Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão

Programa de pós-graduação em Química

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ABATEDOURO BOVINO COMO ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Catalão - GO

2021

UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE QUÍMICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[X] Dissertação [ ] Tese

2. Nome completo do autor

Alisson Antunes Melo

3. Título do trabalho

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ABATEDOURO BOVINO COMO ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:
a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Morita Barrado**, **Professor do Magistério Superior**, em 28/09/2021, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **ÁLISSON ANTUNES MELO**, **Discente**, em 28/09/2021, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2378985** e o código CRC **704426E6**.

Referência: Processo nº 23070.046115/2021-55 SEI nº 2378985

Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão

Programa de pós-graduação em Química

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ABATEDOURO BOVINO COMO ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Química da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, como exigência para obtenção do título de Mestre em Química.

Mestrando: Alisson Antunes Melo

Orientador: Dr. Cristiano Morita Barrado

Catalão - GO

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

MELO, ALISSON ANTUNES
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ABATEDOURO BOVINO COMO ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS [manuscrito] / ALISSON ANTUNES MELO. - 2021.
96 f.

Orientador: Prof. Dr. CRISTIANO MORITA BARRADO.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Física e Química, Catalão, Programa de Pós Graduação em Química, Catalão, 2021.
Bibliografia.
Inclui tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Resíduos de abatedouro. 2. Linha verde. 3. Linha Vermelha. 4. Co-digestão. 5. Biogás. I. BARRADO, CRISTIANO MORITA, orient. II. Título.

CDU 54

UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE QUÍMICA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 13 da sessão de Defesa de Dissertação de Alisson Antunes Melo, que confere o título de Mestre(a) em Química, no Programa de Pós-Graduação em Química da UFG - Regional Catalão

Ao/s trinta dias do mês de agosto de dois mil e vinte e um, a partir da(s) 09:00 horas, por videoconferência, na sala virtual: https://meet.google.com/utr-revx-cqy, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ABATEDOURO BOVINO COMO ADITIVOS NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**" na área de concentração em Química. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Cristiano Morita Barrado (UAEQ/UFG-RC) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Antover Panazzolo Sarmento (FENG-UFG-RC), membro titular externo; Professor Doutor Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo (UAEQ/UFG-RC), membro titular interno cujas participações ocorreram por meio de videoconferência. Durante a arguição os membros da banca fizeram sugestões de pequenas alterações e complementações no trabalho final. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sida o candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Cristiano Morita Barrado, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Não houve alteração no título

Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Morita Barrado**, **Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2021, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Alberthmeiry Teixeira De Figueiredo**, **Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2021, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Antover Panazzolo Sarmento**, **Professor do Magistério Superior**, em 28/09/2021, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2311441** e o código CRC **60C17BB2**.

Referência: Processo nº 23070.046115/2021-55 SEI nº 2311441

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a minha família, Claudio Bezerra, Maria Antunes e Aline Evelin por sempre me apoiarem em tudo e em todos os momentos.

Ao meu orientador e professor, Dr. Cristiano Morita Barrado por sempre estar à disposição para me ajudar, motivar, retirar minhas dúvidas e dar conselhos.

Ao professor, Dr. Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo pelo convite para entrar no projeto desde a graduação, pois, não estaria hoje onde estou.

Ao professor Dr. Antover Panazzolo Sarmento por sempre me ajudar na execução dos projetos práticos e sempre botar a mão na massa sem tempo ruim e me ajudar muito na parte dos cálculos estatísticos.

À MSc. Angélica Márcia dos Santos por todos os ensinamentos repassados durante todo o período do projeto, ensinando e demonstrando as melhores opções de execução prática e teórica.

À minha namorada Jacyara Flores Arbués por sempre estar disposta a me ouvir e ajudar em qualquer coisa, independentemente da hora ou dia e por sempre ser uma pessoa que me motiva e que eu sempre me espelhei.

A toda equipe do Laboratório de Pesquisa em Soluções energéticas e Ambientais – LABSea, por serem pra mim uma família e sempre ajudarem em tudo durante essa pesquisa.

À Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão-GO e ao Programa de Pós-Graduação em Química pela oportunidade de realizar este mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa concedida.

À Fundação Getúlio Vargas FGV pelo laboratório e equipamentos e reagentes concedidos.

Meu muito obrigado!

"O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo."

(Winston Churchill)

RESUMO

No abate de bovinos são gerados resíduos que não tem um aproveitamento rentável e nem uma reutilização final, apenas o armazenamento em lagoas de estabilização para posterior descarte na natureza. Esta dissertação propõe analisar o efeito da utilização desses resíduos de abatedouro, que são a linha verde (resíduos estomacais) e a linha vermelha (sangue residual) no processo de co-digestão anaeróbica utilizando dejeto bovino como substrato para o reator, verificando assim suas características físico-químicas e os resultados obtidos em relação a produção de metano (CH_4). O estudo do reator foi feito com as seguintes análises: pH, demanda química de oxigênio – DQO, demanda bioquímica de oxigênio – DBO, alcalinidade total, ácidos voláteis, sólidos totais, fósforo total, nitrogênio total Kjeldahl e produção de metano com o teste de Atividade Metanogênica Específica – AME. Verificou-se que a mistura da linha verde com o dejeto teve o melhor rendimento na produção de metano, produzindo 623mL de CH_4, já a linha vermelha com o dejeto teve uma produção de 246mL de CH_4 e o dejeto puro diluído com água obteve uma produção de 201mL de CH_4, ambos utilizando a diluição de 45% de aditivo ou água e 55% de dejeto puro. Pode-se afirmar que a utilização dos resíduos de abatedouro como a linha verde e vermelha, podem ser utilizados para uma melhora da produção de biogás e o aumento da velocidade de início da produção nos reatores em escala laboratorial.

Palavras-chave: resíduos de abatedouro; linha verde; linha vermelha; co-digestão, biogás.

ABSTRACT

In the slaughter of cattle, residues are generated that have neither a profitable use nor a final reuse, only storage in stabilization ponds for later disposal in nature. This dissertation proposes to analyze the effect of using these slaughterhouse residues, which are the green line (stomach waste) and the red line (residual blood) in the anaerobic co-digestion process using bovine waste as substrate for the reactor, thus verifying its physicochemical characteristics and the results obtained in relation to methane (CH_4) production. The study of the reactor was carried out with the following analyses: pH, chemical oxygen demand – COD, biochemical oxygen demand – BOD, total alkalinity, volatile acids, total solids, total phosphor, total nitrogen and methane production with the Specific Methanogenic Activity (SMA) test. It was found that the mixture of the green line with the manure had the best yield in methane production, producing 623mL of CH_4, the red line with the manure had a production of 246mL of CH_4 and the manure diluted with water obtained a production of 201mL of CH_4, both using the dilution of 45% additive or water and 55% pure manure. It can be said that the use of slaughterhouse waste as green and red line, can be used to improve the production of biogas and the increase in the speed of start of production in laboratory scale reactors.

Key words: slaughterhouse waste; green line; red line; co-digestion; biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão de CO_2 na produção de energia com combustíveis fósseis. 16
Figura 2 - Exemplos de biomassa florestal, agrícola e industrial/urbana. 17
Figura 3 – Produção de energia mundial com biomassa. 18
Figura 4 – Previsões de produção de energia renovável em 2030. 19
Figura 5 – Fontes de energia utilizadas no Brasil em 2020. 20
Figura 6 - Matriz energética de 2018 e 2019. 21
Figura 7 – Fluxograma de transformação da biomassa em energia. 22
Figura 8 - Capacidade de energia renovável no Brasil em 2026. 22
Figura 9 – Produção de Carne Bovina no Mundo. 23
Figura 10 – Bovinos no Brasil em 2019. 24
Figura 11 – Crescimento da criação bovina no Brasil. 25
Figura 12 – Abate de bovinos. 26
Figura 13 – Fluxograma de tratamento de efluente líquido do abatedouro. 29
Figura 14 – Sistema de lagoa de estabilização da linha verde e vermelha. 30
Figura 15 – Representação da composição do biogás. 31
Figura 16 – Fluxograma do processo de produção do biogás. 32
Figura 17 – Projeção da produção mundial de biogás. 32
Figura 18 – Ilustração do ciclo global do carbono 33
Figura 19 – Jornal O Estado de S. Paulo anunciando a crise de energia de 1973. 34
Figura 20 – Extensão territorial da China, Brasil e Alemanha. 35
Figura 21 – Produção de plantas de biogás no Brasil. 35
Figura 22 – Porte e produção das plantas de biogás brasileiras. 36
Figura 23 – Estágios da biodigestão anaeróbica. 37
Figura 24 – Bactérias e Arqueas que participam da biodigestão anaeróbica. 38
Figura 25 – Reação de Stickland. 39
Figura 26 – (a) Formação de metano pelo acetato; (b) formação de metano pelo dióxido de carbono. CoA= coenzima A; CoM= coenzima M. 40
Figura 27 – Controle do pH do sistema de biodigestão. 43
Figura 28 – Demonstração do processo de Co-digestão de Resíduos. 44
Figura 29 – Plantas com e sem biofertilizante 46
Figura 30 – Fazenda de leite localizada em Catalão - GO. 49
Figura 31 – Modelo de Compost Barn. 49

Figura 32 – Coleta do dejeto na área cimentada. 50
Figura 33 – Vista superior do abatedouro bovino (a) e vista frontal (b). 50
Figura 34 – Coleta da Linha Verde no abatedouro. 51
Figura 35 – Coleta da Linha Vermelha no abatedouro. 51
Figura 36 – Modelo do reator utilizado. Em verde a mistura, em azul a tampa e em cinza o septo. 52
Figura 37 – Esquema de montagem dos biodigestores. 53
Figura 38 – Esquema de montagem do reator. 54
Figura 39 – Montagem completa do reator e sistema de purificação. 54
Figura 40 – Medidor de pH da marca Edge® 55
Figura 41 – Digestor HI 839800 da marca Hanna. 56
Figura 42 – Espectrofotômetro CIRRUS-80 da marca FEMTO 56
Figura 43 – Equipamento de Oxitop 59
Figura 44 – Equipamento de DBO da marca ALFAKIT 60
Figura 45 - Mufla FL-1300 da marca Fornos INTI. 65
Figura 46 – Estufa SL-102 da marca Solab. 65
Figura 47 –Tubo de Kjeldahl. 68
Figura 48 – Bloco de digestão Kjeldahl modelo DK6 da marca VELP 68
Figura 49 – Destilador de nitrogênio UDK 129 da marca VELP. 69
Figura 50 – pH dos reatores. 72
Figura 51 – Alcalinidade total. 74
Figura 52 - Ácidos voláteis. 75
Figura 53 - Nitrogênio total Kjeldahl. 78
Figura 54 – Fósforo total – P 79
Figura 55 – Esquema mostrando a ação inibitória da amônia livre. Setas horizontais: reações inibidas; Setas verticais: Ação inibitória. Setas pontilhadas indicam possíveis ações inibitórias. 81
Figura 56 – Demanda química de oxigênio – DQO 82
Figura 57 - Demanda bioquímica de oxigênio – DQO 83
Figura 58 - Sólidos totais voláteis – STV. 84
Figura 59 – Volume deslocado de metano na linha verde misturada com dejeto. 87
Figura 60 - Volume deslocado de metano na linha vermelha misturada com dejeto. 87
Figura 61 – Volume deslocado de metano no dejeto misturado com água. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resíduos gerados no abate de gado 26
Tabela 2 – Produtos e subprodutos do abate bovino em 2020 27
Tabela 3 – Condições de temperatura para os microrganismos 42
Tabela 4 – pH ótimo para os microrganismos 42
Tabela 5 – Quantidade de materiais adicionados nos reatores. 52
Tabela 6 – Análises físico-químicas realizadas. 55
Tabela 7 – Diluição para os padrões da curva de calibração da DQO. 58
Tabela 8 – Diluições das soluções para a curva de calibração de fósforo. 64
Tabela 9 – Rampa de aquecimento do bloco digestor. 69
Tabela 10 – pH dos reatores e coeficiente de variação (C.V.). 72
Tabela 11 – Alcalinidade total dos reatores e coeficiente de variação (C.V.). 74
Tabela 12 – Ácidos voláteis totais dos reatores e coeficiente de variação (C.V.). 75
Tabela 13 – Nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e coeficiente de variação (C.V.). 77
Tabela 14 – Fósforo total e coeficiente de variação (C.V.). 79
Tabela 15 – Demanda química de oxigênio (DQO) e coeficiente de variação (C.V.). .. 81
Tabela 16 – Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e coeficiente de variação (C.V.). 83
Tabela 17 – Sólidos totais voláteis dos reatores (STV) e coeficiente de variação (C.V.). 84
Tabela 18 – Volume de metano (CH_4) gerado pelos reatores em escala laboratorial. ... 86

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16
1.1. BIOMASSA 16
1.1.1. Biomassa no Brasil 19
1.1.2. Biomassa da Pecuária no Brasil 23
1.2. BIOGÁS 31
1.2.1. Biogás no Brasil 33
1.3. BIODIGESTÃO ANARERÓBICA 37
1.3.1. Fatores que influenciam o Processo de Biodigestão Anaeróbica 41
1.4. CO-DIGESTÃO ANAERÓBICA 44
1.5. BIOFERTILIZANTES 46
2. OBJETIVOS 48
2.1. OBJETIVO GERAL 48
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 48
3. PARTE EXPERIMENTAL 49
3.1. COLETA DO MATERIAL 49
3.1.1. Dejeto Bovino 49
3.1.2. Aditivos 50
3.2. MONTAGEM DOS REATORES 52
3.2.1. Montagem do Sistema de Biodigestão 53
3.3. ANALISES FÍSICO QUÍMICAS 54
3.3.1. Potencial Hidrogeniônico (pH) 55
3.3.2. Demanda Química de Oxigênio (DQO) 56
3.3.3. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) 59
3.3.4. Fósforo Total (Strickland e Parsons, 1960; Valderrama,1981) 62
3.3.5. Sólidos totais, totais voláteis e totais fixos 64
3.3.6. Nitrogênio Total Kjeldahl - NTK 66
3.3.7. Alcalinidade e Ácidos orgânicos 70
3.4. ANALISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS 71
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 72
4.1. PH, ALCALINIDADE E ACIDEZ 72
4.2. NUTRIENTES 77

4.3. MATÉRIA ORGÂNICA E SÓLIDOS TOTAIS 81
4.4. PRODUÇÃO DE METANO (CH4) 86
5. CONCLUSÃO 91
6. REFERÊNCIAS 92

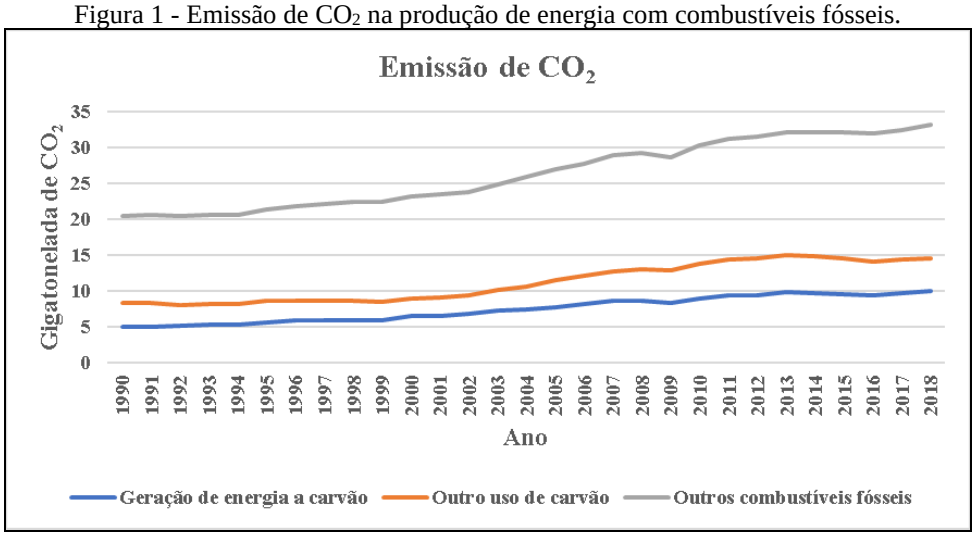
1. INTRODUÇÃO

1.1. Biomassa

Mundialmente, entre as fontes energéticas mais utilizadas para a geração de energia elétrica estão aquelas provenientes de materiais não renováveis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural (IEA, 2019).

Sob essa ótica, dada a finitude desse tipo de material e seu impacto no meio ambiente, essa ampla dependência a eles tem se tornado um problema cada vez maior. Soma-se a isso a preocupação com a emissão de gases poluentes provenientes de seus processamentos. Um dos subprodutos da produção de energia com combustíveis fósseis mostrado na Figura 1 é o dióxido de carbono CO_2, que é visto como o principal gás poluente que vem sofrendo um aumento sem controle, pois atua diretamente no crescimento do efeito estufa na atmosfera, causando o aquecimento global (FREITAS e DATHEIN, 2013).

Figura 1 - Emissão de CO_2 na produção de energia com combustíveis fósseis.



Fonte: IEA, 2018.

Fontes de energia renováveis provenientes de matérias orgânicas são o que, comumente, chamamos de biomassa. Tanto matérias orgânicas de origem animal quanto de origem vegetal podem ser empregadas na produção de energia. A biomassa é classificada de acordo com a sua origem de acordo com a Figura 2, podendo ser florestal (madeira, lenha, estacas, moirões, dormentes, carvão vegetal, entre outros); agrícola (soja, arroz, cana-de-açúcar, milho, entre outras); rejeitos urbanos e industriais

(sólidos ou líquidos, como o lixo, o rejeito de produção, entre outros). Considerando a facilidade de acesso a esse tipo de matéria orgânica, a biomassa é vista como uma alternativa interessante para a diversificação na matriz energética mundial e a subsequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2008).

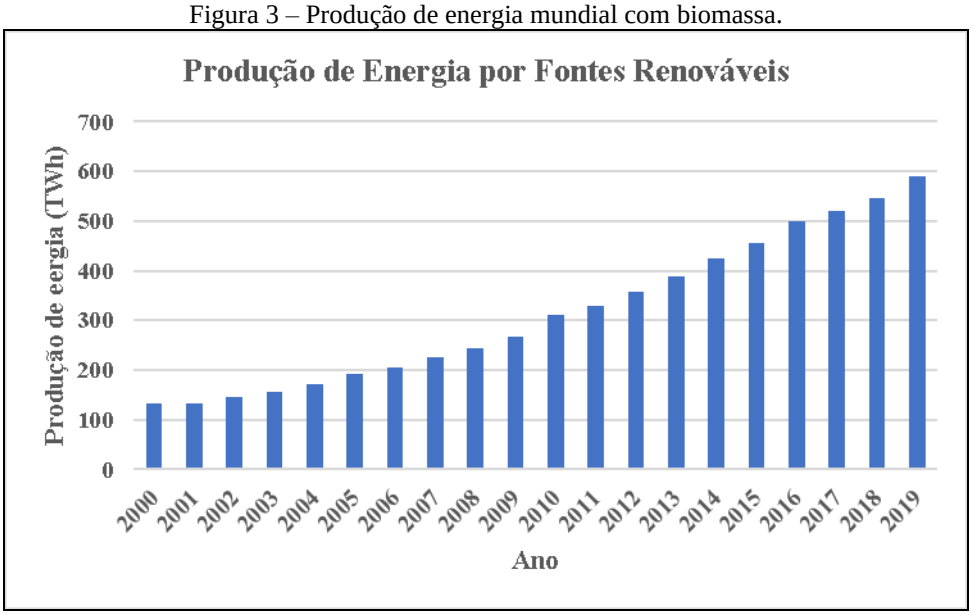
Figura 2 - Exemplos de biomassa florestal, agrícola e industrial/urbana.

Fonte: Montagem a partir de imagens do site Tecnologiaefloresta e Static.

Em 1850 a biomassa era utilizada por 85% da população mundial como fonte de energia, mas acabou perdendo sua liderança histórica para a energia obtida por carvão e, posteriormente, com a expansão contínua do petróleo e do gás natural, o emprego da biomassa foi reduzido praticamente às residências agrícolas (GOLDEMBERG, 2010).

Segundo a International Energy Agency (IEA) e como é mostrado na Figura 3, mundialmente no ano de 2000 eram produzidos apenas 132 Terawatt-hora (TWh) utilizando fontes sustentáveis para a produção de energia, já no ano de 2019 foram produzidos 589 Terawatt-hora (TWh) o que apesar do crescimento ainda está em um nível baixo de produção mundial de energética renovável.

Figura 3 – Produção de energia mundial com biomassa.

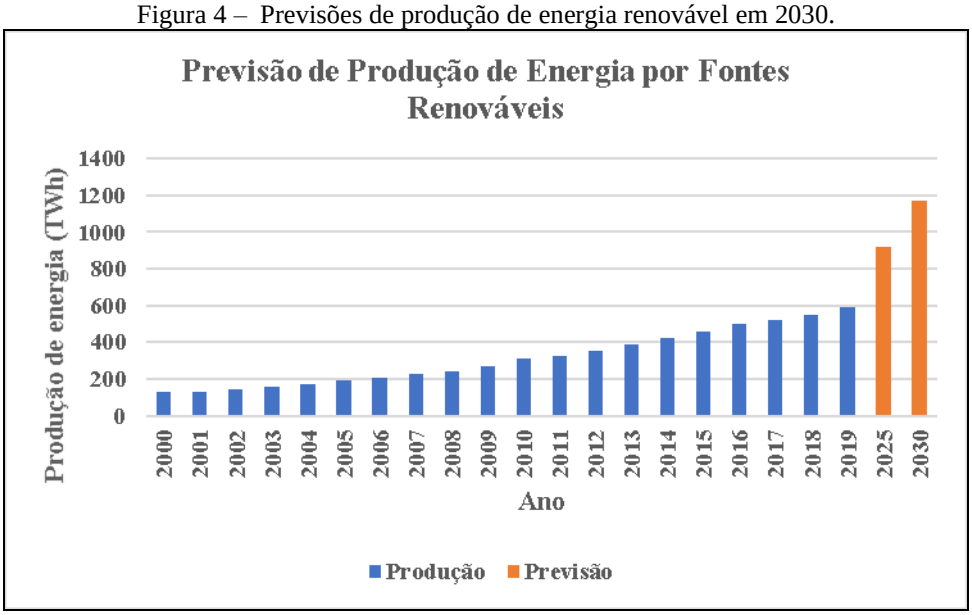


Fonte: IEA, 2019.

