos foram coletados em 04 de outubro de 2019, trazidos e alocados em um espaço reservado no campus da UFSM em Cachoeira do Sul. O sistema de coleta do gás do biodigestor foi instalado em 07 de novembro de 2019. Nesse período de três dias ocorreu a explosão de um dos biorreatores com dejetos de suínos (Figura 18).

Figura 18 – Rompimento do biorreator devido a pressão interna gerada pelo biogás.



Fonte: O autor.

Sendo assim, ficou então um biorreator com dejetos suínos e dois reatores com dejetos bovinos. As estimativas do volume das câmaras foram calculadas a partir da equação 15. Para estimar o volume do gás adotou-se uma estimativa de pressão interna das câmaras de 6,5 Lbs (equação 16).

No biodigestor de dejetos suínos um dia após o sistema instalado, em 08 de outubro, foi retirada uma câmara de $4,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. No dia seguinte, uma nova câmara de bicicleta estourou e colocada uma de moto que em dois dias estourou (11 de outubro). No mesmo dia foi então instalada uma de carro que foi retirada em 18 de outubro. A partir dessa última data foram coletadas duas de bicicleta até o dia 12 de novembro de 2019. Nos biodigestores de bovinos houve a coleta de três câmaras de com um volume de biogás aproximado de $1,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Não houve ocorrência de estouro de câmaras nesses biodigestores. O total de biogás coletado está descrito na tabela 11.

Tabela 11 – Estimativa de produção do biogás.

| Dejetos | Biogás produzido |
|---------------------|----------------------------------------------------------|
| Suínos | Câmara de bicicleta $4,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| | Câmara de bicicleta $4,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| | Câmara de bicicleta $4,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| | Câmara de carro $0,032327 \text{ m}^3$ |
| | Câmara de bicicleta $4,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| | Câmara de moto $9,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| <i>Volume Total</i> | <i>0,060527 m³</i> |
| Bovinos | 3 câmaras de bicicleta $0,63 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| <i>Volume Total</i> | <i>1,9 x 10⁻³ m³</i> |

Fonte: O autor.

O menor rendimento de produção de gás de dejetos bovinos pode estar relacionado às variáveis já citadas anteriormente: menor proporção de água, diminuição do pH, quantidade de materiais fibrosos nos dejetos, e ainda, a temperatura ambiente. Resende et al. (2015) em experimento de degradação anaeróbia de dejetos bovinos em biodigestores mantidos em condições de ambiente, nas estações de inverno e verão, usaram uma proporção de sólidos totais de 2 a 3 % diluindo as fezes com água de lavagem dos pisos. Esses mesmos autores não observaram efeito da temperatura na produção do biogás e indicam a viabilidade do processo de produção de biogás a partir de dejetos bovinos em clima tropical. Ainda, cabe destacar que após a biodigestão foi observado aumento do pH nas duas estações do ano do experimento (RESENDE et al., 2015). A diminuição de pH no dejetos bovino no presente estudo pode indicar uma redução das comunidades de bactérias metanogênicas, que compromete diretamente a produção do biogás. Ferreira et al. (2017), avaliando os fatores físico-químicos na produção de biogás de um biorreator alimentado com resíduos orgânicos provenientes de um refeitório, observaram uma produção quase nula de biogás no início do processo quando houve uma queda do pH, e, posteriormente, à medida que o pH se aproximava da neutralidade, a produção de metano foi crescente.