Nos últimos 20 anos, governos de todo o mundo têm se concentrado na aplicação de fontes renováveis de energia (tais como a biomassa) (PEDROSO et al., 2018). A utilização de culturas ou resíduos como um meio para produção de fontes econômicas de energia localmente disponíveis e sustentáveis, aumentou as oportunidades para os agricultores e para o governo, ao mesmo tempo em que beneficiou o meio ambiente em termos preservação (GOLDEMBERG, 2010).

A economia e as políticas internacionais têm adotado compromissos atuais e futuros para reforçar e modificar a matriz energética mundial, atendendo às novas demandas de energia de forma sustentável, tendo uma meta de produção de 1168 Terawatt-hora (TWh) até o ano de 2030 e que pode ser observado na Figura 4 (IEA, 2019).

Figura 4 – Previsões de produção de energia renovável em 2030.



Fonte: IEA, 2020.

Com o aumento e o amadurecimento mundial das tecnologias empregadas em energias renováveis, a biomassa vem sendo utilizada atualmente em processos com alta eficiência, nos quais se destacam por possuir a flexibilidade de suprir tanto a produção de energia elétrica dos países, quanto a produção de biocombustíveis para a mobilidade do setor de transportes (EPE, 2018).

1.1.1. Biomassa no Brasil

No Brasil, as fontes principais de energia ainda são àquelas não renováveis como é mostrado na Figura 5, ambas de grandes e negativos impactos ambientais. Nesse cenário, se faz necessária a adoção de medidas alternativas e sustentáveis na geração de energia no país (BEN, 2020).

Figura 5 – Fontes de energia utilizadas no Brasil em 2020.

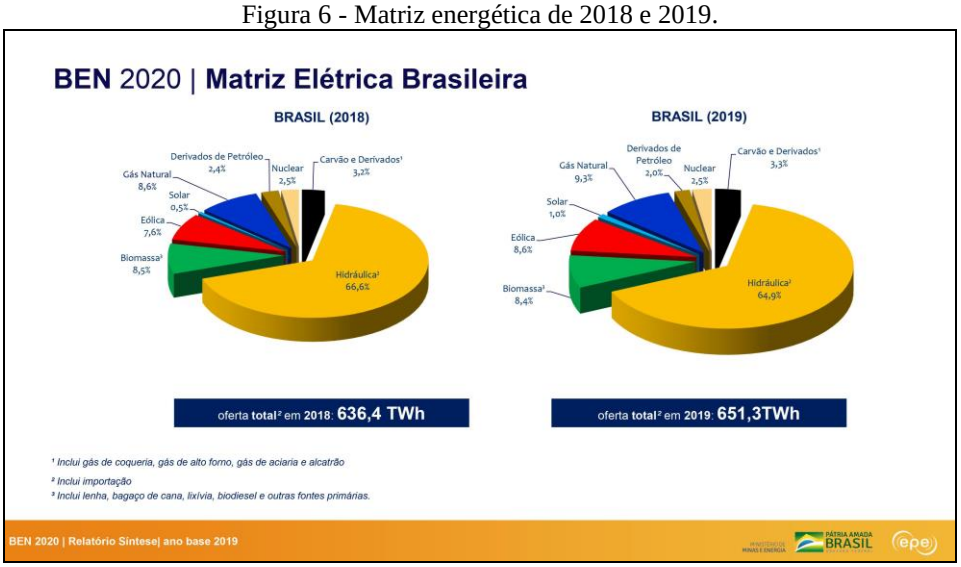
Fonte: EPE, 2020.

.

Para uma melhor eficiência energética, com o intuito de eliminar as crises hídricas e de combustíveis fósseis vivenciadas no país desde o início da década de 2000, é importante que se combinem outras fontes de energia renovável, assim complementando a oferta dos diversos setores dependentes delas (SORIANO et al., 2016).

A Figura 6 mostra que apesar da biomassa ser detentora de grande potencial para produção de energia e estar entre as fontes mais abundantes do país, ela ainda é pouco explorada atualmente no país, podendo ser observada uma redução em sua utilização se comparado o ano de 2018 e em relação ao ano de 2019.

Figura 6 - Matriz energética de 2018 e 2019.

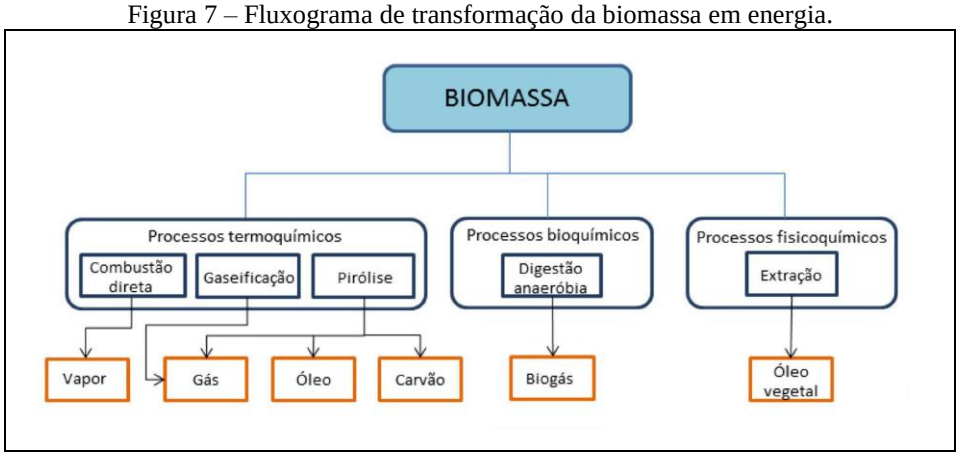


Fonte: EPE, 2019.

Além de tudo, a utilização de matérias orgânicas para a produção de energia contribui para a diminuição da dependência de hidrelétricas e combustíveis fósseis, diversificando a matriz energética do Brasil (VENCESLAU, 2018).

O processo de transformação da biomassa em energia que é mostrado na Figura 7 é realizado por meio de diversas tecnologias, no entanto, os mais utilizados são os termoquímicos, biológicos e físico-químicos. O biológico se dá através da utilização de microrganismos para a transformação de moléculas complexas em compostos mais simples e de elevado valor energético e utiliza o processo de fermentação e digestão anaeróbica, já o processo termoquímico é realizado por meio do calor (pirólise, gaseificação e combustão) que transforma a biomassa em energia térmica, sendo o processo mais utilizado na conversão da biomassa residual agrícola, florestal e industrial, e por último o físico-químico que é utilizado com vegetais oleaginosos, consistindo no processo de prensagem para produção de óleo (LOPES et al., 2019).

Figura 7 – Fluxograma de transformação da biomassa em energia.



Fonte: DIAS, 2017.

Em um estudo apresentado pela International Energy Agency (IEA) em 2018, foi mostrado que o Brasil tem um alto potencial de crescimento em energias renováveis e que a produção de energia a partir da biomassa desde o ano de 2016, pode ter um crescimento de 31% até o ano de 2026 se mantiver o avanço e o investimento energético do ano de 2018, como mostrado na Figura 8 (IEA, 2018).

Figura 8 - Capacidade de energia renovável no Brasil em 2026.

Capacidade de Energia renovável do Brasil em 2026

Setor	2026 (GW)	2016 (GW)	Δ 2016-2026 (%)
Hidráulico	103.5	89.7	+15%
Ondas	8.1	5.8	+40%
Biomassa	16.9	12.9	+31%
Vento	28.5	10.02	+184%
Solar	9.7	0,021	+46090%

Fonte: IEA, 2018.

Apesar de todas as significativas vantagens apontadas ao se utilizar biomassa, a falta de planejamento na sua produção pode acarretar prejuízos para o país. Um planejamento mau elaborado na produção biomassa através de madeira, por exemplo, pode ocasionar a formação de áreas de desmatamento pelo corte descontrolado de árvores no mesmo espaço, perdas de nutrientes contidos no solo,

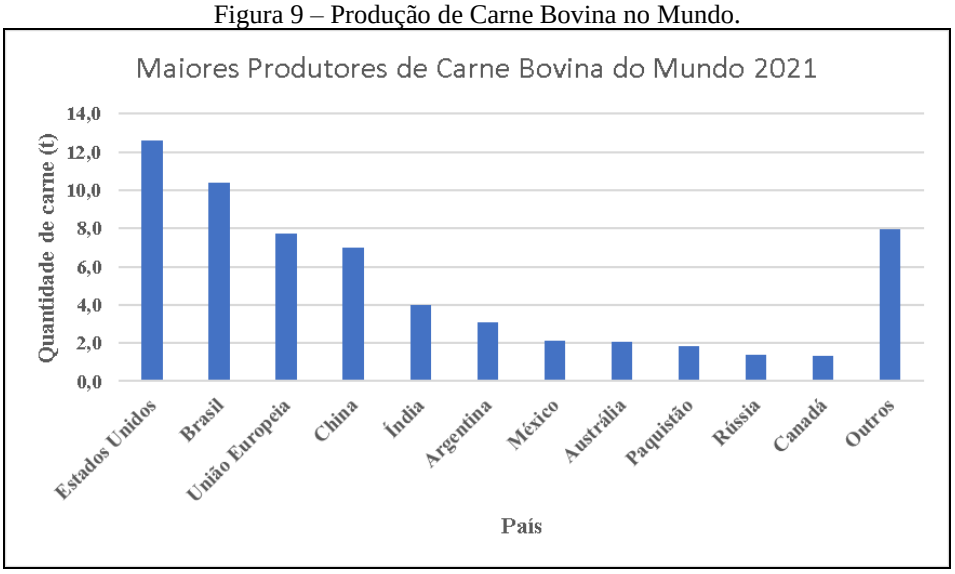
contaminação, destruição de habitats, alta produção de gases nocivos e até o desequilíbrio da fauna e flora com seus resíduos (ROCHA et al., 2020).

Segundo a agência nacional de energia elétrica (ANEEL), a maior potência outorgada na utilização de biomassa para a produção de energia vem da agroindústria com 11,9 milhões de kilowatts (kW) gerados, a segunda maior utilização de biomassa vem dos resíduos florestais, com 2,5 milhões de kilowatts (kW) e apesar de ser um dos países com uma das maiores produções de pecuária do mundo, a utilização desse tipo de biomassa oriunda dos animais, ainda está em 4,7 mil kilowatts (kW).

1.1.2. Biomassa da Pecuária no Brasil

O Brasil em 2021 é considerado como um dos principais países que atuam na produção e comércio de carne bovina no mundo (Figura 9), o que vem de um organizado e estruturado processo de desenvolvimento que aumentou não só sua produtividade como a qualidade também de seu produto brasileiro, elevando sua competitividade nesse mercado (STATISTA, 2021).

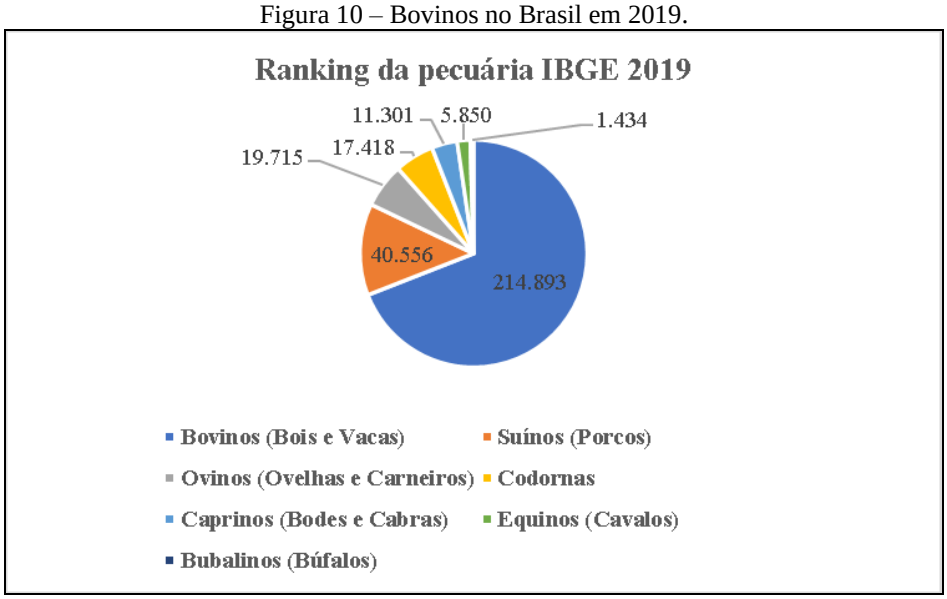
Figura 9 – Produção de Carne Bovina no Mundo.



Fonte: STATISTA, 2021.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE em 2019 no país existiam cerca de 214,8 milhões de bovinos (Figura 10), gerando assim uma grande quantidade de resíduos, pois cada bovino adulto pode defecar de 11 a 16 vezes por dia, produzindo assim cerca de 1,5 a 2,7 kg de fezes cada vez que realiza este processo (MATHEWS et al., 1996).

Figura 10 – Bovinos no Brasil em 2019.

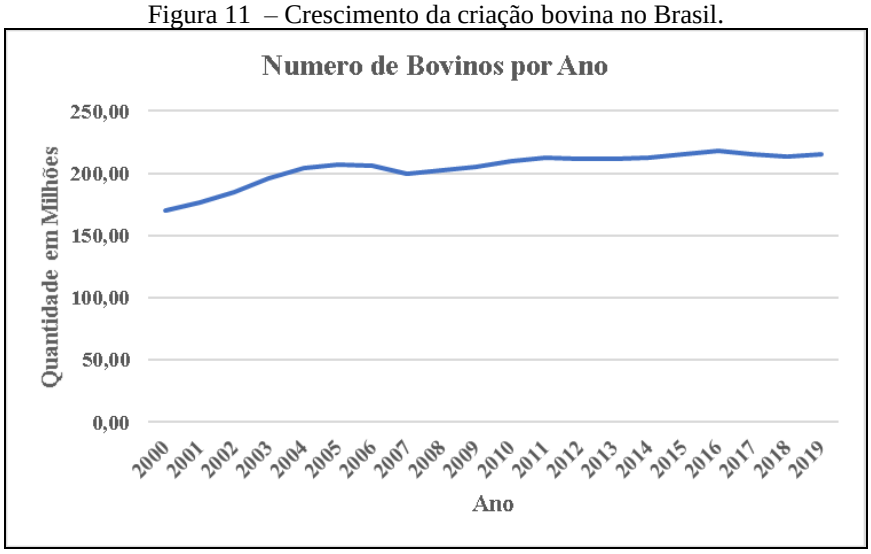


Fonte: IBGE, 2019.

Somando a quantidade de 214 milhões de bovinos que se tinha no país em 2019 e levando em consideração que, cada cabeça de gado pode gerar até 43 quilos de dejeto diário, se obtém um total de 9.2 bilhões de quilos de resíduos diários, podendo assim se ter uma noção de quão grande é o problema de geração de resíduos nesta área, sendo em sua maioria, descartados ou deixados ao ar livre sem nenhuma utilização.

Com uma demanda que está em constante crescimento (Figura 11), a criação de bovinos tanto para abate como para produção leiteira gera uma alta demanda de resíduos e com isso o aumento da preocupação com a destinação final dos mesmos e dos efeitos maléficos que estes podem vir a causar no meio ambiente.

Figura 11 – Crescimento da criação bovina no Brasil.



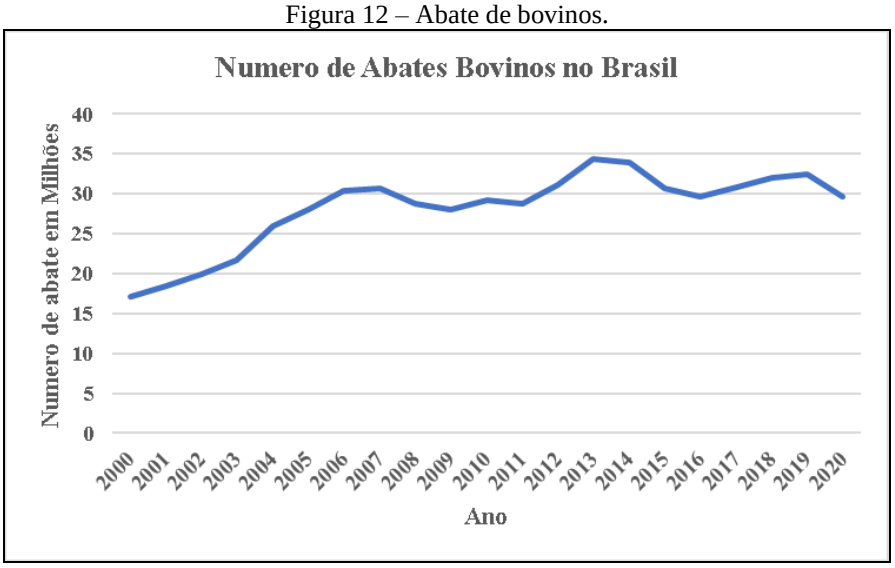
Fonte: SIDRA, 2019.

Até a década do ano de 1980, as grandes empresas pecuárias do Brasil e do Mundo viam a gestão ambiental como um custo adicional ao processo. Com a implementação da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1992 (ECO-92) no Rio de Janeiro, foi mudada essa visão sobre as questões de discussões ambientais sobre resíduos, ganhando maior notoriedade e sendo observada pelas empresas, como necessárias as atitudes de reaproveitamento (HENZEL, 2009). Apesar de se ter obtido uma melhora na questão ambiental, atualmente não se tem um aproveitamento total dos os resíduos gerados pela pecuária, temos como exemplo os resíduos gerados no abate bovino.

A prática de abate de animais, especialmente de bovinos, vem sendo desenvolvida desde o princípio da civilização humana, e sendo aumentada ao longo do tempo devido a padrões culturais convencionados no decorrer do tempo, com as atividades de pecuária, agricultura e com o crescimento da população (RIETH et al., 2019).

Com o aumento de produção de carne para o país e para a exportação, vem se elevando também o número de abates, na Figura 12 e segundo o IBGE só no ano de 2020 foram abatidos 29,7 milhões de bovinos no Brasil para suprir a demanda desejada, tendo assim um aumento de 75% no número de abates se comparado com o ano de 2000.

Figura 12 – Abate de bovinos.



Fonte: SIDRA, 2020.

No processo de abate são gerados resíduos (Tabela 1) nesses estabelecimentos, os resíduos podem ser, fragmentos de carne, pelos, ossos, gorduras, águas residuais, sangue, conteúdo intestinal e ou estomacal. Observando o ponto de vista econômico e ambiental, a maioria desses produtos residuais podem ser transformados em subprodutos, alimentos de animais, fertilizantes ou matéria para a indústria de rações (CONCLA, 2017).

Tabela 1 – Resíduos gerados no abate de gado

Resíduos Gerados no Abate Bovino	
Resíduos (Origem)	**Quantidade de (kg/cabeça, bovino de 250Kg de peso vivo)**
Esterco (currais/pocilgas)	4,5 kg
Pelos e partículas de couro (depilação)	-
Material não comestível para graxaria (ossos, gordura, cabeça, partes condenadas e etc.)	95 kg
Conteúdo estomacal e intestinal	20-25 litros
Sangue (abate)	15-20 litros

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CONCLA, 2017.

Mesmo com a possível utilização dos materiais gerados após os abates, a destinação incorreta ou incompleta por parte dos abatedouros, causa uma grande preocupação pelo aumento de volume na produção atualmente, gerando assim um grande impacto ambiental.

Os resíduos vindos do abate industrial de bovinos representam uma quantidade anual muito elevada e significativa como demonstrado na Tabela 2, consequentemente, a sua reutilização para outros fins, inclusive para a pesquisa da comunidade científica, é de suma importância, pois, podem colaborar coma redução do descarte de resíduos orgânicos no meio ambiente e o avanço da tecnologia.

Tabela 2 – Produtos e subprodutos do abate bovino em 2020

Produtos e subprodutos do abate bovino em 2020	
Dados	**Peso (kg)**
Peso vivo	7.250.000.000
Esterco (currais/pocilgas)	130.500.000
Carne desossada	2.320.000.000
Material não comestível para graxaria (ossos, gordura, cabeça, partes condenadas e etc.)	2.755.000.000
Couro	435.000.000
Vísceras comestíveis (língua, fígado, coração, rins e etc.)	304.500.000
Sangue (abate)	580.000.000
Conteúdo estomacal e intestinal	725.000.000

Fonte: IBGE 2020

Entende-se como impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultantes das atividades humanas, que direta ou indiretamente possam afetar a segurança, saúde e o bem-estar da população (CONAMA, 1986).

Os impactos ambientais principais gerados por um abatedouro estão relacionados a geração de efluentes líquidos com alta carga orgânica, a produção de odores concentrados, geração de resíduos sólidos e a poluição sonora devido ao maquinário e os animais (ARAUJO et al., 2014).