Os biodigestores do presente estudo foram mantidos em condições ambientais e a temperatura média do período foi de $20,8 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a mínima de $11,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e máxima de $39,8 \text{ }^\circ\text{C}$, indicando uma grande amplitude no período do experimento (Figura 17). Na maioria dos dias do experimento a temperatura média ficou próxima aos $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a qual é considerada a faixa de limite inferior para as bactérias mesofílicas. Além disso, mudanças súbitas de temperatura de mais de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ em um dia podem interromper a atividade de bactérias metanogênicas, resultando

na formação de ácidos voláteis não digeridos (CASTRO; CORTEZ, 1998). Essa variação de temperatura superior a 5°C ocorreu em 31 dos 40 dias do experimento (Figura 17), o que pode ter comprometido a produção de biogás no biodigestor com dejetos bovinos. Os melhores desempenhos em experimentos avaliando a produção de biogás a partir de dejetos animais em condições de controle da temperatura são observados em temperaturas superiores a 35°C (CASTRO; CORTEZ, 1998; MIRANDA; AMARAL; LUCAS JUNIOR, 2006; SOUZA et al., 2008).

A temperatura ambiente e a sua amplitude de variação não foram tão prejudiciais a produção de biogás a partir de dejetos suínos pois esses, além de apresentarem uma maior umidade inicial (2,01% ST), também apresentam diferenças na composição em função da dieta quando comparados a de bovinos (e outros ruminantes). As fibras presentes nos dejetos bovinos são o principal elemento para a produção de biogás, embora seu conteúdo natural seja rico em celulose e hemicelulose, após a digestão no trato gastrointestinal as fibras remanescentes são mais lignificadas e resistentes aos processos de fermentação, dificultando a produção de biogás (JUNQUEIRA, 2011).

4.3 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE DEJETOS E BIOGÁS

Para estimar a quantidade de gás metano produzida a partir do teor de degradabilidade do substrato pelo método Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2006), levou-se em consideração os dados da tabela 8, onde:

a) Suínos:

A partir da equação (2) tem-se:

$$FEM = 0,3 * 365 * 0,29 * 0,67 * \frac{0,79}{100} * 1$$

$$FEM = 0,168079 \text{ kg}_{CH_4}/cab \text{ ano}$$

Da equação (3):

$$CH_4 \text{ dejetos} = 0,168079 * 24 \text{ animais}$$

$$CH_4 \text{ dejetos} = 4,033896 \text{ kg}_{CH_4}/ano - \text{propriedade 2}$$

b) Vacas em lactação:

A partir da equação (2) tem-se:

$$FEM = 2,9 * 365 * 0,13 * 0,67 * \frac{0,79}{100} * 1$$

$$FEM = 0,728343 \text{ kg}_{CH_4}/cab \text{ ano}$$

Da equação (3):

$$\text{CH}_4_{\text{dejetos}} = 0,728343 * 85 \text{ animais}$$

$$\text{CH}_4_{\text{dejetos}} = 61,909155 \text{ kg}_{\text{CH}_4}/\text{ano} - \text{propriedade 1}$$

Para estimar a quantidade de dejetos produzidos e gás metano gerado pelo método Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás – ER (2009), levou-se em consideração os dados da tabela 9 juntamente com os dados da literatura, onde segundo Kunz et al., (2005) a produção de dejetos de fêmeas com leitões (em lactação) é de 0,027 m³/dia e leitões em creche 0,014 m³/dia.

A produção total de dejetos em granjas de suínos é muito variável, dependendo principalmente do manejo de limpeza adotado em cada granja, determinando a maior ou menor quantidade de água utilizada. De qualquer forma a água estará sempre presente, diluindo e fazendo parte na geração de resíduo final, o que dá aos dejetos de suínos, na maior parte dos sistemas, a característica de efluente líquido.

A partir da equação (4) temos o cálculo da quantidade diária de dejetos suínos produzidos:

$$PDDS = (3 \text{ matrizes} * 0,027) + (21 \text{ leitões} * 0,014)$$

$$PDDS = 0,375 \text{ m}^3_{\text{dejetos}}/\text{dia} - \text{propriedade 2}$$

Conforme Santos e Nogueira (2012), um animal com aproximadamente 450 kg de massa, gera 0,037 m³ dejetos/dia, assim a partir da equação (6) obtêm-se o cálculo da quantidade diária de dejetos bovinos produzidos:

$$PDDB = (85 \text{ vacas} * 6 \text{ h} * \frac{0,037}{24})$$

$$PDDB = 0,79 \text{ m}^3_{\text{dejetos}}/\text{dia} - \text{propriedade 1}$$

Com base na equação (6) e na tabela 9 obtemos a produção diária de biogás para bovinos:

$$PDBb = 85 * \left(\frac{550}{600}\right) * 0,25 * 4 * \left(\frac{0,78 * 0,18 * 0,94}{0,6}\right)$$

$$PDBb = 17,1385 \text{ m}^3_{\text{Biogás}}/\text{dia} - \text{propriedade 1}$$

Já a equação (8), proposta pela CIBiogás-ER (2009), que também utilizou parâmetros do modelo IPCC (2006), além do peso médio (PM) que correspondeu a 115 kg (peso de saída dos animais) e o peso padrão (PP), por categoria de suínos, sendo 198 kg (IPCC, 2006).

Para obter a produção diária de biogás para suínos, baseia-se na equação (6) e tabela 9, assim:

$$PDBs = 24 \left(\frac{115}{198} \right) * 1 * 0,3 * \left(\frac{0,78 * 0,29 * 0,94}{0,6} \right)$$

$$PDBs = 1,4819 \text{ m}^3/\text{dia} - \text{propriedade 2}$$

As propriedades de produção de suínos e bovinos de onde coletou-se os dejetos para o presente estudo produzem 0,79 m³ dejetos de bovinos e 0,375 m³ de dejetos suínos, respectivamente, por dia (Tabela 12). Esses dejetos emitem, pela metodologia de estimativa do IPCC mais de 65 kg de metano por ano, evidenciando a importância do tratamento de dejetos na redução da emissão de gases de efeito estufa.

Tabela 12 - Resumo das estimativas de produção de dejetos (m³/dia), biogás e metano nos locais (propriedades) de coleta dos dejetos.

| | m³dejetos/dia | m³biogás/dia | kgCH₄/ ano |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Bovinos – propriedade 1 | 0,79 | 17,14 | 61,91 |
| Suínos – propriedade 2 | 0,375 | 1,48 | 4,03 |

Fonte: O autor.

4.4 DIMENSIONAMENTO DO MODELO DE BIODIGESTOR

Para o presente trabalho devido a baixa produção de biogás dos dejetos bovinos, optou-se por dimensionar apenas um sistema de biodigestão para os dejetos suínos. Para a implementação de um biodigestor na propriedade 1 (dejetos bovinos) faz-se necessário um novo estudo de viabilidade, onde o mesmo dirá se será vantajoso ou não a implementação do biodigestor.

A partir da equação (9) obtêm-se o volume do biodigestor (V_b), a carga diária (VC) consiste na soma do volume de dejetos (PDDS) mais a água que foi inserida no biodigestor, esta que deve ser misturada na proporção de 1:1, segundo Faustino et al. (2009). O tempo de retenção hidráulica (TRH) adotado foi de 40 dias (AMARAL et al., 2004), conforme a equação abaixo:

$$Vb = (0,375 \text{ m}^3 \text{ dejetos} + 0,375 \text{ m}^3 \text{ água}) * 40$$

$$Vb = 30 \text{ m}^3$$

O volume do biodigestor foi adicionado em 20% como medida preventiva de segurança e eventuais alterações de produção dos dejetos:

$$Vb = 30 + 20\%$$

$$Vb = 36 \text{ m}^3$$

O diâmetro do tanque de digestão (D_{tanque}) é calculado através da equação abaixo, considerando-se uma altura $h=3\text{m}$, tem-se:

$$D_{\text{tanque}} = \sqrt{\frac{36*4}{3*\pi}}$$

$$D_{\text{tanque}} = 3,90 \text{ m}$$

As dimensões da caixa de entrada (D_{carga}) devem ser suficientes para que seu volume suporte o volume de carga diária, com $PDDS=0,375 \text{ m}^3/\text{dia}$ e considerando a altura da caixa de carga $h_c=1\text{m}$ tem-se:

$$D_{\text{carga}} = \sqrt{\frac{(0,375*2)*1,20*4}{1*\pi}}$$

$$D_{\text{carga}} = 1,07 \text{ m (considerando 20\% adicional)}$$

A caixa de carga deve ser construída em forma circular, assim:

$$V_{\text{carga}} = 0,9 \text{ m}^3/\text{dia}$$

A caixa de descarga deverá ser construída em forma circular, sendo três, assim:

$$V_{\text{descarga}} \geq 3 * 0,9$$

$$V_{\text{descarga}} \geq 2,7 \text{ m}^3$$

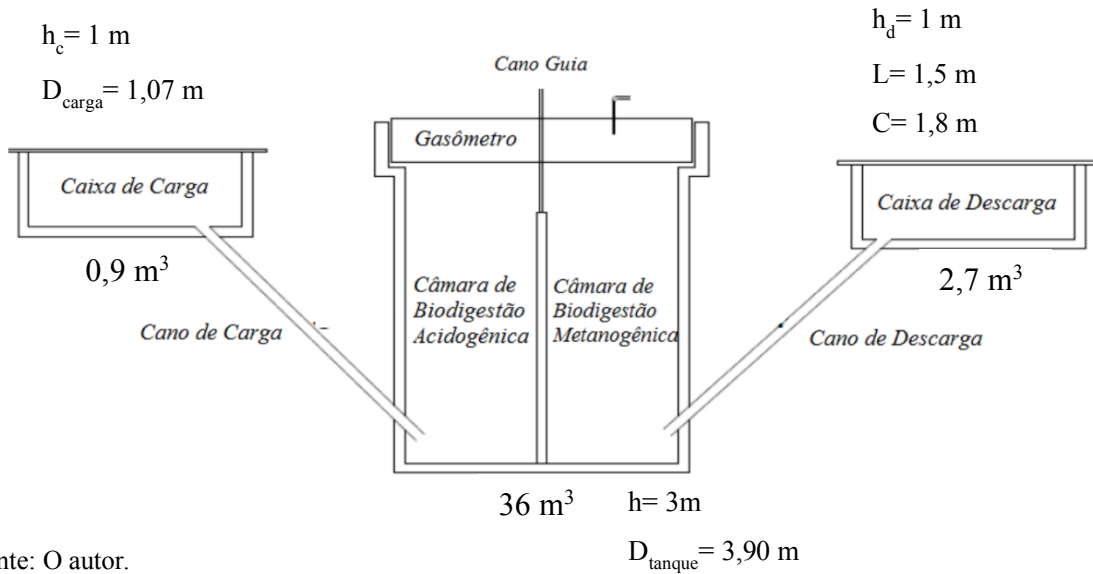
Foi adotado uma altura (h_a) de 1 m e largura (L) de 1,5m, tem-se:

$$C = \frac{2,7}{1*1,5}$$

$$C = 1,8 \text{ m}$$

A partir dessas equações pode-se estimar que um biodigestor Indiano com uma caixa de carga de $0,9 \text{ m}^3$, uma câmara de biodigestão de 36 m^3 e $2,7 \text{ m}^3$ (Figura 19) é suficiente para atender a demanda da produção de dejetos de suínos do departamento de Zootecnia da UFSM, aonde há 3 matrizes com 7 leitões em média cada (propriedade 2). Esse biodigestor, além de tratar os dejetos, com alto potencial de contaminação, pode produzir $1,48 \text{ m}^3$ de biogás por dia e biofertilizante. O biogás produzido, por ser em pequena quantidade, pode ser utilizado para o sistema de aquecimento do piso da maternidade, que segundo Kunz e Oliveira (2006) a transformação do biogás em energia elétrica possui um rendimento próximo a 25% contra 65% se transformado em energia térmica, buscando assim uma melhor eficiência de conversão.