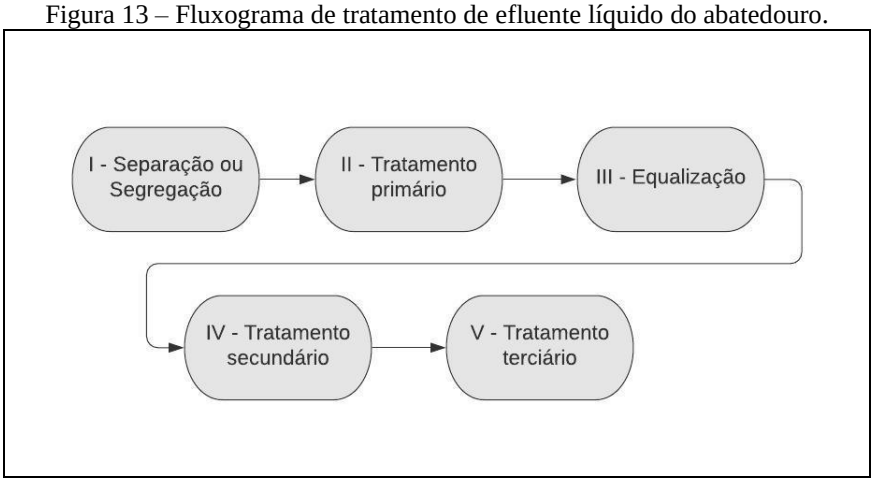
De acordo com o Art. 21 do Decreto nº 30.691/52 da Lei Federal nº 1.283/50, que especifica os estabelecimentos de carnes e derivados quanto a sua inspeção industrial e sanitária dos produtos de origem animal, entende-se que matadouro, abatedouro ou frigorífico é: "O estabelecimento dotado de instalações adequadas para a matança de quaisquer das espécies de açougue, visando o fornecimento de carne em natureza ao comércio de carne em sem dependências para industrialização; disporá, obrigatoriamente de instalações e aparelhagem para o aproveitamento completo e perfeito de todas as matérias primas e preparo de subprodutos não comestíveis".

Apesar do tratamento de resíduos ser obrigatório por lei de acordo com as resoluções 357/2005 e 385/2007 do CONAMA, onde previam que não se poderia descartar resíduos diretamente no fluxo de água natural, atualmente foram revogadas pela resolução 430/2011 do CONAMA, onde se diz que podem ser descartados resíduos diretamente no leito do rio desde que estejam com os valores mínimos descritos pela lei.

Com a flexibilização das leis e a falta de uma fiscalização criteriosa, alguns abatedouros, ainda descartam seus resíduos sem o tratamento correto no meio ambiente, geralmente descartados em aterros onde não se obtém a decomposição correta do material e ou clandestinamente em recursos hídricos próximos causando um forte odor durante seu curso e a degradação do meio ambiente (FEISTEL, 2011).

O Guia Técnico Ambiental de Abate Bovino e Suíno de 2008, diz que o efluente líquido do abatedouro deve ser submetido a cinco fases de tratamento, mostradas na Figura 13, sendo elas:

Figura 13 – Fluxograma de tratamento de efluente líquido do abatedouro.



Fonte – CETESB, 2008.

I – Separação ou segregação inicial dos efluentes líquidos em duas linhas principais: efluentes das áreas dos processos que envolvem sangue residual (Linha Vermelha) e processos que não envolvem sangue (Linha Verde);

II – Tratamento primário: Remoção de sólidos grosseiros, suspensos, sedimentáveis e flotáveis por ação mecânica;

III – Equalização: Junção dos efluentes das linhas verde e vermelha;

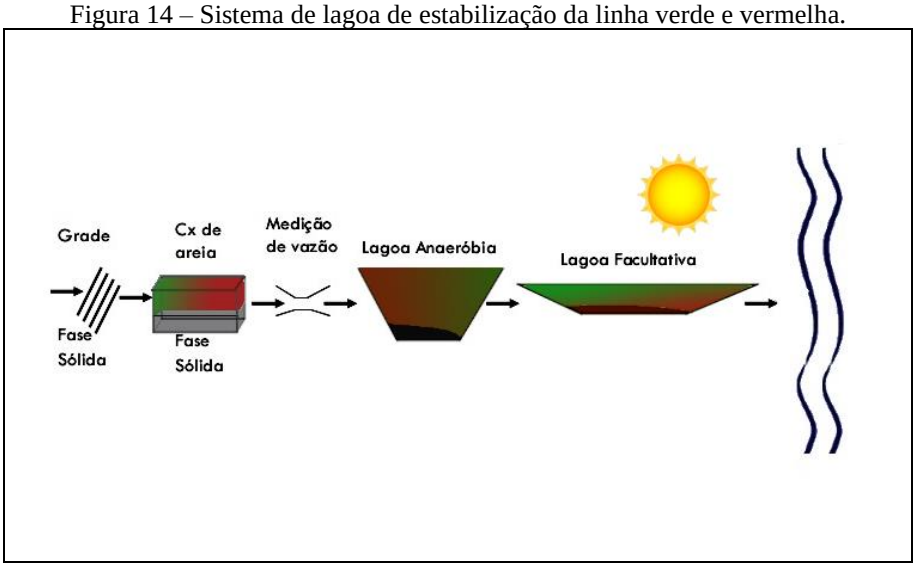
IV – Tratamento Secundário: Tratamento por ação biológica;

V – Tratamento Terciário: Ajustes das propriedades físicas, químicas e bioquímicas de acordo com as exigências legais para o descarte.

O despejo final dos resíduos deve ser feito de uma forma segura e sem gerar impactos ambientais e riscos para a saúde. As formas mais utilizadas para a destinação dos resíduos é o descarte em aterros sanitários, compostagem, queima, reutilização das graxarias (ossos, gordura, cabeça e partes condenadas) para produção de ração, uso parcial do sangue para a fabricação de farinha de sangue de boi e o couro para fabricação têxtil, sobrando assim a linha vermelha (resíduos de sangue) e a linha verde (resíduo intestinal e estomacal) que são tratados em sua maioria em sistema de lagoas de estabilização em série, de acordo com o esquema na Figura 14, resultando em

um efluente final com 70% de eficácia de tratamento, podendo assim ser descartado no corpo de água do rio (MALLMANN, 2019).

Figura 14 – Sistema de lagoa de estabilização da linha verde e vermelha.



Fonte – Adaptado de ORTIZ, 2013.

A linha vermelha é composta com os resíduos líquidos que sangue de várias áreas do abate em diante, inclusive da higienização e limpeza do abatedouro, já a linha verde é formada pelo conteúdo estomacal e intestinal dos animais abatidos após a passagem pelo filtro de sólidos (KLANK, 2011)

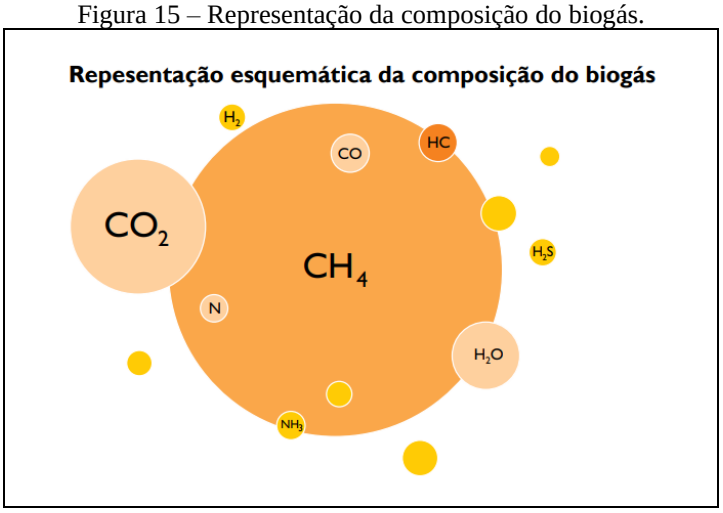
A linha vermelha e a linha verde contêm um alto teor de matéria orgânica, material que geralmente não é utilizado para outros fins além do descarte. O processo de utilização de resíduos com alto teor orgânico para a produção de biogás vem crescendo em todo o mundo. Com o avanço das tecnologias dos biorreatores, as possibilidades de produção de biogás com novas fontes de biomassa, resíduos e substratos vem se tornando uma das principais atividades mundiais, pois, o biogás é uma alternativa sustentável de geração de energia térmica, elétrica e mecânica, se tornando assim um meio alternativo de redução dos passivos ambientais (CIBIOGAS, 2019).

1.2. Biogás

Sendo descoberto por volta do ano de 1667 por Tomas Shirley, quando se observou a existência de um gás inflamável desconhecido em regiões de pântano, que mais para frente resultaria na descoberta da decomposição de matéria orgânica, sendo sua composição química descoberta só um século depois pelo físico Alessandro Volta (CIBIOGÁS, 2019).

O biogás é uma mistura de gases representados na Figura 15, que são gerados com da degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, sendo composto principalmente por metano (CH_4) (40-75%) e dióxido de carbono (CO_2) (15-60%), podendo conter também traços de vapor de água (H_2O) (5- 10%), sulfeto de hidrogênio (H_2S) (0,005 -2%), siloxanos (0-0,2%), hidrocarbonetos (HC) (<0,6%), amônia (NH_3) (<0,1%), oxigênio (O_2) (0-1%), monóxido de carbono (CO) (<0,6%) e nitrogênio (N_2) (0-2%), podendo variar de acordo com o material utilizado na decomposição e da eficiência do biodigestor (GHOUALI et al., 2015).

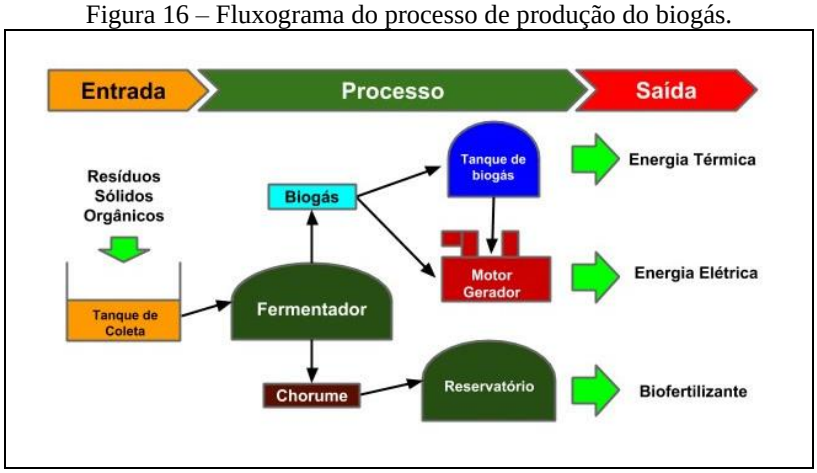
Figura 15 – Representação da composição do biogás.



Fonte – KONRAD et al., 2016.

Sendo que de todos os gases obtidos no processo de degradação da matéria orgânica, o metano CH_4 é o de maior importância devido ao seu poder calorífico, sendo que um biogás com cerca de 65% de metano (CH_4) pode ter um poder calorífico de 22,3 kJ/m^3 que pode ser utilizado para a produção de energia, como também o seu biofertifizante que é o resíduo gerado após o processo de digestão da matéria orgânica, que pode ser utilizado como adubo e é demonstrado na Figura 16 (ARAUJO et al., 2014).

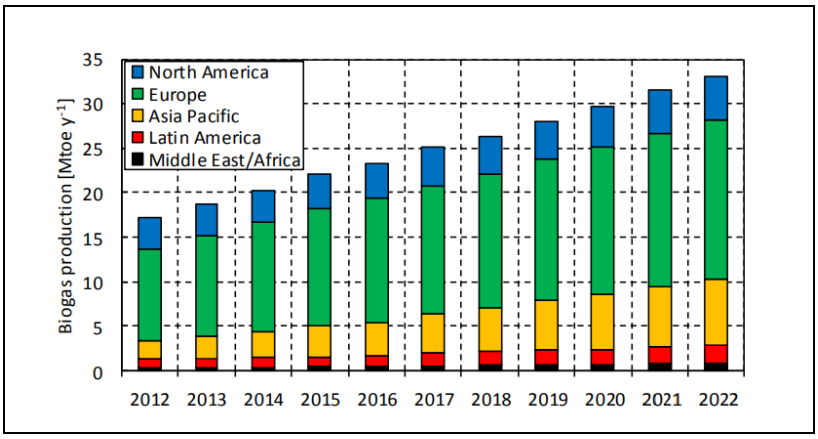
Figura 16 – Fluxograma do processo de produção do biogás.



Fonte: FAHOR, 2018.

Na Figura 17, podemos observar que já a algum tempo, o aproveitamento do biogás foi um método adotado pelos países desenvolvidos como consequência da melhora do tratamento dado aos resíduos orgânicos visando uma melhoria do saneamento ambiental, e sempre com projeções de aumento da produção. As estações de tratamento que geram biogás passaram a ser tratadas como Plantas de Biogás, onde o principal produto é o biogás gerado (RABONI et al., 2015).

Figura 17 – Projeção da produção mundial de biogás.



Fonte – RABONI et al., 2015.

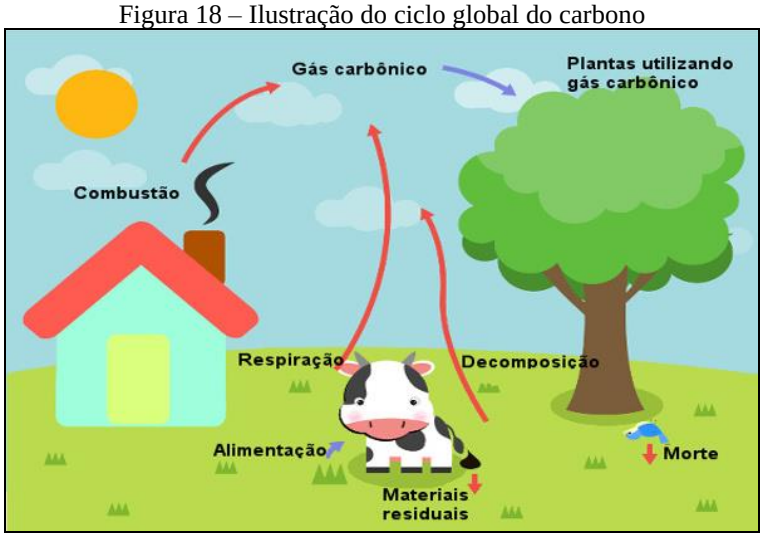
Sendo composto em sua maioria pelo gás metano (CH_4), o biogás quando lançado na atmosfera sem nenhum tratamento, apresenta um potencial de poluição 21 vezes superior que o dióxido de carbono (CO_2) no que se refere ao efeito estufa, sendo sua utilização na geração de energia um benefício, pois, quando se realiza a queima o

metano se obtém monóxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) (Equação 1), sendo um gás menos nocivo para a camada atmosférica (GIODA, 2018).

$$\mathbf{CH_{4(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(g)}} \qquad \text{Equação 1}$$

A produção de biogás faz parte do ciclo global do carbono onde o carbono gerado na queima e produção do biogás em forma de CO_2 é consumido novamente pelas plantas e organismos, retornando assim para o meio ambiente e completando um ciclo de extrema importância para a vida (Figura 18).

Figura 18 – Ilustração do ciclo global do carbono



Fonte: SANTOS, 2017.

Anualmente a biodegradação natural de matéria orgânica em condições anaeróbicas libera entre 590 a 800 milhões de toneladas de metano direto na atmosfera. Essa produção pode ser utilizada na exploração do sistema de produção de biogás na utilização de processos bioquímicos para a decomposição de vários tipos de biomassa, conseguindo o aproveitamento do gás gerado, para a produção de energia e a redução da emissão de CH_4 direto na atmosfera (INBS, 2019).

1.2.1. Biogás no Brasil

No Brasil durante a crise energética da década de 70 (Figura 19), houve uma grande busca por energias alternativas, despertando o interesse na produção de biogás em biodigestores. Nos dias atuais com o fim da crise o interesse maior na área de produção de biogás está relacionado a esse método ter uma capacidade de estabilização

de vários tipos de resíduos e a geração de renda extra, aliado a necessidade cada vez maior da preservação do meio ambiente (BNDES, 2020).

Figura 19 – Jornal O Estado de S. Paulo anunciando a crise de energia de 1973.

O ESTADO DE S. PAULO

Crise do petróleo altera aspecto das cidades

A falta de combustível paralisa os automóveis holandeses, escurece as ruas de Londres e tornará mais frio o inverno nos Estados Unidos

Os automóveis belgas também estão parando

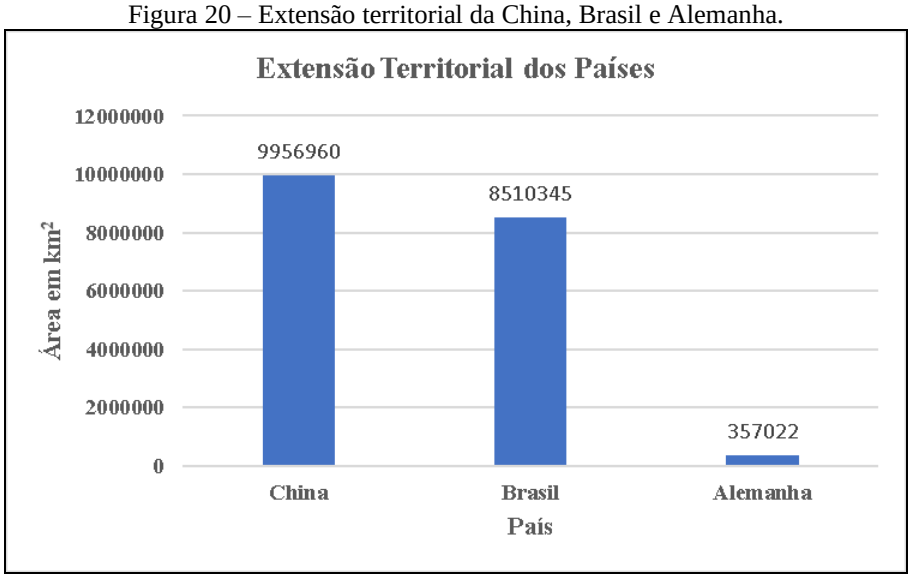
EUA, da era do desperdício ao futuro da quase escassez

Fonte: ESTADÃO, 1973.

Existe uma evidente vantagem competitiva do Brasil em relação ao custo inferior das culturas, pois, possui um vasto território de produção animal e com isso a geração de grandes quantidades de resíduos agroindustriais, que são gerados por uma crescente produção anual quando comparado a outros países, abrindo possibilidades para o aumento da escala da exploração industrial na área do biogás no país, especialmente com relação aos resíduos agroindustriais e da pecuária (FILHO et al., 2017).

Mesmo com essas vantagens de maior área territorial com produção de resíduos passiveis de geração de biogás, o Brasil não é o líder mundial em produção desta área, países como a China que apesar de maior em território, não possui a produção agropecuária do Brasil e ainda assim consegue ser o líder mundial em produção de biogás, e a Alemanha que tem 4,2% do tamanha do Brasil (Figura 20), mas é o segundo maior produtor de biogás do mundo (STATISTA, 2021).

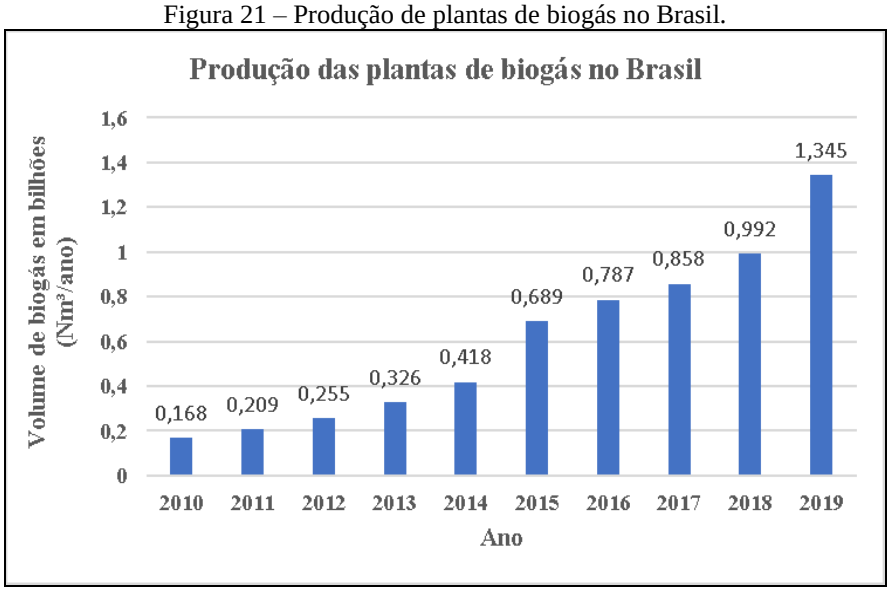
Figura 20 – Extensão territorial da China, Brasil e Alemanha.



Fonte: IBGE, 2020.

Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (CIBiogás) em 2019 no Brasil existiam cerca de 548 plantas de biogás, sendo que destas 521 encontram-se em operação para fins energéticos, produzindo um total de 1,3 bilhões de metros cúbicos ano, o que vem mostrando um crescimento da produção no país se comparado ao ano de 2010 (Figura 21).

Figura 21 – Produção de plantas de biogás no Brasil.