Figura 19 - Esquema do dimensionamento de biodigestor para propriedade 2 (dejetos suínos).



Fonte: O autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias de estimativas de potencial teórico de produção de biogás apresentam resultados distintos, porém considera-se que a metodologia do IPCC pode ser uma opção viável para adaptações que levem em consideração as particularidades de manejo da região/país. O potencial energético da biomassa residual de dejetos suínos não pode ser desprezado e para que se converta em plantas de produção, é importante o avanço em pesquisas e políticas públicas para torná-lo viável e representativo na matriz energética brasileira. Embora em pequenas propriedades a conversão energética não seja viável, o aproveitamento térmico ou a organização em cooperativas de produtores podem ser alternativas para a viabilidade do biodigestor.

O biodigestor pode atender as exigências de tratamento dos dejetos, reduzindo em grande parcela os possíveis impactos ambientais sobre o solo, água e ar da região. A produção do biogás e do biofertilizante pelo sistema de biodigestão agrega valor à propriedade rural, seja pelo fator financeiro, como pela integração às mais variadas atividades que se desenvolvem no meio rural, trazendo geração de energia renovável, reciclagem de nutrientes para as plantas e saneamento ambiental.

Embora a digestão anaeróbia seja complexa e muitos fatores, desde a constituição da biomassa até fatores ambientais, influenciem na eficiência e produção do biogás, esse processo é de extrema relevância para segurança ambiental e sustentabilidade produtiva. Direcionar os resíduos para o tratamento de maneira ecológica proporciona ainda o retorno de nutrientes e seu reaproveitamento energético.

E por fim é deixado algumas sugestões para trabalhos futuros, onde pode-se utilizar resíduos sólidos orgânicos (sobras de comida do Restaurante Universitário da UFSM campus Cachoeira do Sul) e utiliza-las no biodigestor de processo contínuo. Realizar uma caracterização da composição química do biogás produzido e também do biofertilizante. E obter parâmetros com a queima do biogás em um motor de bancada.

REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; TAUSEEF, S.M; ABBASI, S.A. **Anaerobic digestion for global warming control and energy generation – An overview.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pondicherry India, v. 16, n. 5, p. 3228-3242, Jun. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2ª ed. Brasília: Aneel, 2005. 243 p.

AGROIN, Comunicação. **Gerenciamento hídrico na suinocultura reduz o uso da água em até 50%.** 2019. Disponível em: <<http://www.agroin.com.br/noticias/2194/gerenciamento-hidrico-na-suinocultura-reduz-uso-da-agua-em-ate-50>>. Acessado em: 29 Jun 2019.

AMARAL, C. M. C. do et al. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica.** Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 6, p.1897-1902, nov. 2004.

AQUINO, S.F. E CHERNICHARO, C.A.L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle.** Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 10, n. 2, p. 152 – 161. 2005.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico.** 2017. 32 p. Monografia – Curso de Engenharia Química, Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ARAÚJO, A. R. A. de et al. **Dimensionamento de um biodigestor rural para o assentamento trangola.** In: V Congresso Brasileiro dos Engenheiros sem Fronteiras. Natal, 2018.

ARAÚJO, M. I. do B. et al. **Dimensionamento de Biodigestores Indiano para a cidade de Campina Grande.** Blucher Chemistry Proceedings, Campina Grande, v. 3, n. 1, nov. 2015.

BRASIL – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Avaliação da Eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024).** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

BRASIL – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Biocombustíveis 2030: Papel dos biocombustíveis na matriz.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

CASTRO, L. R. de; CORTEZ, L. A. B. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE BIODIGESTORES COM ESTERCO BOVINO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p.97-102, abr. 1998.

DEGANUTTI, R. et al., **Biodigestores Rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** Encontro de Energia no Meio Rural, 4., Campinas. 2002. UNICAMP.