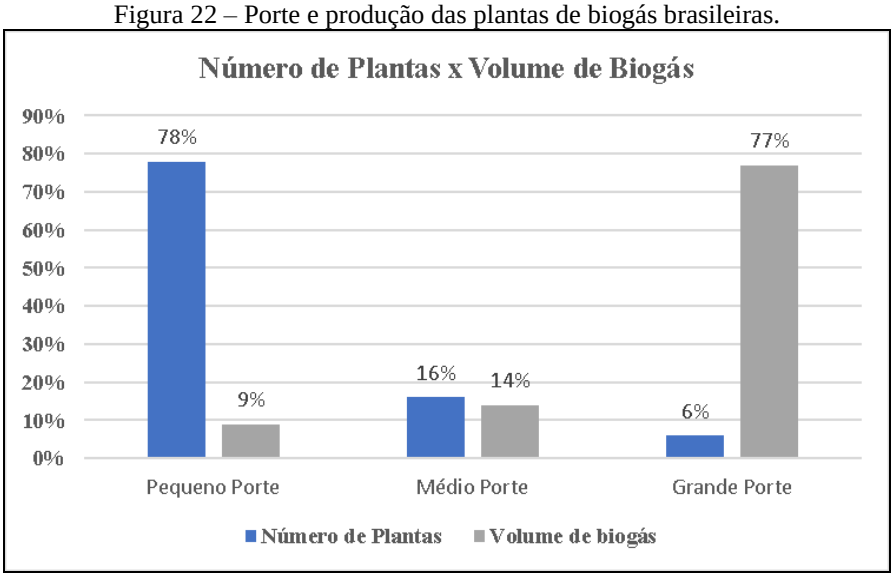


Fonte: CBIOGÁS, 2019.

Apesar de um aumento representativo na produção do país, a implementação de novas plantas ainda é de extrema complexidade burocrática, se tornando uma dificuldade para novos produtores interessados na implementação. Em 2020 o Projeto de Lei 2193/20 foi apresentado ao governo com intuito de facilitar a criação de novas plantas de biogás com a utilização de resíduos e prever a redução fiscal para incentivar o aumento de plantas no país, conseguindo assim um crescimento dessa área nos próximos anos, caso seja aprovada.

A Figura 22 mostra que no Brasil 78% das plantas de produção de biogás em operação, são classificadas como pequeno porte, produzindo cerca de 1 mi Nm^3 por ano de biogás, mas essas plantas representam apenas 9% do volume total produzido no país. O volume maior de biogás está concentrado nas plantas de grande porte, conseguindo alcançar 77%, apesar de ser a categoria que tem o menor número de plantas, sendo representada por apenas 6% do total de biogás brasileiro (CIBIOGÁS, 2019).

Figura 22 – Porte e produção das plantas de biogás brasileiras.



Fonte: CIBIOGÁS, 2019.

Nessas plantas o principal método de produção do biogás utilizado é a quebra biológica de material orgânico na ausência de oxigênio, conhecida como biodigestão anaeróbica, onde os micro-organismos digerem a matéria-prima em um reator controlado, produzindo biogás com 50% a 70% de metano. Podendo o biogás ser melhorado por vários métodos posteriores (absorção, adsorção, filtração por membrana,

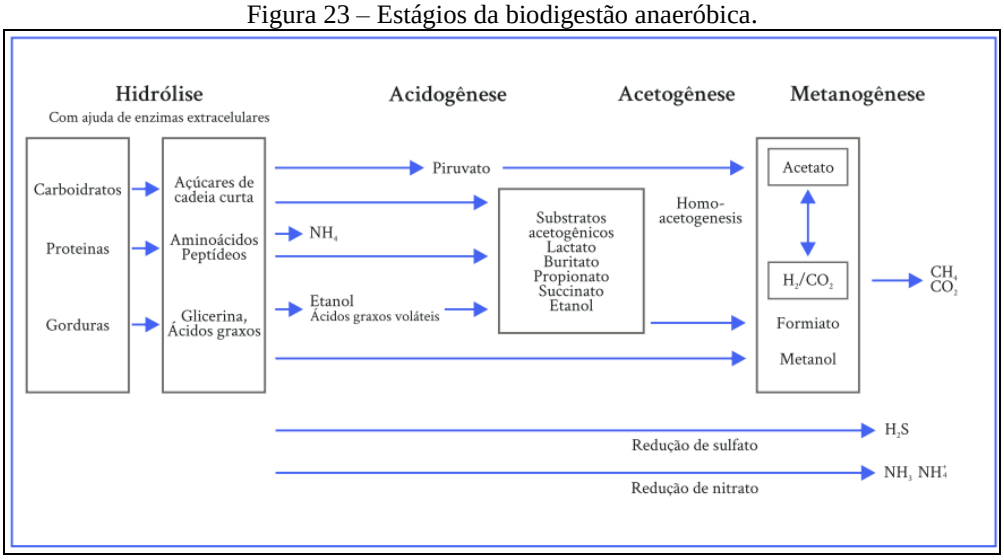
separação criogênica), resultando em uma elevação da percentagem de metano e aproximando o biogás ao gás natural fóssil (CIBIOGAS, 2019).

1.3. Biodigestão Anareróbica

A produção de biogás na digestão anaeróbica é realizada por um ecossistema onde vários grupos de micro-organismos trabalham de forma interativa na conversão de matéria orgânica. Ocorrendo por várias reações sequenciais e requerendo a mediação de diversificados grupos de microrganismos, os quais desenvolvem metabolismos coordenados e independentes, contribuindo para a estabilidade do sistema, encontrando como substrato, os sólidos voláteis dos dejetos (COELHO, 2018).

O processo é desenvolvido em quatro estágios principais que são demonstrados na Figura 23: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese, sendo que para cada estágio estão envolvidas diferentes populações microbianas, em sintrofia, necessitando assim de diferentes condições ambientais (KUNZ et al., 2019).

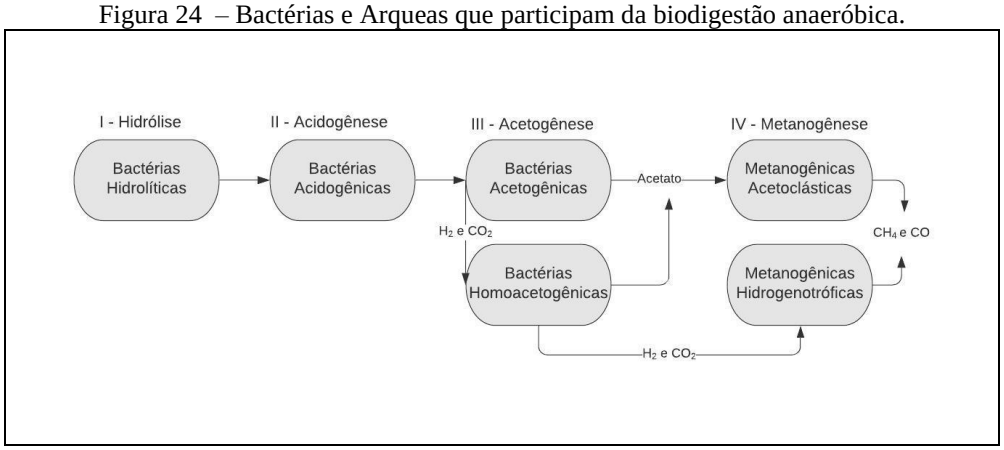
Figura 23 – Estágios da biodigestão anaeróbica.



Fonte: KUNZ et al., 2019.

Muitas espécies bacterianas e arqueas fazem parte do processo de fermentação da matéria orgânica (Figura 24) entre as etapas da hidrólise e a oxidação dos intermediários, tendo um papel fundamental no final do processo de formação de metano, que é obtido principalmente a partir de acetato e H_2/CO_2 por Arqueas Metanogênicas. Portanto, o equilíbrio da interação entre os microrganismos dessa cadeia de degradação é fundamental para a transformação contínua dos intermediários formados e uma eficiente produção de biogás (SUNDBERG et al., 2013)

Figura 24 – Bactérias e Arqueas que participam da biodigestão anaeróbica.



Fonte: Adaptado de FONSECA, 2016.

Etapa I (HIDRÓLISE): A etapa da hidrólise degrada compostos de alta massa molecular como os lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis. Esse processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas (KUNZ et al, 2019).

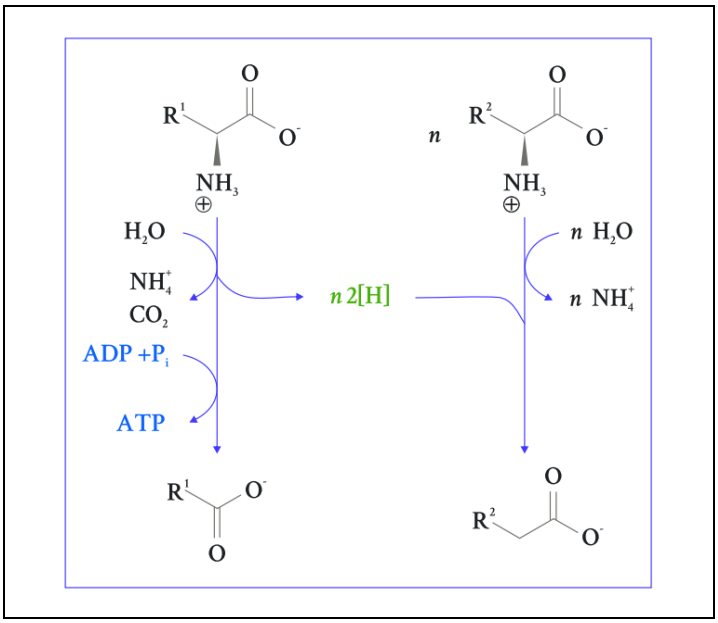
A importância da etapa de hidrólise na velocidade de degradação é dependente da característica do substrato envolvido. Quando a matéria orgânica presente é complexa e de difícil degradação, a hidrólise tem grande importância na velocidade global de degradação, podendo ser considerada como etapa limitante da velocidade da digestão anaeróbia (KUNZ et al., 2019).

O tempo de duração da etapa de hidrólise varia de acordo com as características do substrato, sendo de poucas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídios, já a lignocelulose e lignina são hidrolisadas mais lentamente, muitas vezes de maneira incompleta (KUNZ et al., 2019).

Etapa II (ACIDOGÊNESE): Na etapa da acidogênese, os monômeros formados na fase hidrolítica são utilizados como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e facultativas, sendo degradados na fase acidogênica a ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas com 1 a 5 carbonos (ex. ácidos butírico, propiônico e acético), álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono. A pressão parcial de hidrogênio durante o processo pode afetar diretamente o estado de oxidação dos produtos, se muito elevada ela resultará em produtor com maior quantidade de carbono (KUNZ et al., 2019).

Os carboidratos, como glicose, são degradados em piruvato e esse produto é convertido em ácido láctico por *Lactobacillales* e em etanol pela ação de leveduras. Os ácidos graxos são degradados, por exemplo, pela *Acetobacter por β-oxidação*. Portanto, os ácidos graxos devem ser ligados a coenzima A e a oxidação ocorre passo a passo através da liberação sequencial de duas unidades de carbono, na forma de acetato. Já os aminoácidos são degradados em pares pelo *Clostridium Botulinum* através da reação de Stickland (Figura 25), onde um aminoácido serve como doador de elétron e outro como aceptor. Essa reação resulta na formação de acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (KUNZ et al., 2019).

Figura 25 – Reação de Stickland.



Fonte: KUNZ et al., 2019.

Etapa III (ACETOGÊNESE): A etapa da Acetogênese é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas, que estabelecem uma relação de sintrofia com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas (KUNZ et al., 2019).

Os ácidos de cadeia longa são quebrados e transformados em ácidos com um ou dois átomos de carbono apenas (ácido fórmico e acético) e simultaneamente obtendo a produção de H_2 e CO_2, que reagem com as bactérias homoacetogênicas que controlam o equilíbrio da reação, realizando o consumo de H_2 e CO_2 e produzindo o acetato, como demonstrado na Equação 2 (KUNZ et al., 2019).

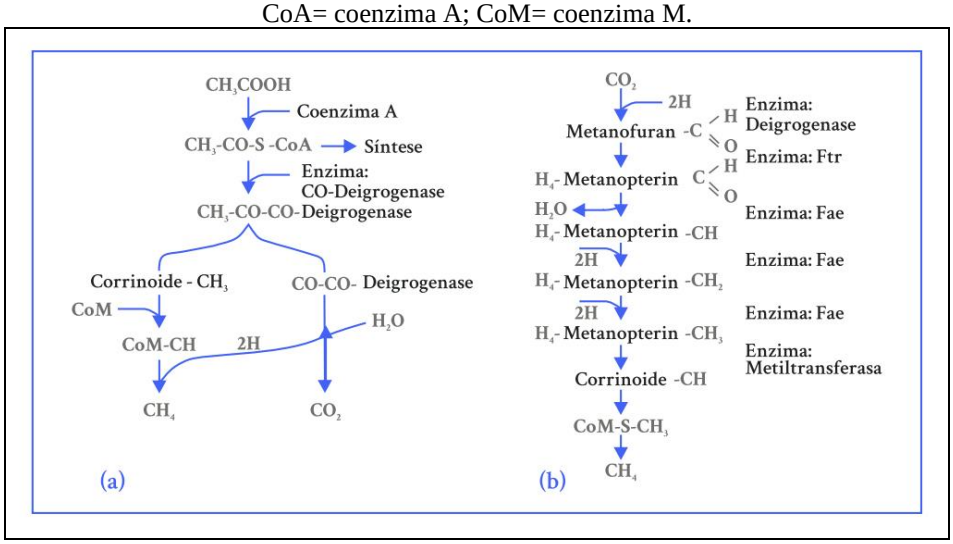
$$2CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_3COOH + 2H_2O$$ Equação 2

O grupo bacteriano dessa etapa tem um crescimento relativamente lento, tempo de duplicação mínimo de 1,5 a 4 dias. As reações que produzem são muito mais complexas energeticamente e são interrompidas facilmente por acumulo de gás hidrogênio dissolvido no meio (SALOMON, 2007).

Etapa IV (METANOGÊNESE): É a etapa final da biodigestão e acontece em condições estritamente anaeróbicas, transformando o hidrogênio H_2, o gás carbônico CO_2 e o carbono contido na amostra em metano CH_4 e CO_2 através das arqueas metanogênicas (KUNZ et al., 2019).

As arqueas metanogênicas são divididas de acordo com suas vias metabólicas (Figura 26) em acetoclástica e hidrogenotróficas. As arqueas metanogênicas acetoclásticas (ex. *Methanosarcina*) convertem acetato a metano e as arqueas metanogênicas hidrogênotróficas (ex. *Methanobacterium* e *Methanospirillum*) convertem hidrogênio H_2 e dióxido de carbono CO_2 a metano, sendo as duas reações, exotérmicas (KUNZ et al., 2019).

Figura 26 – (a) Formação de metano pelo acetato; (b) formação de metano pelo dióxido de carbono. CoA= coenzima A; CoM= coenzima M.



Fonte: KUNZ et al., 2019.

Existe uma quinta etapa que acontece paralela a esse sistema das quatro etapas, a Sulfetogênese, onde bactérias redutoras de sulfato que são compostas de grupos de bactérias que utilizam o sulfato como agente oxidante vão reduzi-lo

(dependendo do substrato a ser degradado), substratos de possuem enxofre em sua composição e ou que são ricos em proteínas podem se decompor via sulfetogênese e gerar H_2S e CO_2 (CHERNICHARO et al., 2008).

1.3.1. Fatores que influenciam o Processo de Biodigestão Anaeróbica

Todo processo biológico depende de fatores que, se não forem cumpridos ou respeitados, podem representar o fracasso de todo o sistema e consequentes perdas dos processos energéticos do sistema, reduzindo seu potencial de produção. Fatores como temperatura, pH, teor de nutrientes, presença de inibidores, tipologia do substrato, inóculo, disponibilidade de microelementos e tamanho das partículas, presença de materiais tóxicos entre outros, afetam a produção em um biodigestor (KUNZ et al., 2019). Entre os fatores mais importantes, estão:

a) O substrato

A dieta a que os animais são submetidos é a principal responsável pela grande variação existente entre os potenciais de produção de metano encontrados nos experimentos de biodigestão anaeróbica com dejetos, onde, na maioria das vezes, o ingrediente de maior proporção da dieta é o que determina a qualidade final do resíduo utilizado (ZANATO, 2014).

b) A temperatura

Na atividade do biorreator, a condição para que os micro-organismos tenham um melhor desenvolvimento e gerem quantidades satisfatórias de biogás (Tabela 3), é de extrema importância, pois, é preciso que se tenha uma fonte de calor externa que seja contínua para uma melhor atividade de produção (KARLSSON et al., 2014).

Sendo um fator que afeta a taxa de crescimento dos micro-organismos por eles não terem a capacidade de controlar sua temperatura interna, dependendo assim da temperatura do ambiente ou de um controle externo, que vai ser importante para as reações enzimáticas, a dissociação dos compostos e na multiplicação dos organismos dentro do biorreator, sabendo-se que a temperatura ideal para a formação de metano é de 35°C a 37°C (MAZARELI, 2015).

Tabela 3 – Condições de temperatura para os microrganismos

Microrganismos	Temperatura ótima (ºC)	Variação de temperatura (ºC)
Termofílicos	60	45 a 70
Mesofílicos	37	20 a 45
Pscicrofícos	15	0 a 20

Fonte: MAZARELI, 2015.

A elevação da temperatura tem vários benefícios, como uma alta solubilidade dos compostos orgânicos, melhora das velocidades de reações bioquímicas e também um aumento na taxa de eliminação de patógenos, mas influencia diretamente em parâmetros como a dissociação da amônia, podendo ter um efeito inibitório, causando uma toxicidade para as arqueas metanogênicas, pois o NH_3 (aquoso) consegue facilmente passar pela membrana celular dos microrganismos e causar um desequilíbrio (KUNZ et al., 2019).

c) Potencial Hidrogeniônico (pH)

O valor do pH ótimo pode variar para cada grupo de microrganismo (Tabela 4), em baixos valores de pH os principais produtos gerados são o ácido butírico e o acético, enquanto que no pH mais elevado, os produtos gerados são os ácidos propiônicos e acéticos. Durante a reação de biodigestão, também são produzidos ácidos voláteis que tendem a reduzir o pH do meio, sendo essa redução combatida com a atividade das arqueas metanogênicas, que produzem alcalinidade em forma dióxido de carbono, bicarbonato e amônia (KUNZ et al., 2019).

Tabela 4 – pH ótimo para os microrganismos

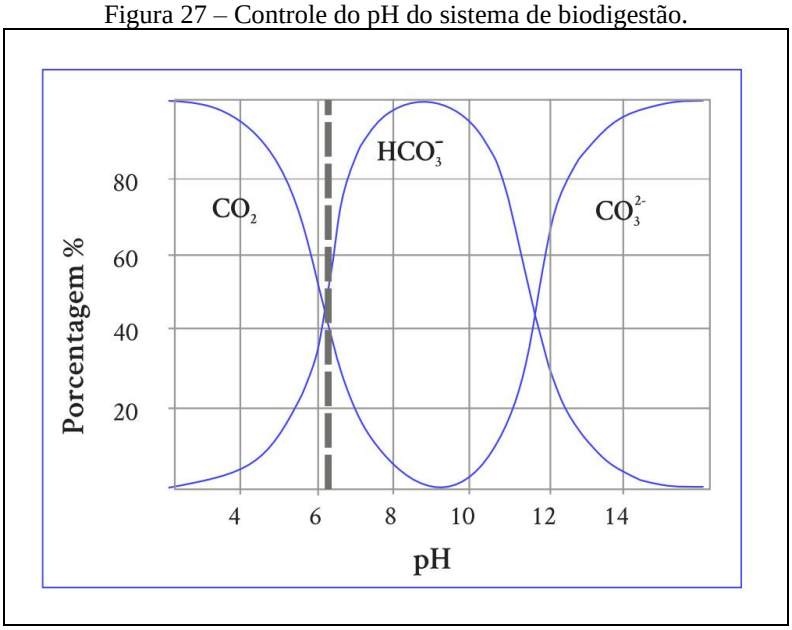
Microrganismos	Valor ótimo (pH)
Arqueas Metanogênicas	6,7 e 7,5
Fermentativos	4,0 e 8,5

Fonte: KUNZ et al., 2019.

O controle do pH do sistema é regulado pela concentração de dióxido de carbono em fase gasosa CO_2 e HCO_3^- alcalino na fase líquida (Figura 27), em pH 4 quase todo o CO_2 vai estar na forma livre, já em pH 13 ele estará dissolvido em sua

maioria no substrato, tornando o ponto de equilíbrio em pH 6,52. Durante a biodigestão anaeróbica o dióxido de carbono CO_2 é liberado continuamente em forma de gás, mostrando que se o pH do meio diminuir excessivamente, uma quantidade maior de CO_2 vai permanecer dissolvido nomeio reacional e se o pH do sistema aumentar, o CO_2 dissolvido formará o ácido carbônico, assim os íons de hidrogênio serão liberados (DEUBLEIN et al., 2011).

Figura 27 – Controle do pH do sistema de biodigestão.



Fonte: KUNZ et al., 2019.

O valor ótimo do pH pode variar dependendo das características do reator e do substrato utilizado, podendo variar e sendo necessário o acompanhamento durante o processo para uma melhor eficácia no processo de biodigestão anaeróbica (KUNZ et al., 2019).

d) Tempo de retenção

É o tempo em que o substrato irá ficará no reator para que ocorra a degradação adequada de acordo com a matéria orgânica existente no meio, esse tempo pode variar de reação para reação e também de acordo com o tamanho do biodigestor, geralmente se leva cerca de 30 a 45 dias, porém em algumas situações é possível verificar a produção do biogás logo nos primeiros dias de retenção hidráulica, isso é claro em menores proporções. Em sistemas de biodigestores contínuos é mais comum observar essa variação (JORGE et al., 2012).

e) Agitação

A agitação durante o processo (no mínimo de 24 em 24h) é necessária devido a formação de colônias de bactérias que ficam isoladas no substrato orgânico, que precisam ser espalhadas uniformemente para um melhor processo de biodigestão e também devido as bolhas de biogás produzidas ficarem presas no meio, inibindo a formação de mais metano pelas arqueas metanogênicas (BACCA, 2020).