EMBRAPA/EMATER-RS. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos.** 14 ed. Porto Alegre: Boletim informativo BIPERS, 2002.

EMBRAPA. **Embrapa Suínos e Aves.** 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas>>. Acessado em: 26 Jun 2019.

EMBRAPA. **Árvore do conhecimento.** 2019. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj06suh402wyiv802hvm3jzjuu24c.html>>. Acessado em: 08 Jun 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2018:** Ano base 2017. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica.** 2019. Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acessado em: 26 Mai 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes de Energia.** 2019. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acessado em: 28 Mai 2019.

FAUSTINO, L. S. M. et al. **Tratamento de resíduo orgânico e produção de biogás.** Trabalho apresentado no 2º Simpósio Nacional de Biocombustíveis, Recife, 2009.

FERRAREZ, A. H. et al. **Independência energética de granja suinícola a partir do uso de biogás.** Revista Engenharia na Agricultura - REVENG, Viçosa - MG, v. 18, n. 3, p.248-257, jun. 2010.

FERREIRA, N. A. de L. et al. **Avaliação das concentrações de metano gerado em um biorreator de bancada com base em parâmetros físico-químicos.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife, v. 22, n. 3, p.473-479, maio 2017.

FOREST, M. et al. **A diferenciação de produto na bovinocultura de corte: foco na estratégia mercadológica.** Revista Eletrônica da Faculdade de Ciências Exatas e da Terra Produção/construção e Tecnologia, Dourados - MS, v. 3, n. 5, Nov. 2014.

FUKAYAMA, E. H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante.** 2008. 99 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal – SP, 2008.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria.** Minas Gerais: Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Industrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), 2015. 160 p.

GALINKIN, M. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais.** 2ª. ed. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2009. 140 p.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequena e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo – PR.** 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2003.

GOLDEMBERG, J. **Biomassa e energia.** Química Nova, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, abr. 2009. FapUNIFESP.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil.** Estudos avançados, São Paulo, v. 21, n. 59, p.7-20, abr. 2007. FapUNIFESP.

GOLDEMBERG, J. **Energias Renováveis: Série Energia e Sustentabilidade.** São Paulo: Blucher, 2012. Volume 1. 8 p.

HEPP, F. **Avaliação da geração de biogás e biometano utilizando cama de bovinos de corte confinados e dejetos suínos.** 2016. 70 p. TCC (Curso de Engenharia Ambiental) - UNIVATES, Lajeado, 2016.

IENGE. **Soluções em sustentabilidade.** 2012. Disponível em: <http://www.iengep.com.br/novo/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=27>. Acessado em: 08 Jun. 2019.

IPCC. Emissions from Livestock and Manure Management. In: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use.** Hayama, Kanagawa: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado.** 2014. 46 p. TCC (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

JUNQUEIRA, J. B. **Biodigestão anaeróbia e compostagem com dejetos de bovinos confinados e aplicação do biofertilizante e do composto em área cultivada com Panicum**

maximum Jacq., cv Tanzânia. 2011. 92 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás.** Lajeado: Univates, 2014. 69 p.

KONZEN, E. A. **Fertilização de Lavoura d Pastagem com Dejetos de Suínos e Cama de Aves.** In: 5º SEMINÁRIO TÉCNICO DA CULTURA DE MILHO. 2003, Videira - SC. Informe técnico. Sete Lagoas - MG: Embrapa, 2002.

KONRAD, O. et al. **Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano.** Lajeado: Univates, 2016.

KONRAD, O. et al. **Geração de biogás através de digestão anaeróbia utilizando substrato suíno e bovino.** Revista Acadêmica Ciências Agrarias e Ambientais, Curitiba - PR, v. 12, n. 671, p. 209-214, set. 2014. Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR.

KUNZ, A. et al. **Comparativo de custo de implantação de diferentes tecnologias de armazenagem/tratamento e distribuição de dejetos suínos.** Circular Técnica, Concórdia - SC, jun. 2005.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. de. **Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás.** Revista de Política Agrícola, Concórdia - SC, v. 3, n. 15, set. 2006.