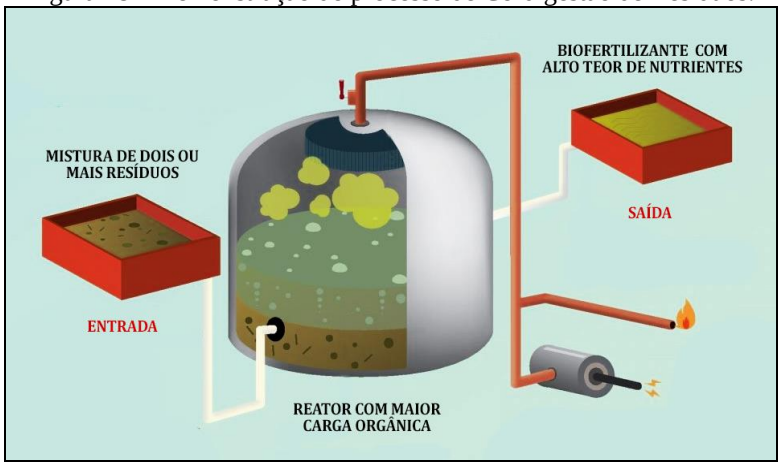
f) Excesso de Água

A diluição do substrato é um fator que tem influência direta na biogidestão, pois, quanto maior a quantidade de água, menor vai ser a quantidade de sólidos totais e de matéria orgânica no meio, tendo uma menor produtividade com menor atividade das bactérias presentes. Segundo Assunção (2020) o substrato sem nenhuma diluição tem uma boa produtividade de metano CH_4, mas leva longos períodos para o início de sua produção, as diluições mais eficazes são aquelas próximas de 50%, pois apresentam taxas de produção altas em períodos de tempo curtos.

1.4. Co-digestão Anaeróbica

A co-digestão anaeróbia é um processo de tratamento de resíduos sem a presença de oxigênio, em que diferentes tipos de resíduos passíveis de fermentação são misturados e tratados conjuntamente no processo de biodigestão, gerando o biogás, sendo demonstrado na Figura 28 (MATOS, 2016).

Figura 28 – Demonstração do processo de Co-digestão de Resíduos.



Fonte: Adaptado de RODRIGUES et al., 2017.

Podendo de ser preferencialmente aplicada para melhorar o rendimento do processo de biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, por poder propiciar o equilíbrio de nutrientes e o aumento de matéria orgânica no meio, tendo um potencial de biodegradabilidade maior, além de incorporar uma biomassa mais adaptada à bioestabilização dos resíduos, realizando assim o tratamento de dois subprodutos simultaneamente em um mesmo processo (LOPES et al., 2019).

Segundo estudos realizados por Costa (2014) notou-se que há um aumento na produção de metano e demais gases que são gerados no processo de biodigestão anaeróbica, quando se utilizam outros substratos juntos como co-digestores, em seu estudo foi utilizado urina, fezes e água de lavagem para o processo, conseguindo uma melhora na geração de biogás e redução de sólidos.

Alves (2016) analisou a produção normal de biogás em um reator anaeróbico com um substrato e a comparou com a produção utilizando a co-digestão anaeróbica no mesmo reator e conseguiu verificar um aumento de 70% na produção de biogás no reator que utilizou a co-digestão, mostrando uma maior eficácia utilizando este processo.

O processo pode ser aplicado em diferentes tipos de resíduos, entre eles o esgoto sanitário, restos de poda, dejeto de animais, resíduos de industrias, resíduos orgânicos urbanos e outros. Mas é necessário que haja uma relação de mistura adequada entre eles e um estudo aprofundado, para que ocorra uma facilitação no processo de biodigestão, proporcionando uma melhor viabilidade para a planta de produção e para o tratamento (ZHAO, 2020).

Nesse processo, é importante a escolha do melhor co-substrato e sua relação com o inóculo, tendo o objetivo de promover interações positivas. As melhorias na produção de biogás são resultado principalmente do aumento da carga orgânica e a estabilização do meio. No entanto, a co-digestão também pode criar sinergia entre substratos, diluir compostos inibidores/tóxicos e/ou aumentar a estabilidade do digerido dentro do reator (ASTALS et al., 2013).

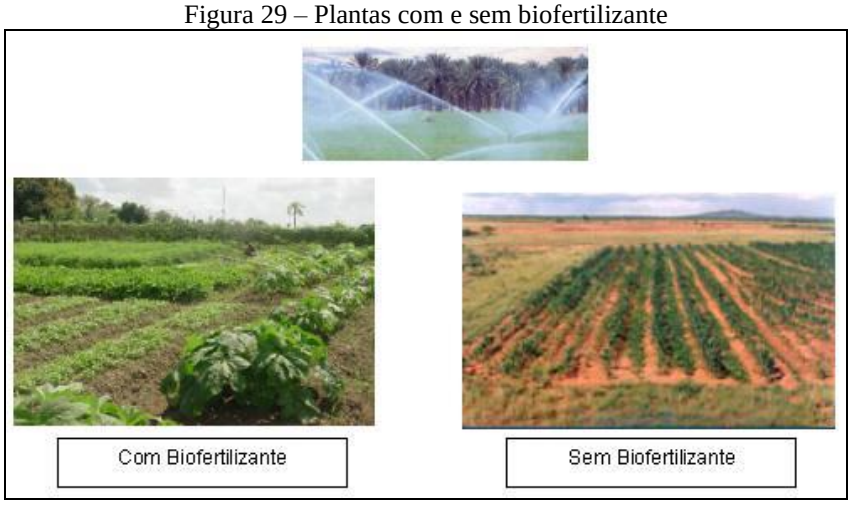
A utilização de resíduos pode melhorar a relação carbono e nitrogênio (C/N) do substrato, equilibrar os nutrientes e como produto pode gerar além do biogás, também ao final do processo, um biofertilizante mais concentrado o que agrega valor à atividade e ao produto (MALLAMANN, 2019).

1.5. Biofertilizantes

O uso dos biodigestores gera inúmeras vantagens econômicas e ambientais, não só como a produção de energia alternativa, mas também como uma possibilidade de tratamento seguro de efluentes, e na produção de biofertilizantes, que podem ser usados para a aplicação direta na produção de pastagem destinada à alimentação pecuária e como insumo na agricultura (PASCHOETO et al., 2017).

Segundo a Agência Embrapa de Informação Tecnológica – AGEITEC (2018), o biofertilizante é um subproduto obtido ao final da fermentação anaeróbica de resíduos ou dejetos de animais na produção de biogás, tendo uma complexa composição de nutrientes primordiais às plantas, como o Nitrogênio, Fosforo e Potássio que são essenciais para o crescimento e correto desenvolvimento (Figura 29).

Figura 29 – Plantas com e sem biofertilizante



Fonte: STUCHI, 2015.

Sob forma líquida, o biofertilizante contém uma complexa composição de nutrientes concentrados, atuando como fertilizante e também como defensivo agrícola, erradicando pragas, doenças e insetos sem a necessidade de venenos industriais. A sua utilização permite o reaproveitamento de um resíduo e a manutenção do solo em relação aos níveis adequados pela presença de micro e macronutrientes disponíveis (ARAUJO, 2012).

Para a utilização direta na lavoura, o líquido retirado do biodigestor pode ser aplicado na região foliar ou mesmo nos caules das plantas, desde que seja em borrifadores, uma outra opção é a decantação ou filtração do biofertilizante líquido,

produzindo uma massa sólida que, depois de seca, pode ser aplicada direto nas covas ou no solo, podendo substituir parcial ou totalmente os adubos químicos (AGEITEC, 2018).

De acordo com a Resolução nº481, de 3 de outubro de 2017 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, para a utilização adequada do biofertilizante é necessário conhecer a composição física, química e biológica do material, para que o mesmo possa ser utilizado de forma segura sem contaminar o ambiente e para que seja melhor aproveitado para as culturas.

A grande capacidade de fertilização do biofertilizante provem do fato que durante a digestão da biomassa no interior do reator, acontece a diminuição do teor de carbono presente na mesma, ocorrendo porque durante o processo é gerado grandes quantidades de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), favorecendo também o aumento do teor de nitrogênio, fósforo e demais nutrientes. Com a diminuição da relação carbono e nitrogênio C/N da matéria orgânica os micro-organismos do solo conseguem um melhor índice de fixação no do nitrogênio, além do biofertilizante já conter outros nutrientes solubilizados (SGANZERLA, 1983).

A utilização do biofertilizante deve ser acompanhada previamente de uma análise laboratorial, devido ao fato de que cada tipo de biomassa utilizada contém diferentes composições, pois, a utilização incorreta ou sem as concentrações conhecidas pode acarretar em desvantagens como, resultar em desequilíbrios químicos, físicos e biológicos no solo, o tornando-o impróprio para uso em qualquer tipo de cultivo.

Como demonstrado, o processo de geração de biogás com resíduos vem evoluindo e se tonando um caminho para a redução da poluição do meio ambiente e geração de energia, provando que com a codigestão anaeróbica se pode obter uma melhora do processo de biodigestão e a eliminação de um passivo ambiental. Assim neste trabalho será realizado a análise da produção de biogás utilizando um passivo ambiental que é a linha verde e vermelha do abatedouro localizado em Catalão - GO, com um resíduo de dejeto bovino de uma Fazenda Leiteira que também é localizada em Catalão – GO, e é uma criadora de gado e produtora de leite, tendo em vista a reutilização de resíduos que são descartados sem nenhuma utilização ou fim, para a produção de biogás.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a influência dos aditivos no processo;
- Analisar os parâmetros físico-químicos dos afluentes e efluentes obtidos durante os processos de biodigestão;
- Comparar o aditivo da linha verde com a linha vermelha.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Coleta do Material

3.1.1. Dejeto Bovino

A amostra de dejeto bovino utilizada neste trabalho foi coletada na Fazenda Ribeirão Samambaia (Figura 30) encontrada nas coordenadas de (Latitude -18.0844771 S, Longitude -47.9165729 W) na Estrada Municipal Custodia, S/N, Km 6, Zona Rural – GO, que trabalha com a produção de leite de vaca utilizando o método de Compost Barn (Figura 31).

Figura 30 – Fazenda de leite localizada em Catalão - GO.

Fonte: Google Maps.

Figura 31 – Modelo de Compost Barn.

Fonte: Autoria própria.

A coleta do material foi realizada utilizando uma pá plástica e luvas, na área cimentada do local de confinamento, onde é realizada a alimentação das vacas e onde se consegue uma coleta do dejeto sem a mistura com materiais indesejados (Figura 32).

Figura 32 – Coleta do dejeto na área cimentada.

Fonte: Autoria própria.

3.1.2. Aditivos

A coleta dos resíduos referentes a linha verde e da linha vermelha que foram utilizadas como aditivos, foi realizada no Abatedouro de bovinos (Figura 33) localizado nas coordenadas (Latitude -18.14411 S, Longitude -48.056620 W) na GO-210 entre Catalão – GO e Goiandira – GO, onde acontece o abate diário de bovinos.

Figura 33 – Vista superior do abatedouro bovino (a) e vista frontal (b).

Fonte: Autoria própria.

A linha verde foi coletada no final da tubulação individual de descarte do abatedouro, e também após a passagem pelo filtro de sólidos do local, coletada com a

utilização de luvas para evitar a contaminação e em um recipiente limpo de borosilicato com tampa, como mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Coleta da Linha Verde no abatedouro.

Fonte: Autoria própria.

A linha vermelha foi coletada na sua tubulação individual (Figura 35) após a passagem no filtro de separação de sólidos e após a retirada do sangue principal que é utilizado para a fabricação de farinha de sangue de boi, sendo coletada em um vidro de borosilicato com tampa e com a utilização de luvas para evitar contaminações.

Figura 35 – Coleta da Linha Vermelha no abatedouro.

Fonte: Autoria própria.

A coleta do material foi realizada logo após a finalização dos abates bovinos, para se obter sempre um material fresco, sem contaminação e ou degradação.

3.2. Montagem dos Reatores

Para a montagem de cada reator, os matérias coletados foram misturados na proporção da Tabela 5 e batidos por um período de 3 minutos em um liquidificador industrial basculante para homogeneização completa, após, a mistura foi colocada em vidros de borosilicato com capacidade individual máxima de 500mL ao qual foi cheio até o volume efetivo de 250mL, produzindo assim um espaço entre a mistura e o topo dos frascos, sendo realizado o mesmo procedimento para a montagem dos reatores com e sem aditivo.

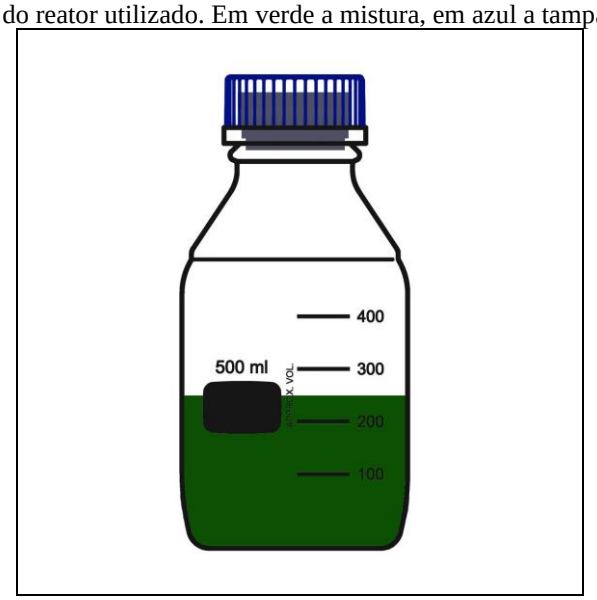
Tabela 5 – Quantidade de materiais adicionados nos reatores.

Reator	Dejeto (mL)	Aditivo L.V (mL)	Aditivo LVM (mL)	Água (mL)
1	137,5	37,5	0	75
2	137,5	0	37,5	75
3	137,5	0	0	112,5

Fonte: Autoria Própria

Os reatores montados foram vedados com septos de borracha (Figura 36), fita veda rosca e tampas específicas dos vidros para evitar vazamentos durante a biodigestão.

Figura 36 – Modelo do reator utilizado. Em verde a mistura, em azul a tampa e em cinza o septo.

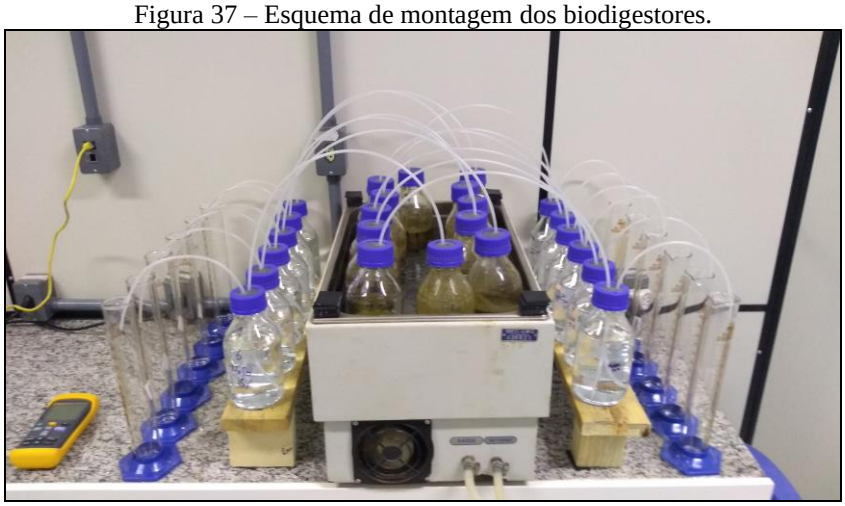


Fonte: Autoria própria.

3.2.1. Montagem do Sistema de Biodigestão

Foi montado em bancada, o sistema de biodigestores semi-submersos (Figura 37) em banho maria com água e com temperatura constante de 36º ± 1 ºC.

Figura 37 – Esquema de montagem dos biodigestores.

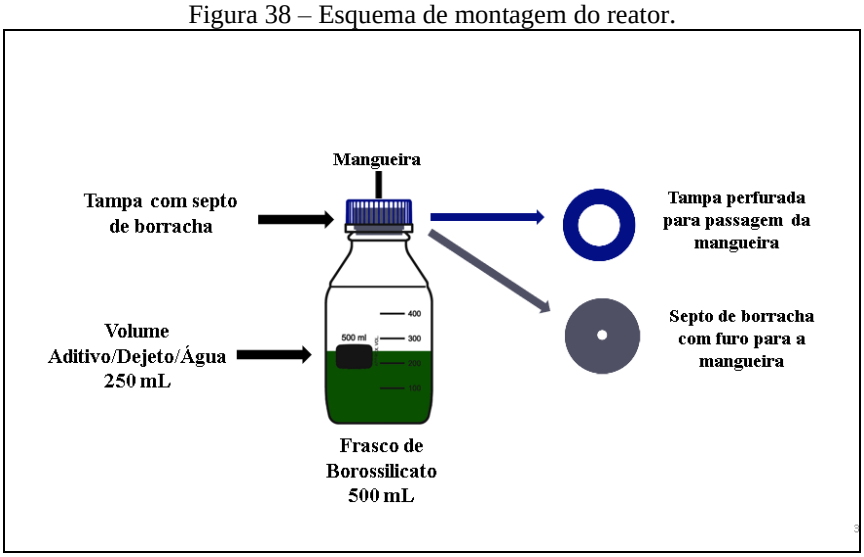


Fonte: Autoria própria.

Os reatores foram acondicionados no banho maria e agitados manualmente todos os dias para evitar a formação de bolhas retidas na mistura.

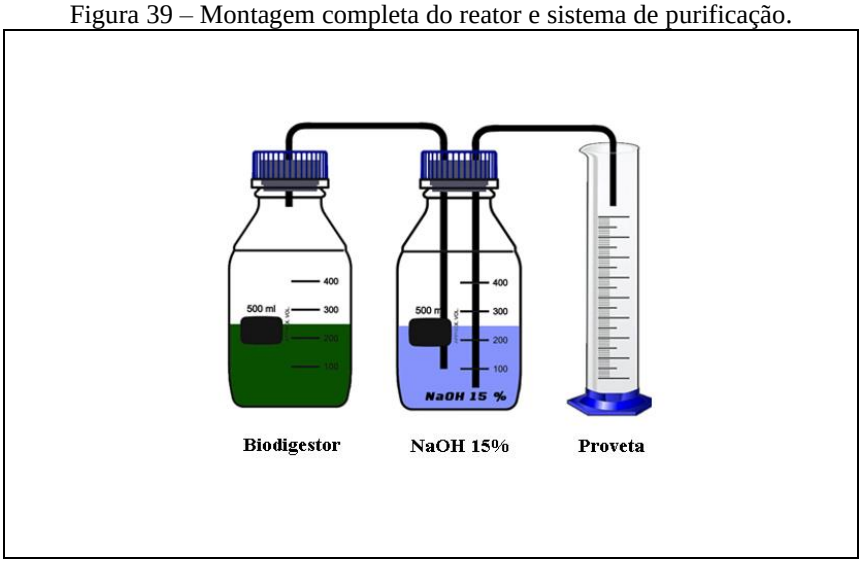
O sistema laboratorial de montagem dos biodigestores é composto pelo reator com tampa perfurada e septo de borracha (Figura 38), onde é conectado a uma mangueira que direciona o gás produzido no reator para um recipiente selado contendo Hidróxido de Sódio (NaOH) 15%, onde o biogás produzido será borbulhado e lavado, resultando na purificação do mesmo e sobrando em sua maioria o metano (CH_4). O CH_4 produzido causa uma pressão no frasco selado de NaOH, causando o deslocamento do líquido pela mangueira secundária diretamente para uma proveta (Figura 39), conseguindo assim a medição direta do metano deslocado no processo (AQUINO, 2007).

Figura 38 – Esquema de montagem do reator.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Montagem completa do reator e sistema de purificação.



Fonte: Autoria própria.

3.3. Analises Físico Químicas

As análises físico-químicas (Tabela 6) foram realizadas nas amostras de entrada (antes do início da biodigestão – afluente) e nas amostras de saída (após a digestão – efluente) do biodigestor, seguindo o protocolo descrito no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012.

Tabela 6 – Análises físico-químicas realizadas.

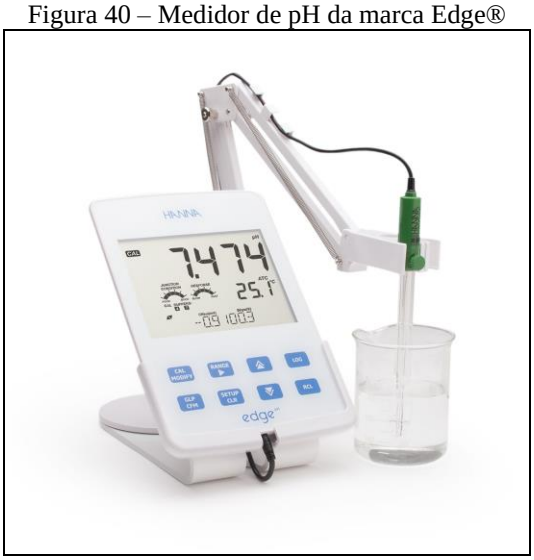
Parâmetros	Metodologia
pH	Potencial hidrogeniônico
Demanda Química de Oxigênio - DQO	Espectrofotômetro
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO	Oxitop
Alcalinidade total	Titulométrico/Potenciométrico
Ácidos voláteis	Titulométrico/Potenciométrico
Sólidos Totais voláteis	Gravimetria
Fósforo total	Espectrofotômetro
Nitrogênio Total Kjeldahl	Destilação Kjeldahl

Fonte: Autoria Própria.