LORA, E. E. S. et al. **Biocombustíveis.** Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 1200 p.

LUSTOSA, G. N.; MEDEIROS, Í. H. B. de. **Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos.** 2014. 72 p. Monografia – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MARQUES, F.S.; SILVA, F.P. **Método simplificado de identificação de potencial de produção de biogás na suinocultura – terminação.** In: Simpósio de Bioenergia e Biocombustíveis do Mercosul, 2, Foz do Iguaçu. 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** 2019. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/política-de-resíduos-sólidos>>. Acessado em: 24 Jun 2019.

MIRANDA, A. P.; AMARAL, L. A. do; LUCAS JUNIOR, J. de. **Influência da temperatura na biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos e suínos.** Revista Univap, São José dos Campos, v. 13, n. 24, p.2928-2931, out. 2006.

MOREIRA, J. R. S. et al. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.** Rio de Janeiro: LTC., 2017. 64 p.

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: Embrapa Suínos e Aves, 2018. 52 p.

OLIVEIRA, L. G. de.; SOUZA, J. T. de; FRANCISCO, A. C. de; **Tratamento de dejetos suínos: oportunidades de conversão em energia.** Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa, v. 13, n. 3, p. 22-36, Jan. 2018. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

OLIVER, A. de P. M. et al. **Manual de Treinamento em biodigestão.** Salvador: Winrock, 2008. 2 ed. 23 p.

ORRICO JUNIOR, M. A. P. et al. **Biodigestão anaeróbia dos dejetos da bovinocultura de corte: influência do período, do genótipo e da dieta.** Revista Brasileira de Zootecnia, Viçosa, v. 41, n. 6, p.1533-1538, out. 2012.

PAINI, V. **Geração de biogás a partir de resíduos orgânicos da indústria alimentícia do ramo de Candies.** 2017. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – UNIVATES, Lajeado, 2017.

PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGWE, A., **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection.** IEA Bioenergy, Task-37 – Energy from Biogas and Landfill Gas. 2006, 36 p.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o brasil: substratos, digestores e uso de biogás.** Brasília: Ministério das Cidades, 2015. 83 p.

REIS, A. dos S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio.** 2012. 63 f. Dissertação de mestrado – Curso de programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

RESENDE, J. A. de et al. **Dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por biodigestão anaeróbica.** Juiz de Fora - MG: Embrapa Gado de leite, 5 p. Set. 2015.

SAMULAK, R. et al. **Biodigestor como opção para tratamento e resíduos agroindustriais.** Universidade Tecnológica federal do Paraná, 2010.

SANTOS, I. A. dos; NOGUEIRA, L. A. H. **Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia.** Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, v. 4, n. 1, p. 41-49, abr. 2012.

SILVA, C. B. da. **Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais.** 2017. 69 p. Dissertação – Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 10. ed. Porto Alegre: Núcleo Regional Sul - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400 p.

SOUZA, C. de F. et al. **Produção volumétrica de metano - Dejetos suínos.** Ciência Agrotec, Lavras, v. 32, n. 1, p.219-224, fev. 2008.

TORRES, A.; PEDROSA, J. F.; MOURA, J. P. de; **Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais.** Educação Ambiental em Ação, n. 40, ano XI, Ago. 2012. Universidade Federal de Pernambuco.

TURDERA, M. V.; YURA, D. **Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de dourados.** In: Encontro de Energia no Meio Rural, 6., 2006, Campinas. Anais eletrônicos.

WEILAND, P. **Biogas production: current state and perspectives.** Applied Microbiology and Biotechnology, Braunschweig-Germany, v. 85, n. 4, p. 849-860, 24 Set. 2009. Springer Science and Business Media LLC.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil.** 2009. 97 f. Dissertação de Mestrado – Mestre em Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.