3.3.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial Hidrogeniônico (pH) da mistura foi medido em triplicata no afluente antes do fechamento do reator e no efluente após o término da biodigestão em todos os reatores, sendo realizado com o auxílio de um medidor de pH da marca Hanna modelo Medidor Edge® para pH/ORP (Figura 40), sempre calibrado previamente utilizando-se os padrões 10, 7 e 4 à temperatura ambiente.

Figura 40 – Medidor de pH da marca Edge®



Fonte: Site da Synth.

3.3.2. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Foram realizadas utilizando a metodologia do Standart Methods 5220, que utiliza o método colorimétrico com um espectrofotômetro. Nesse modelo foi utilizado reagentes oxidantes junto com as amostras, em tubos transparentes com rosca para DQO, onde a amostra foi digerida no digestor HI 839800 COD REACTOR da Hanna Instruments (Figura 41) a 150 ºC por um período de duas horas, foi realizada a leitura após o resfriamento no espectrofotômetro CIRRUS-80 da marca FEMTO (Figura 42), para leitura da absorbância, no comprimento de onda de 620 nanômetros (nm).

Figura 41 – Digestor HI 839800 da marca Hanna.

Fonte: Site da Synth.

Figura 42 – Espectrofotômetro CIRRUS-80 da marca FEMTO

Fonte: Site da FEMTO.

3.3.2.1. Soluções utilizadas na análise de DQO

a) Solução de sulfato de prata em ácido sulfúrico concentrado

Foi separado um frasco de 1L de H_2SO_4 concentrado (96-97%, densidade: 1,84 kg L^{-1}). Transferiu-se 10,12g de Ag_2SO_4, triturado com bastão de vidro, para o frasco de H_2SO_4, no frasco âmbar original do ácido e foi fechado hermeticamente e sem nenhum tipo de movimentação brusca.

O frasco foi deixado em repouso por 48h, no escuro, para que ocorresse a dissolução completa. Após as 48h, a solução foi transferida cuidadosamente para um frasco âmbar de 2 L com rosca adaptada a um dispensador automático.

O frasco foi recoberto totalmente com papel alumínio para evitar contato com a luz.

b) Solução de $K_2Cr_2O_7$ e $HgSO_4$, acidificada com H_2SO_4 (Solução de digestão)

Secou-se 15g de $K_2Cr_2O_7$ a 105°C, em estufa, durante o período de 24 horas para retirar toda a umidade presente e após resfriado em dessecador. Em um Erlenmeyer de 1L já contendo cerca de 200mL de água desmineralizada e imerso em um banho de gelo, foi adicionado cuidadosamente e aos poucos, 167mL de ácido sulfúrico H_2SO_4 concentrado e 33,3g de $HgSO_4$, sempre agitando levemente para a dissolução total e reservando a solução posteriormente.

Foi feita uma solução em um balão volumétrico de 1L, onde continha 10,216g de $K_2Cr_2O_7$ onde foi agitado para dissolução do reagente na água desmineralizada.

A solução ácida resfriada de sulfato de mercúrio ($HgSO_4$) que foi reservada, foi adicionada com a solução de $K_2Cr_2O_7$ feita em um frasco âmbar de 2L com rosca adaptada para um dispensador automático e recoberto com papel alumínio para não ter contato com a luz.

3.3.2.2. Construção da Curva de Calibração

Sabendo-se que a DQO de 1,000 mg de hidrogenoftalato de potássio (KPH), padrão primário, é 1,176 mg de O_2, se pode obter um padrão para construção da curva de calibração.

Foi colocado 500mg de KPH em uma placa de Petri semiaberta na estufa, numa temperatura de 120°C por um período de 24 horas e posteriormente resfriado em um dessecador.

Os padrões para a curva de calibração foram feitos em balões volumétricos de 10mL sempre em triplicata, adicionando em cada balão o volume indicado na Tabela 7 e completando o seu volume com água desmineralizada até seu menisco. Para o branco, utilizou-se um balão preenchido somente com água desmineralizada.

Tabela 7 – Diluição para os padrões da curva de calibração da DQO.

Concentrações aproximadas (mg DQO L^{-1})	**Solução padrão (mL) para diluição em balão de 10mL**	**Repetições**
50	0,5	3
80	0,8	3
100	1,0	3
200	2,0	3
400	4,0	3
600	6,0	3
800	8,0	3

Fonte: Standart Methods 5220.

Após o preparo dos balões, foi procedido a determinação da DQO de cada ponto, em tubos de borossilicato com tampas rosqueáveis e selo interno de Teflon. Com o auxílio de uma pipeta automática, foi adicionado 2,50mL de amostra (sempre em triplicata) e o mesmo foi feito com o branco, adicionou-se 1,50mL da solução de dicromato de potássio (solução de digestão) e lentamente 3,50mL da solução de sulfato de prata em ácido sulfúrico concentrado fechando o tudo com a tampa e agitando por inversão lentamente a mistura.

Os tubos foram colocados no digestor previamente aquecido a 150°C por 2 horas, após a digestão das amostras os tubos foram levados para uma câmara escura para resfriamento até temperatura ambiente e realizada a leitura no espectrofotômetro em comprimento de 620nm.

3.3.3. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Na determinação da DBO foi utilizado a Metodologia 5510B do Standart Methods e o equipamento Oxitop®, que é um aparelho que consegue medir a pressão parcial do oxigênio do espaço entre a amostra que esta acondicionada em um vidro âmbar e o aparelho Oxitop que veda o frasco (headspace) (Figura 43), pressão causada devido o consumo de oxigênio pela atividade microbiana (AQUINO, 2007).

Figura 43 – Equipamento de Oxitop

Fonte: Site da Navelab.

A análise tem a duração de 120 horas e fica em constante agitação e uma temperatura de 20 ± 1 ºC, fechada no interior da incubadora de DBO ALFAKIT (Figura 44) e ao final é desligado a agitação e verificado o valor obtido.

Figura 44 – Equipamento de DBO da marca ALFAKIT

Fonte: Site da Alfakit.

3.3.3.1. Soluções utilizadas na DBO

a) Solução Tampão de Fosfato

Em 600mL de água desmineralizada, foi dissolvido 8,5g de fosfato monobásico de potássio (KH_2PO_4 P.A.), 21,75g de fosfato dibásico de potássio (K_2HPO_4 P.A.), 33,4g de fosfato dibásico de sódio heptahidratado ($Na_2HPO_4.7H_2O$ P.A.) e 1,7g de cloreto de amônio (NH_4Cl P.A.). A solução foi transferida para um balão volumétrico de 1L e completado seu volume com água desmineralizada até seu menisco, a solução foi estocada em frasco do tipo âmbar e em temperatura ambiente.

b) Solução de Sulfato de Magnésio

Foi dissolvido 22,5g de sulfato de magnésio heptahidratado ($MgSO_4.7H_2O$ P.A.) em 800mL de água desmineralizada, transferiu-se o para um balão volumétrico de 1L e foi completado seu volume com água desmineralizada. A solução foi estocada em frasco âmbar e em temperatura ambiente para seu uso.

c) Solução de Cloreto de Cálcio ($CaCl_2$)

Dissolveu-se 27,5g de cloreto de cálcio anidro ($CaCl_2$ P.A.) em 800mL de água desmineralizada, após isso, a mistura foi transferida para um balão volumétrico de 1L e completado o seu volume até o menisco. A solução foi estocada em frasco âmbar e temperatura ambiente.

d) Solução de Cloreto Férrico ($FeCl_3$)

Uma quantidade de 0,25g de cloreto férrico hexahidratado ($FeCl_3.6H_2O$ P.A.) foi misturada com 800mL de água desmineralizada, essa mistura foi transferida para um balão volumétrico de 1L e completado seu volume. A solução preparada foi acomodada em frasco âmbar e na temperatura ambiente.

e) Solução de Cloreto de Amônio (NH_4Cl)

Em 800mL de água desmineralizada, foi dissolvido 38,2g de cloreto de amônio (NH_4Cl P.A.) e neutralizado para o pH 7,0 com hidróxido de potássio (KOH), a mistura foi transferida para um balão volumétrico de 1L e completado o seu volume até o menisco. Após isso, a solução foi guardada em frasco âmbar e em temperatura ambiente.

f) Solução Nutriente

A solução nutriente só foi preparada no momento do uso, devido a sua instabilidade alta após seu preparo. Foi feita uma mistura em um béquer de 50mL contento, 6mL da solução de tampão fosfato, 2mL da solução de sulfato de magnésio, 2mL da solução de cloreto férrico, 2mL da solução de cloreto de cálcio e 2mL da solução de cloreto de amônio, sendo essa a composição da solução nutriente utilizada.

3.3.3.2. Procedimento analítico: Método respirométrico/manométrico – OXITOP

Após a coleta da amostra, de imediato foi feita a análise de DBO com o intuito de obter o mínimo de erro devido a degradação da amostra após 24 horas.

Um volume de 164 mL da amostra diluída 200 vezes, foi transferido para o frasco de DBO Oxitop e adicionado 0,6mL da solução nutriente, foi colocado uma barra magnética dentro do frasco para que se tenha uma mistura constante e uniforme durante todo o processo e antes do fechamento, foram adicionadas 4 pastilhas de hidróxido de sódio (NaOH P.A.) dentro cápsula de vedação de borracha do frasco âmbar.

O frasco de DBO Oxitop foi fechado e levado para o compartimento de agitação magnética localizado no interior da incubadora ALFAKIT em uma temperatura constante de 20 ± 1 ºC durante todo o período de 5 dias de análise sem interrupção, após o período foi realizada a leitura.

3.3.4. Fósforo Total (Strickland e Parsons, 1960; Valderrama,1981)

3.3.4.1. Soluções utilizadas na análise de Fosforo Total

a) Solução padrão de fosfato monobásico de potássio (KH_2PO_4)

Foi pesado 0,1757g de fosfato monobásico de potássio (KH_2PO_4) que foi dissolvido em um béquer de 100mL utilizando água desmineralizada e transferiu-se para um balão volumétrico de 1L completando seu volume até o menisco. A solução foi colocada em um frasco de vidro âmbar e armazenada.

b) Solução A - Tartarato de Antimônio e Potássio ($K_5C_4H_4O_6.0{,}5H_2O$)

Em um béquer de 250mL foi colocado 0,34g de tartarato de antimônio e potássio e diluído com 250mL de água desmineralizada aquecida a 35°C para melhor diluição, foi transferido para um balão volumétrico de 1L e completado o seu volume. Após o preparo da solução, ela foi acondicionada em frasco de polietileno.

c) Solução B - Molibdato de amônia ($(NH_4)6Mo_7O_{24}.4H_2O$)

Pesou-se 15g de paramolibidato P.A, que foi diluído em um béquer de 250mL utilizando 200mL de água desmineralizada, após a diluição a solução foi colocada em um balão volumétrico de 500mL, que foi completado com água desmineralizada. Essa solução foi guardada em um frasco escuro de polietileno e a temperatura ambiente.

d) Solução C - Ácido sulfúrico 140:900 (H_2SO_4)

Utilizando luvas, óculos de proteção e na capela, adicionou-se vagarosamente 140mL de H_2SO_4 em 900mL de água desmineralizada. Para a solução ficar estabilizada, ela foi mantida em frasco de vidro âmbar e em geladeira.

e) Solução D – Ácido Ascórbico

Esta solução deverá ser preparada somente no momento da análise. Utilizou-se 1,35g de ácido ascórbico P.A. em 20mL de água desmineralizada para dissolução em um béquer de 50mL. A mistura foi transferida para um balão volumétrico de 25mL, que foi completado até seu menisco com água desmineralizada.

f) Solução de Reagente Misto

Esta solução foi preparada só no momento da sua utilização, devido a sua instabilidade. Foi misturado 12,5mL da solução **A**, 25mL da solução **B**, 62,5mL da solução **C** e 25mL da solução **D**.

g) Solução do Reagente de Oxidação (R.O.)

Em um béquer de 1L contendo 500mL de água desmineralizada foi diluído 40g de hidróxido de sódio NaOH essa mistura foi transferida para um balão volumétrico de 1L e completado seu volume, após isso a solução foi armazenada em frasco de polietileno e reservada.

Foi pesado 50g de persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$) e 30 g de ácido bórico (H_3BO_3), que foram dissolvidos em 350mL da solução de NaOH feita acima, tudo em um béquer de 1L. A mistura feita, foi levada para um balão volumétrico de 1L, onde foi adicionado água desmineralizada até seu menisco. Após o preparo, a solução foi armazenada em frasco de polietileno.

3.3.4.2. Preparo da curva de calibração

Foram separados 28 balões volumétricos de 200mL para a realização das diluições da solução padrão de acordo com a Tabela 8, sempre preparados em triplicata. Após a adição utilizando pipetador automático de 0, 1-1 mL e de 1- 5mL do volume

correspondente à cada diluição, completou-se o volume do balão com água desmineralizada. Os balões foram reservados para proceder a análise.

Tabela 8 – Diluições das soluções para a curva de calibração de fósforo.

Balões (200mL)	Solução Padrão (mL)	Concentração (mg $P\text{-}PO_4^{-3}$ L^{-1})
1 (Branco)	0,0	0,0
2-4	0,1	20,0
5-7	0,2	40,0
8-10	0,3	60,0
11-13	0,4	80,0
14-16	0,5	100,0
17-19	1,0	200,0
20-22	2,0	400,0
23-25	3,0	600,0
26-28	4,0	800,0

Fonte: Strickland e Parsons, 1960; Valderrama,1981.

Utilizou-se tubos Falcon de 50mL (um para cada balão) e adicionou-se 30mL de cada solução contida nos balões, 4mL do reagente de oxidação (R.O.) e 3,4mL do reagente misto e após foi feito o fechamento de todos os tubos.

Foi deixado em repouso e em ambiente escuro por 30 minutos (formando um complexo de cor azul) e realizada a leitura das absorbâncias em comprimento de onda de 882nm utilizando cubetas de 1cm e um espectrofotômetro marca CIRRUS-80, sendo feito o mesmo procedimento com as amostras.

3.3.5. Sólidos totais, totais voláteis e totais fixos

Foi realizado antes da analises de sólidos, o procedimento de calcinação onde cápsulas de porcelana de 30mL sem a amostra foram previamente calcinadas em uma mufla da marca Fornos INTI modelo FL-1300 (Figura 45) a uma temperatura de 550°C ± 10 °C por um período de 2 horas, após a calcinação elas foram levadas para o dessecador para o resfriamento a vácuo.

Figura 45 - Mufla FL-1300 da marca Fornos INTI.

Fonte: Autoria pória.

O peso de cada cápsula vazia e fria foi anotado P_0 e posteriormente foram adicionados 10mL da amostra em cada cápsula, foi repetido o procedimento de pesagem e aferido o valor da amostra + a cápsula (sempre utilizando luvas).

Para o cálculo dos Sólidos Totais – ST, o conjunto foi levado à estufa SL-102 da marca Solab (Figura 46) em uma temperatura de 103ºC ± 2ºC por um período de 24 horas até atingir um peso constante, foi retirada e resfriada em dessecador em vácuo e após isso, foi feita a sua pesagem P_1 e calculado o valor de acordo com a Equação 3.

Figura 46 – Estufa SL-102 da marca Solab.

Fonte: Site da Solab.

$$\boldsymbol{ST\ (mg/L) = \frac{P_1 - P_0}{Vol.amostra\ (L)} . 1000} \qquad \text{Equação 3}$$

Para o cálculo dos Sólidos Totais Fixos – STF, foi levada a capsula + amostra obtida do processo de sólidos totais para a mufla com uma temperatura de 550 °C ± 10 °C por um período de 2 horas, retirado da mufla e levado para resfriamento no dessecador, após o peso do conjunto foi aferido P_2 e feito o cálculo de acordo com a Equação 4.

$$\boldsymbol{STF\ (mg/L) = \frac{P_2 - P_0}{Vol.amostra\ (L)} . 1000} \qquad \text{Equação 4}$$

Para a obtenção dos Sólidos Totais Voláteis – STV, foi utilizada a Equação 5 com os resultados obtidos nos cálculos anteriores.

$$\boldsymbol{STV\ (mg/L) = ST - STF} \qquad \text{Equação 5}$$

3.3.6. Nitrogênio Total Kjeldahl - NTK

3.3.6.1. Soluções utilizadas na análise de NTK

a) Reagente de Digestão

Dissolveu-se 134g de Sulfato de Potássio (K_2SO_4), 7,3g de Sulfato de Cobre ($CuSO_4$) e, cuidadosamente, 134mL de ácido Sulfúrico (H_2SO_4) concentrado em 600mL de água desmineralizada. A solução foi transferida para um balão volumétrico de 1L e completado seu volume.

b) Solução de Hidróxido de Sódio/Tiossulfato de Sódio

Em 800mL de água desmineralizada, foram diluídos 500g de Hidróxido de Sódio (NaOH) e 25g de Tiossulfato de Sódio ($Na_2S_2O_3.H_2O$), a mistura ficou em resfriamento ambiente até estabilizar e foi transferida para um balão volumétrico de 1L, sendo completado até seu menisco.

c) Solução Indicador Misto

Em 150mL de Álcool Etílico, dissolveu-se 200mg de Vermelho de Metila e 100mg de Azul de Metileno. A mistura foi guardada em um frasco âmbar para evitar a degradação antes do uso.

d) Solução adsorvente de Ácido Bórico

Em um balão volumétrico de 1L foram adicionados, 800mL de água desmineralizada e 20g de Ácido Bórico (H_3BO_3) juntamente com 10mL do indicador misto. O volume do balão foi completado e agitado levemente para a completa mistura.

e) Solução estoque de Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

Com o auxílio de uma pipeta automática, pipetou-se o volume de 27mL de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, em um balão volumétrico de 1L contendo 500mL de água desmineralizada, após a adição do ácido o balão foi completado até seu menisco.

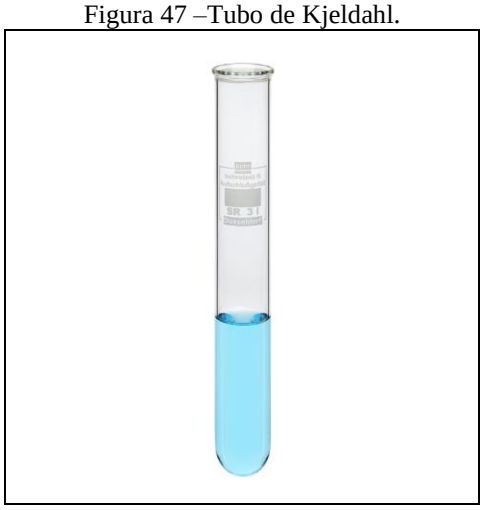
f) Solução Padrão de Ácido Sulfúrico 0,02 M

Foi transferido 20mL da solução estoque de Ácido Sulfúrico feita anteriormente para um balão de 1L que foi completado com água desmineralizada. A solução foi padronizada com uma solução de 20mL de Carbonato de sódio 0,05 e titulada até o pH 4,5.

3.3.6.2. Análise da amostra

Um volume de 10mL de amostra foi colocado nos tubos de Kjeldahl (Figura 47) e adicionado 10mL do reagente de digestão cuidadosamente devido ao aquecimento. Após o resfriamento até temperatura ambiente da mistura, adicionou-se 10mL da solução de Hidróxido de Sódio/Tiossulfato de Sódio.

Figura 47 –Tubo de Kjeldahl.



Fonte: Site da Instrulab.

Os tubos foram levados ao bloco de digestão Kjeldahl modelo DK6 da marca VELP que é acoplado a um sistema de neutralização de gases (Figura 48). A amostra ficou na programação de rampa de aquecimento durante 4 horas de acordo com a Tabela 9 e foi retirada ao final para resfriamento até a temperatura ambiente e a adição de 10mL de água desmineralizada no tubo.

Figura 48 – Bloco de digestão Kjeldahl modelo DK6 da marca VELP

Fonte: Site da Instrulab.

Tabela 9 – Rampa de aquecimento do bloco digestor.

Temperatura do digestor °C	Tempo (min)
148	120
160	30
250	30
420	20
0	40

Fonte: Autoria própria.

A amostra após a digestão foi levada nos tubos para o destilador de nitrogênio UDK 129 da marca VELP (Figura 49), onde foi acoplado no sistema. O sistema foi programado para uma destilação de 6 minutos utilizando 20mL de solução de NaOH 30%, e em sua mangueira de saída foi colocado um Erlenmeyer de 250mL contendo 25mL de solução adsorvente de ácido bórico onde será depositado o nitrogênio destilado.

Figura 49 – Destilador de nitrogênio UDK 129 da marca VELP.

Fonte: Site da Instrulab.

Após a destilação, o erlenmeyer foi titulado em titulador automático com a solução de ácido sulfúrico 0,02 M até seu ponto de viragem de cor rosa.

3.3.7. Alcalinidade e Ácidos orgânicos

3.3.7.1. Soluções utilizadas na análise de Alcalinidade e Ácidos orgânicos

a) Solução de Fenolftaleína

Em um béquer de 100mL, foi dissolvido 0,5g de fenolftaleína P.A. em 30mL de etanol. Essa mistura foi transferida para um balão volumétrico de 50mL e completado com água desmineralizada. A solução foi guardada em ambiente sem luz e sem umidade.

b) Solução de Azul de bromotimol

Dissolveu-se 0,05g de bromotimol em 10mL de etanol utilizando um béquer e 100mL, após a mistura foi transferida para um balão de 50mL, que foi completado até seu menisco com água desmineralizada. A solução foi guardada em local seco e escuro para a não degradação do indicador.

c) Solução de NaOH 0,005 M

Em um vidro de relógio foi pesado 0,2g de NaOH que foi transferido utilizando água desmineralizada, para um béquer de 100mL que foi agitado com um bastão de vidro até a completa dissolução. A solução foi transferida para um balão volumétrico de 1L, que foi completado até seu menisco, após o preparo a solução foi armazenada em frasco de plástico totalmente escuro.

A padronização do NaOH foi feita em um titulador automático, com uma solução de 0,015g de KPH sem umidade em 25mL de água desmineralizada com 2 gotas da solução de fenolftaleína.

d) Solução de H_2SO_4 0,05 M

Em um balão volumétrico de 1L com 100mL de água, foi adicionado diretamente 0,3mL de ácido sulfúrico 97,5% e completado seu volume com água desmineralizada. A solução foi armazenada em frasco de vidro âmbar com rosca para bureta automática.

A padronização do ácido sulfúrico foi feita utilizando 0,286g de bórax que foi diluída em 50mL de água desmineralizada, adicionando-se 2 gotas do indicador preparado, azul de bromotimol.

3.3.7.2. Determinação das Frações de Alcalinidade

Utilizando o medidor de pH calibrado com padrões 10,0, 7,0 e 4,0 em temperatura ambiente, foi feita a titulação de 50mL da amostra em um béquer de 100mL registrando o valor do pH inicial e caso necessário, se estiver acima de pH 8,0 adicionar sob agitação ácido sulfúrico para chegar até pH 8,0.

A amostra foi titulada com bureta automática e com a solução de H_2SO_4 utilizando, agitador magnético em velocidade média contínua e eletrodo de pH em seu interior, até chegar em pH 5,75 (V_1) que será a alcalinidade parcial. Foi titulada novamente a amostra, até que se chegue em pH 4,3 (V_2) que será a alcalinidade intermediária. Para a alcalinidade total, foi considerado V_3 sendo o somatório de V_1 e V_2 ($V_3 = V_1 + V_2$) de acordo com a metodologia de Ripley et al., 1986 e DiLallo e Albertson, 1961.

3.3.7.3. Determinação de ácidos voláteis totais

A amostra com pH 4,3 que foi utilizada para a determinação de alcalinidade, também foi usada para a determinação dos ácidos voláteis totais. O pH da amostra foi reduzido para 3,3 com ácido sulfúrico, após essa redução a amostra foi levada a chapa de aquecimento por 3 minutos (após fervura) para completa remoção do dióxido de carbono.

O líquido foi resfriado em banho de gelo, até a temperatura ambiente e elevado seu pH com NaOH até o pH de 4,0. Posteriormente a amostra foi titulada com a solução de NaOH padronizada até pH 7,0, permitindo a neutralização de ácidos orgânicos e saber o valor de ácidos voláteis de acordo com a metodologia de Ripley et al., 1986 e DiLallo e Albertson, 1961.

3.4. Analise Estatística dos Resultados

A análise foi feita para a comparação dos resultados obtidos estatisticamente, sendo realizados testes de análise de variância (ANOVA) para a comparação das médias amostrais das análises físico-químicas do trabalho, utilizando o software estatístico R para os cálculos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. pH, Alcalinidade e Acidez

Segundo Weiland (2001) assim como acontece na temperatura, os microrganismos envolvidos na biodigestão anaeróbica também necessitam de um meio com pH ótimo para uma boa atividade, o que está relacionado com a alcalinidade e ácidos do reator, nas fases iniciais do processo o pH ideal do meio para as bactérias hidrolíticas terem um bom desempenho e desenvolverem suas atividades é de 5,2 a 6,3. Entretanto, essas bactérias são capazes de trabalhar com o pH mais elevado, mas terão uma atividade mais reduzida atrapalhando o resto do processo (LEBUHN et al.,2008)

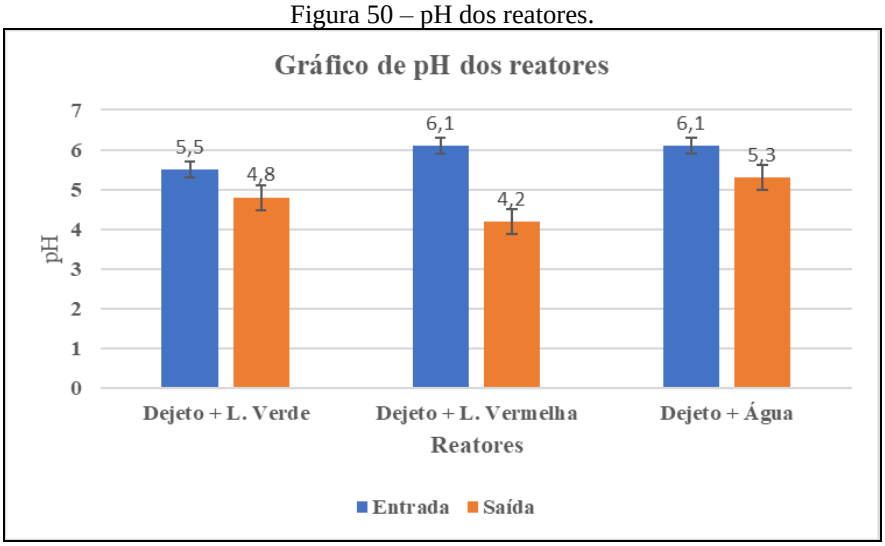
O pH, alcalinidade e acidez foram verificados antes da montagem do reator e após o final do processo, onde o reator não produz mais biogás, não realizando nenhum controle ou ajuste de pH antes do processo. Os valores obtidos são mostrados nas tabelas e nos gráficos abaixo:

Tabela 10 – pH dos reatores e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
pH (entrada)	5,5 (C.V. 0,45)	6,1 (C.V. 2,18)	6,1 (C.V. 0,50)
pH (saída)	4,8 (C.V. 0,84)	4,2 (C.V. 2,96)	5,3 (C.V. 0,68)

Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – pH dos reatores.



Fonte: Autoria própria.

Em alguns casos, o não controle do pH na biodigestão pode afetar diretamente o desenvolvimento e o desenvolvimento dos microrganismos que são

responsáveis pela biodigestão ou indiretamente influenciando na presença de substâncias inibidoras do processo, que são substâncias indesejáveis (ASSUNÇÃO, 2020).

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de pH:

Quadro da análise de variância

	GL	**SQ**	**QM**	**Fc**	**Pr>Fc**
Tratamento	2	0.068389	0.034194	134.56	1.0372e-05
Resíduo	6	0.001525	0.000254		
Total	8	0.069913			

CV: 1,97%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.1992899
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.9177643
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	L. Verde	0.8718223
2	a	Dejeto diluído	0.8679095
3	b	L.Vermelha	0.6849798

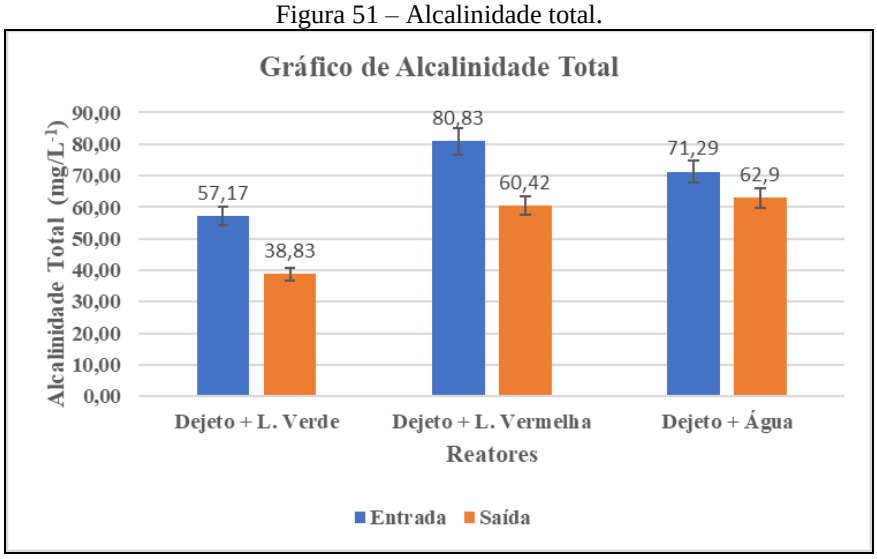
O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (1) e o dejeto diluído (2), são estatisticamente iguais na redução do pH e que o dejeto + linha vermelha (3) teve uma redução de pH estatisticamente diferente dos dois. O que pode ser observado pela igualdade das letras “a” e a diferenciação da letra “b” no grupo após a análise dos dados. A redução do pH da linha verde nos testes estatísticos foi de 12,8%, no dejeto diluído foi de 13,2% e na linha vermelha foi de 31,5%

Tabela 11 – Alcalinidade total dos reatores e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
Alcalinidade (entrada) (mg/L)	57,17 (C.V. 4,64)	80,83 (C.V. 1,24)	71,29 (C.V. 1,59)
Alcalinidade (saída) (mg/L)	38,83 (C.V. 6,12)	60,42 (C.V. 3,09)	62,90 (C.V. 0,96)

Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Alcalinidade total.



Fonte: Autoria própria.

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de alcalinidade:

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	2	0.064326	0.032163	229.21	2.1563e-06
Resíduo	6	0.000842	0.000140		
Total	8	0.065168			

CV: 1,54%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.6261972
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.9939673
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott			
	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	Dejeto diluído	0.8824255
2	b	L.Vermelha	0.7473491
3	c	L.Verde	0.6789504

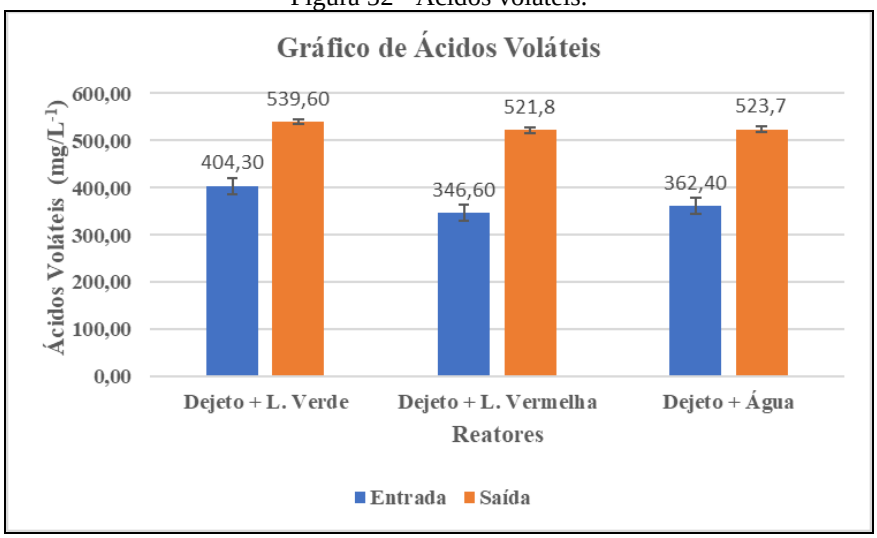
O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (3), o dejeto + linha vermelha (2) e o dejeto diluído (1), são estatisticamente diferentes na redução da alcalinidade. O que pode ser observado pela diferenciação de letras no grupo após a análise dos dados. As analises estatísticas mostraram que a redução da alcalinidade no dejeto diluído foi de 11,7%, na linha vermelha foi de 25,2% e na linha verde de 32,1%.

Tabela 12 – Ácidos voláteis totais dos reatores e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D + L. Verde	D + L. Vermelha	Dejeto + Água
Ácidos voláteis (entrada) (mg/L)	404,3 (C.V. 1,26)	346,6 (C.V. 0,66)	362,4 (C.V. 1,35)
Ácidos voláteis (saída) (mg/L)	539,6 (C.V. 1,31)	521,8 (C.V. 0,49)	523,7 (C.V. 0,82)

Fonte: Autoria própria.

Figura 52 - Ácidos voláteis.



Fonte: Autoria própria.

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de ácidos voláteis:

Quadro da análise de variância

	GL	**SQ**	**QM**	**Fc**	**Pr>Fc**
Tratamento	2	0.044956	0.0224779	181.45	4.3024e-06
Resíduo	6	0.000743	0.0001239		
Total	8	0.045699			

CV: 0,78%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.9492164
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.9381064
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	L.Vermelha	1.505500
2	b	Dejeto diluído	1.444954
3	c	L.Verde	1.334769

O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (3), o dejeto + linha vermelha (1) e o dejeto diluído (2), são estatisticamente diferentes no aumento de ácidos voláteis. O que pode ser observado pela diferenciação de letras no grupo após a análise dos dados. As analises estatísticas mostram que o aumento dos ácidos voláteis na linha vermelha foi de 50,5%, já no dejeto diluído foi de 44,4% e na linha verde foi de 33,4%.

Com os resultados foi possível observar uma redução no pH ao final o processo de biodigestão de todos os reatores, o que mostra que a etapa final de metanogênese onde se gera o CH_4 pode ter sido afetada, pois seu pH ótimo de trabalho varia entre 6,7 e 7,5, isso pode ter ocorrido devido a produção excessiva de ácidos na etapa da acidogênese, onde provavelmente foi gerado um excesso de ácidos orgânicos, tornando o meio menos alcalino e mais ácido, dificultando assim a etapa de produção de metano, alterando o pH do meio.

A maior redução de pH foi observada na linha vermelha, onde pode ser explicada por sua composição, onde o sangue tem uma concentração maior de lipídeos e proteínas, moléculas complexas que são quebradas e convertidas com mais dificuldade na etapa de hidrólise, gerando sempre uma quantidade baixa de substrato, mas contínua para a acidogênese durante todo o processo, gerando uma quantidade maior de compostos ácidos não processados no final do processo.

4.2. Nutrientes

A disponibilidade de nutrientes como o nitrogênio (N) e o fósforo (P) para um sistema de biodigestão é de grande importância pois esses elementos vão compor a estrutura das células dos microrganismos anaeróbios que são vitais para um bom processo e a obtenção de energia para síntese, a quantidade mínima para que o processo ocorra com êxito é de 12% de N e 2% de P em relação a matéria seca (KUNZ et. al., 2019).

A verificação da quantidade de nutrientes disponíveis antes e após a biodigestão ajudam a entender como foi o processo e também sua composição final para uma possível utilização do resíduo para outro fim. Os resultados das análises de nitrogênio total Kjeldahl e fósforo total na entrada e na saída do reator, estão demonstradas nas tabelas e gráficos abaixo:

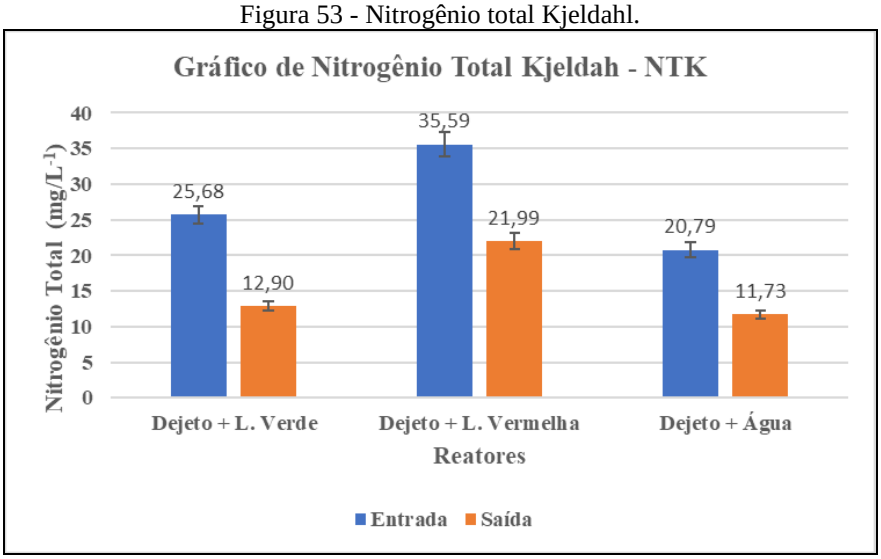
Tabela 13 – Nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
NTK $_{(entrada)}$ (mg/L)	25,68 (C.V. 2,23)	35,59 (C.V. 8,34)	20,79 (C.V. 4,75)
NTK $_{(saída)}$ (mg/L)	12,90 (C.V. 7,33)	21,99 (C.V. 4,08)	11,73 (C.V. 6,63)

Fonte: Autoria própria.

–.

Figura 53 - Nitrogênio total Kjeldahl.



Fonte: Autoria própria.

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de nitrogênio total Kjeldahl:

Quadro da análise de variância

	GL	**SQ**	**QM**	**Fc**	**Pr>Fc**
Tratamento	2	0.0210029	0.0105014	8.0647	0.019932
Resíduo	6	0.0078129	0.0013021		
Total	8	0.0288158			

CV: 6,42%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.7912997
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.5065886
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	L.Vermelha	0.6205067
2	a	Dejeto diluído	0.5640149
3	a	L.Verde	0.5022167

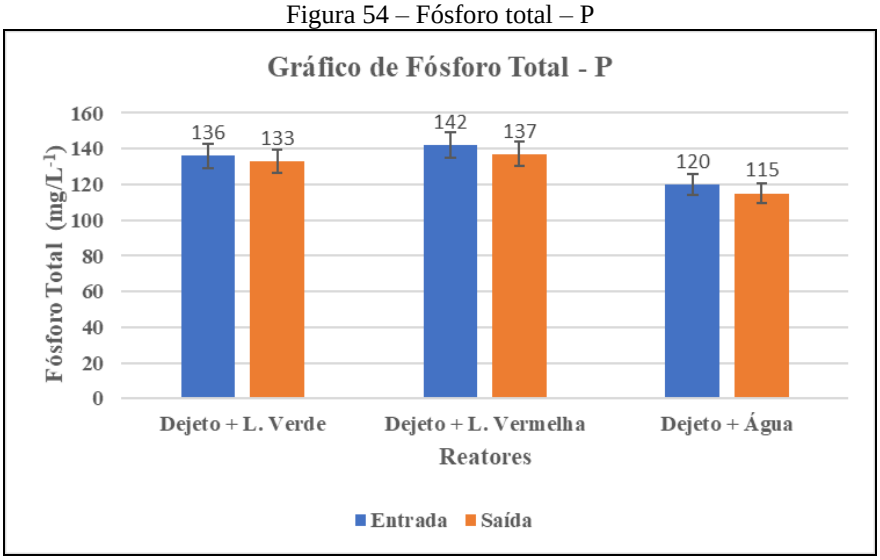
O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (3), o dejeto + linha vermelha (1) e o dejeto diluído (2), são estatisticamente iguais em termos de redução de nitrogênio total Kjeldahl. O que pode ser observado pela igualdade das letras no grupo após a análise dos dados. As analises estatísticas mostraram que a redução do nitrogênio total Kjeldahl foi de 37,9% para a linha vermelha, 43,5% para o dejeto diluído e de 49,7% para a linha verde.

Tabela 14 – Fósforo total e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
P (entrada) (mg/L)	136 (C.V. 1,68)	142 (C.V. 0,81)	120 (C.V. 2,53)
P (saída) (mg/L)	133 (C.V. 1,14)	137 (C.V. 0,84)	115 (C.V. 3,59)

Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Fósforo total – P



Fonte: Autoria própria

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de fósforo total:

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	2	0.00060248	0.00030124	1.6844	0.26267
Resíduo	6	0.00107308	0.00017885		
Total	8	0.00167557			

CV: 1,38%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.7830398
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.9693248
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

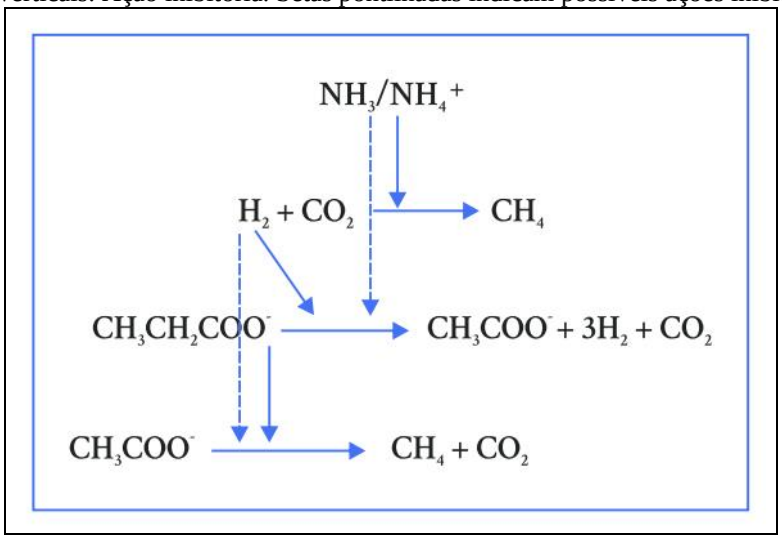
Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	Dejeto diluído	0.9584518
2	a	L.Verde	0.9781167
3	a	L.Vermelha	0.9649358

O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (2), o dejeto + linha vermelha (3) e o dejeto diluído (1), são estatisticamente iguais em termos de redução de fósforo total. O que pode ser observado pela igualdade das letras no grupo após a análise dos dados. As analises estatísticas mostram que a redução de fósforo foi de 0,4% para o dejeto diluído, 0,2% para a linha verde e 0,3%.

Com os resultados, foi possível observar que o fósforo não obteve uma redução expressiva nos reatores, o que era esperado, devido ao fósforo não ser consumido no processo de biodigestão anaeróbica, já no nitrogênio total Kjeldahl foi possível observar uma redução em todos os reatores, que pode ser explicado devido a fermentação dos materiais contendo ureia e proteína liberarem amônia livre durante o processo, podendo essa amônia reagir com as arqueas metanogênicas e reduzir a produção de metano, como demonstrado na Figura 55 (KUNZ et. al., 2019).

Figura 55 – Esquema mostrando a ação inibitória da amônia livre. Setas horizontais: reações inibidas; Setas verticais: Ação inibitória. Setas pontilhadas indicam possíveis ações inibitórias.



Fonte: WIEGANT et al., 1986.

O nitrogênio analisado foi o nitrogênio total Kjeldahl que além de considerar o nitrogênio orgânico, também considera o amoniacal, tendo assim uma análise mais completa para o entendimento das reações.

4.3. Matéria Orgânica e Sólidos Totais

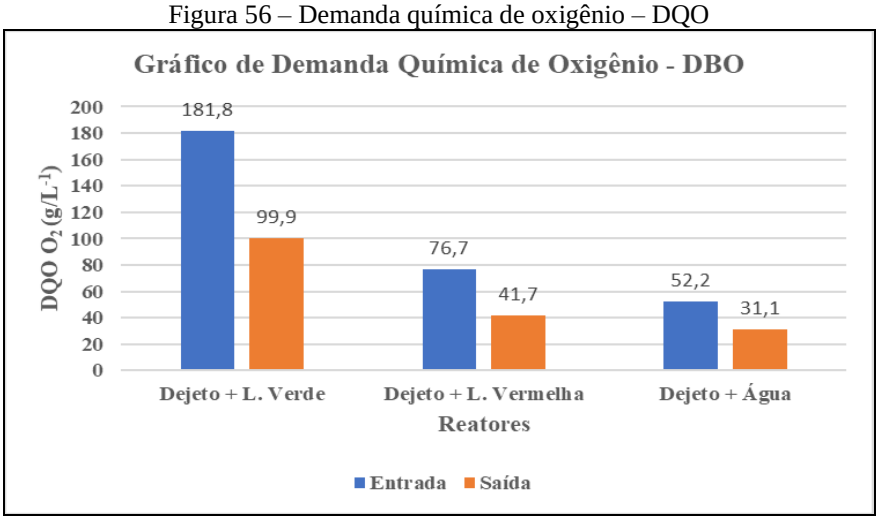
A bidigestão anaeróbica é utilizada com o intuito de decompor a matéria orgânica desejada e ainda conseguir subprodutos rentáveis, esse processo foi utilizado para avaliar a eficácia da digestão ocorrida no reator e assim conseguir analisar sua performance. As análises de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos totais voláteis (STV), foram realizadas antes do fechamento dos reatores e após o fim da produção de metano no sistema laboratorial, para que se consiga observar a capacidade de degradação de matéria pelos biodigestores, obtendo-se assim os valores demonstrados nas tabelas e figuras abaixo:

Tabela 15 – Demanda química de oxigênio (DQO) e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
DQO (entrada) (g/L)	181,8 (C.V. 1,11)	76,7 (C.V. 4,71)	52,2 (C.V. 3,32)
DQO (saída) (g/L)	99,9 (C.V. 0,98)	41,7 (C.V. 4,80)	31,1 (C.V. 5,05)

Fonte: Autoria própria.

Figura 56 – Demanda química de oxigênio – DQO



Fonte: Autoria própria

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de DQO:

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	2	0.0048190	0.00240952	57.899	0.00011955
Resíduo	6	0.0002497	0.00004162		
Total	8	0.0050687			

CV: 1,15%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.6998947
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.8275098
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	Dejeto diluído	0.5955594
2	b	L.Vermelha	0.5495791
3	b	L.Verde	0.5438659

O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (3) e o dejeto + linha vermelha (2), são estatisticamente iguais na redução da demanda química de oxigênio e que o dejeto diluído (1) teve uma redução estatisticamente diferente dos dois.

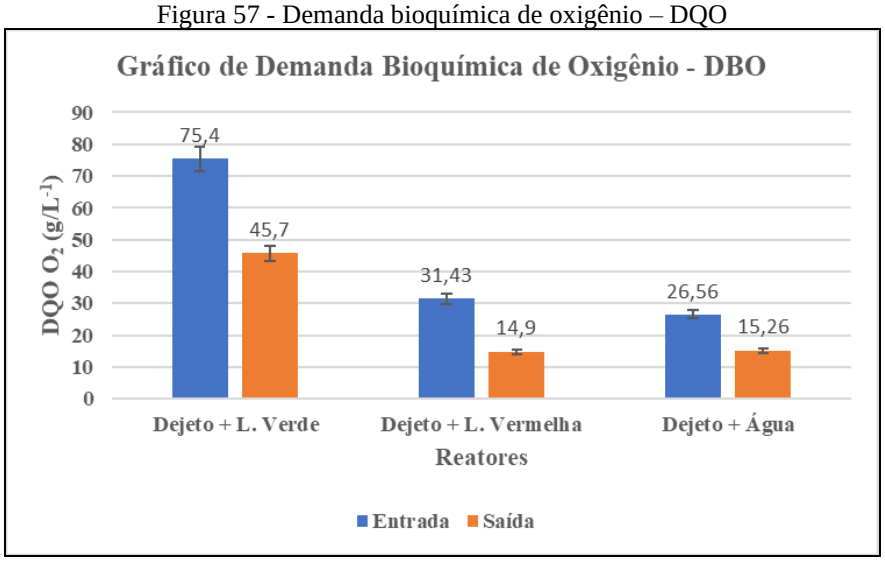
O que pode ser observado pela igualdade das letras “b” e a diferenciação da letra “a” no grupo após a análise dos dados. A redução do DQO nos testes estatísticos do dejeto diluído foi de 40,4%, na linha vermelha foi de 45% e na linha verde foi de 45,6%.

Tabela 16 – Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
DBO (entrada) (g/L)	75,4 (C.V. 3,39)	31,43 (C.V. 4,82)	26,56 (C.V. 4,19)
DBO (saída) (g/L)	45,7 (C.V. 1,98)	14,9 (C.V. 8,82)	15,26 (C.V. 3,29)

Fonte: Autoria própria.

Figura 57 - Demanda bioquímica de oxigênio – DQO



Fonte: Autoria própria

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de DQO:

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	2	0.027325	0.0136623	14.433	0.0050965
Resíduo	6	0.005680	0.0009466		
Total	8	0.033004			

CV: 5,56%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.3376494
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.5649204
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	L.Verde	0.6065564
2	a	Dejeto diluído	0.5749700
3	b	L.Vermelha	0.4771235

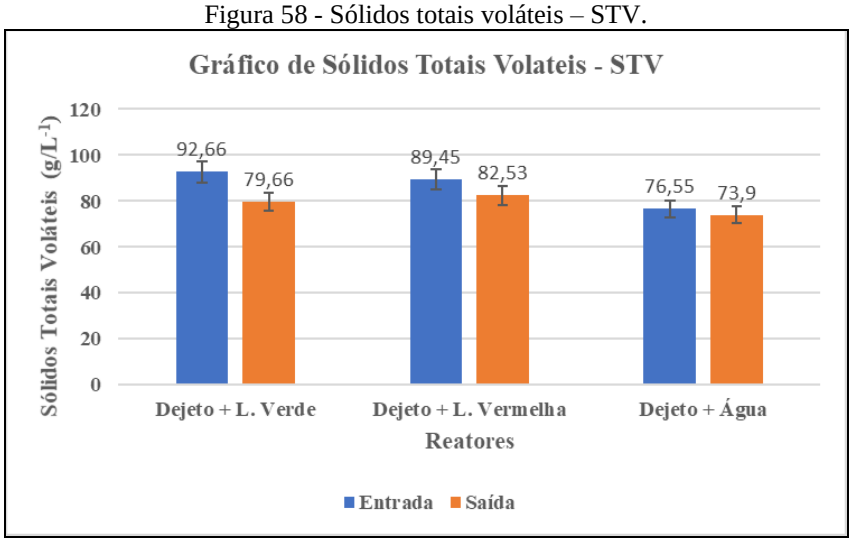
O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (1) e o dejeto diluído (2), são estatisticamente iguais na redução da demanda bioquímica de oxigênio e que o dejeto + linha vermelha teve uma redução estatisticamente diferente dos dois. O que pode ser observado pela igualdade das letras "a" e a diferenciação da letra "b" no grupo após a análise dos dados. A redução nos testes estatísticos da DBO na linha verde foi de 39,3%, no dejeto diluído foi de 42,5% e na linha vermelha foi de 52,2%.

Tabela 17 – Sólidos totais voláteis dos reatores (STV) e coeficiente de variação (C.V.).

Reator	D. + L. Verde	D. + L. Vermelha	Dejeto + Água
ST $_{(entrada)}$ (mg/L)	92,66 (C.V. 3,23)	89,45 (C.V. 3,04)	76,55 (C.V. 2,84)
ST $_{(saída)}$ (mg/L)	79,76 (C.V. 3,42)	82,53 (C.V. 2,61)	73,90 (C.V. 2,99)

Fonte: Autoria própria.

Figura 58 - Sólidos totais voláteis – STV.



Fonte: Autoria própria.

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para os valores de sólidos totais:

Quadro da análise de variância

	GL	**SQ**	**QM**	**Fc**	**Pr>Fc**
Tratamento	2	0.0165582	0.0082791	37.36	0.00041068
Resíduo	6	0.0013296	0.0002216		
Total	8	0.0178878			

CV: 1,62%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.6963517
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.8353255
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	Dejeto diluído	0.9652934
2	b	L.Vermelha	0.9227733
3	c	L.Verde	0.8608281

O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (3), o dejeto + linha vermelha (2) e o dejeto diluído (1), são estatisticamente diferentes na redução de sólidos totais. O que pode ser observado pela diferenciação de letras no grupo após a análise dos dados. As analises estatísticas mostraram que o dejeto diluído teve uma redução de sólidos totais de 0,3%, a linha vermelha teve uma redução de 0,7% e na linha verde a redução foi de 13,9%.

O desempenho dos reatores foi medido em relação a porcentagem de degradação de matéria orgânica e sólidos totais para que após o processo possa ser relacionado com a produção de metano do reator.

Os reatores com a linha verde e a linha vermelha conseguiram uma degradação de cerca de 45% de DQO enquanto o dejeto diluído obteve uma redução de cerca de 40%, mostrando que os reatores com os aditivos tiveram uma melhor degradação e provavelmente uma melhor produção de biogás se comparado com o reator com o dejeto diluído com água, devido a uma alta concentração de matéria orgânica.

Além da matéria orgânica que é um substrato para a produção do biogás, os reatores também possuem materiais inorgânicos que são chamados de sólidos totais voláteis (STV), esses materiais sólidos não contribuem diretamente para a produção de biogás, mas podem auxiliar o digestor na diminuição do tempo de início de produção e também em uma porcentagem baixa de melhoramento da produção de biogás (KUNZ et. al, 2019).

Os resultados mostraram que a diminuição dos sólidos totais voláteis foi mais expressiva no reator com a linha verde, onde se teve uma redução de 13,9% que ocasiona uma melhora e uma diminuição do período de início e produção do biogás enquanto na linha vermelha obteve-se a redução de 7,7%, já no reator com o dejeto diluído com água foi obtido apenas uma redução de 3,4% no teor de sólidos totais voláteis. A diminuição pode dar indícios de eficácia dos processos e também dos níveis de nutrientes contidos naquela amostra, podendo se ter uma utilização posterior desses resíduos em um local adequado.

4.4. Produção de Metano (CH4)

Os reatores de biodigestão montados em laboratório, foram acompanhados desde o primeiro dia de montagem até o fim da vida do reator, onde cessa a produção de metano e não ocorre mais o deslocamento de volume para a leitura, a produção máxima verificada está indicada na tabela e nos gráficos abaixo:

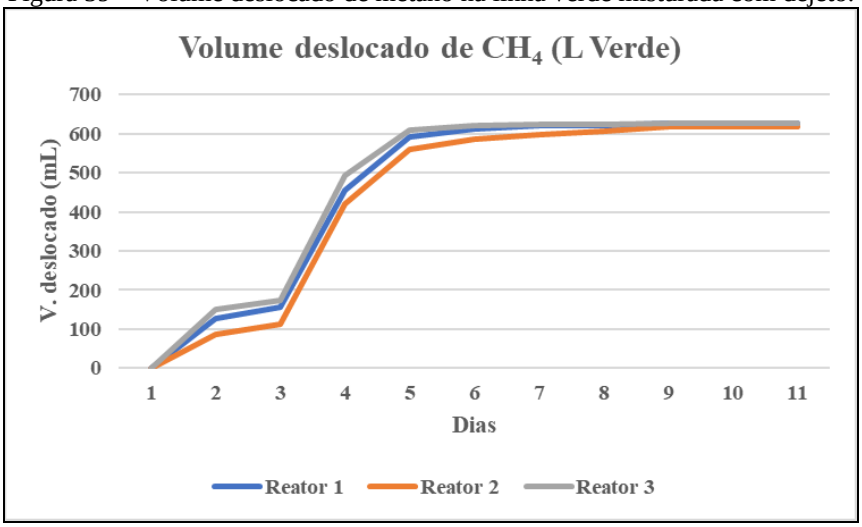
Tabela 18 – Volume de metano (CH_4) gerado pelos reatores em escala laboratorial.

Reator	**Produção de CH_4 (mL)**
Linha verde + Dejeto	623
Linha vermelha + Dejeto	246
Dejeto + Água	201

Fonte: Autoria própria.

A produção máxima de metano na mistura de dejeto e linha verde foi de 623mL e teve a duração de 11 dias, o período de início da produção do biogás foi imediato após o fechamento do reator, como demonstrado no gráfico da Figura 59.

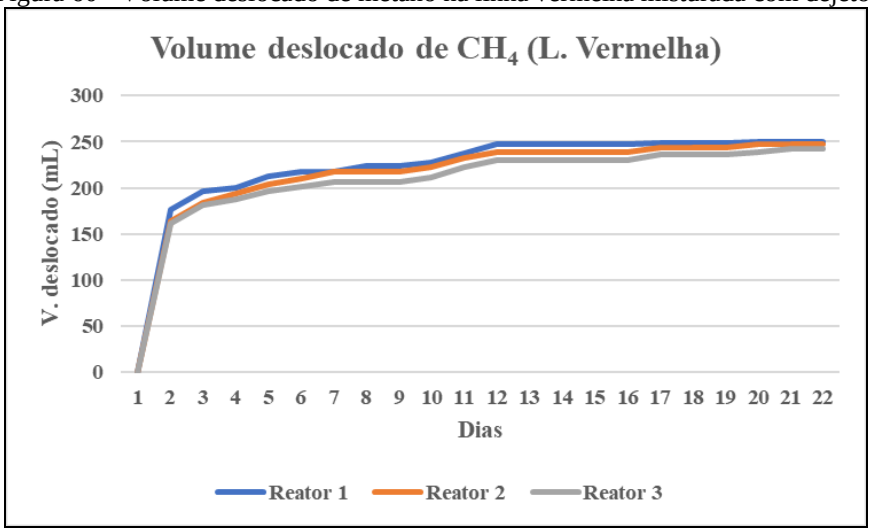
Figura 59 – Volume deslocado de metano na linha verde misturada com dejeto.



Fonte: Autoria própria.

Já no reator com a mistura do dejeto e da linha vermelha, sua produção máxima de biogás foi de 246mL que foi produzido em um período de 22 dias, tendo um processo de biodigesão imediata após o fechamento do reator onde já se produziu biogás, como mostrado no gráfico da Figura 60.

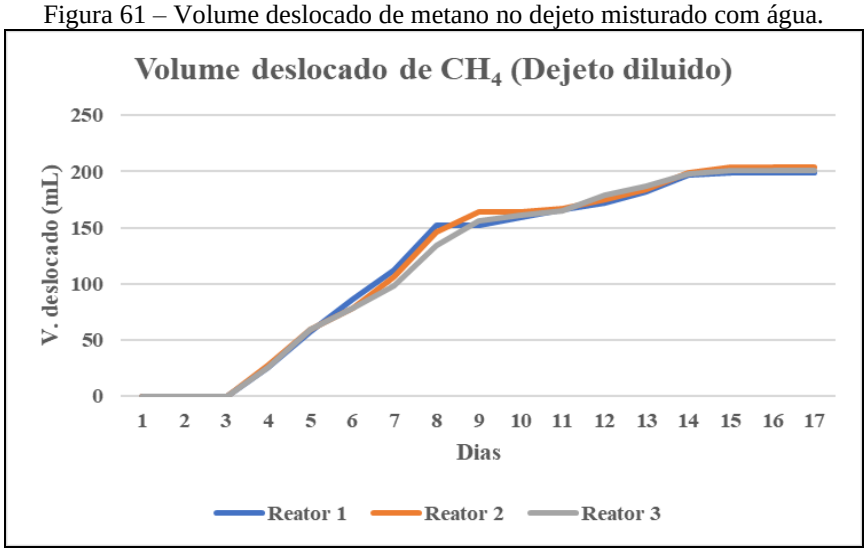
Figura 60 - Volume deslocado de metano na linha vermelha misturada com dejeto.



Fonte: Autoria própria.

Na mistura de dejeto com água da fazenda a produção de metano foi de 201mL e durou 17 dias e teve a necessidade de um período de adaptação inicial dos microrganismos de 3 dias após o fechamento do reator, para o início da produção de biogás, como pode ser observado no gráfico da Figura 61.

Figura 61 – Volume deslocado de metano no dejeto misturado com água.



Fonte: Autoria própria.

Pode ser observado que entre os reatores propostos, o que teve uma melhor produção de metano com 623mL, foi o reator contendo a mistura de linha verde e dejeto, o que pode ser atribuido a sua maior carga orgânica, teor de sólidos totais voláteis maior e a microbiota do aditivo que já foi formada previamente no interior do intestino bovino antes da coleta, ajudando a acelerar o período inicial de geração de biogás onde se necessita que sejam formados conjuntos de microorganismos necessários para o início da biodigestão, obtendo assim também uma velocidade maior em sua produção máxima, que foi obtida no periodo de 11 dias.

O reator com a linha vermelha e o dejeto teve uma produção média de 246mL, apesar de uma baixa produção de metano se comparado com a linha verde a adição do aditivo ajudou na concentração de matéria orgânica no meio e na concentração de sólidos totais voláteis, o que é uma caracteristira de suma importância para a produção de biogás e também ajudando no aumento da velocidade de início de produção do biogás, pois foi aumentada a quantidade de microbiota existente no meio quando se adicionou a linha vermelha.

A baixa produção de biogás pode ser devido a complexidade do material utilizado como aditivo, o sangue possui várias proteinas e lipideos que são matérias orgânicas muito complexas e que podem reduzir a produção, pois a etapa de hidrólise não consegue degradar completamente as moléculas, dificultando a produção de substrato para as outras etapas subsequêntes e aumentando o tempo de produção, o que pode ser observado com o aumento de 11 dias na produção total se comparado com a

linha verde, totalizando um período de 22 dias para a produção completa de metano nesse reator.

O reator que teve a menor produção de biogás foi o composto por dejeto e água, onde se conseguiu uma produção média de 201mL e um início de produção de biogás só após 3 dias, o que pode ser causado pela diluição do dejeto, provocando asssim a redução da matéria orgânica disponível no reator e a diminuição de sólidos totais necessários para as bactérias fermentativas, necessitando de um periodo maior de adaptação para a formação dos microorganismos que realizam o processo de biodigestão.

O período de produção total do reator foi de 17 dias, tendo um tempo de produção total menor se comparado com a linha vermelha, o que mostra uma velocidade maior na degradação da matéria orgânica, que pode ser atrbuida a uma menor complexidade das moléculas contidas no dejeto, se comparado com as moléculas complexas do sangue, como os lipideos e as proteinas que são mais difíceis de ser degradadas.

A formação da microbiota é uma das etapas essenciais para a produção rápida e efetiva de biogás, pois o processo envolve vários microorganismos que são responsáveis pela conversão do substrato em várias moléculas que são primordiais durante a biodigestão, entre esses responsáveis estão primeiro as bactérias hidrolíticas que degradam compostos de alta massa molecular como os lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis, segundo as bactérias anaeróbicas que transformam os monômeros em ácidos orgânicos simples, terceiro as bactérias acetogênicas que transformam os ácidos em moléculas com apenas dois carbonos e por fim as arqueias metanogênicas que convertem o substrato em CO_2 e CH_4 (KUNZ et. al., 2019).

As analises estatísticas som com o software R, mostraram os seguintes resultados para a produção de metano:

Quadro da análise de variância

	GL	**SQ**	**QM**	**Fc**	**Pr>Fc**
Tratamento	2	322160	161080	9166.2	3.5024e-11
Resíduo	6	105	18		
Total	8	322266			

CV: 1,17%

Os cálculos estatisticos mostram que a 5% de significância, se tem diferença entre os tratamentos.

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)
Valor-p: 0.2506674
De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância
valor-p: 0.9989885
De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Médias
1	a	L.Verde	623.3333
2	b	L.Vermelha	246.3333
3	c	Dejeto diluído	201.4167

O teste de Scott-Knott mostrou que o dejeto + linha verde (1), o dejeto + linha vermelha (2) e o dejeto diluído (3), são estatisticamente diferentes na produção de CH_4. O que pode ser observado pela diferenciação de letras no grupo após a análise dos dados, constatando assim que, foram obtidos resultados diferentes e importantes com a utilização dos aditivos nos reatores, destacando uma melhora na produção e ajudando a nortear estudos posteriores.

5. Conclusão

Levando-se em conta o que foi observado nos resultados deste trabalho, pode-se concluir que a adição dos resíduos de abatedouro, linha verde e linha vermelha geraram um aumento da matéria orgânica e inorgânica contida nos reatores, conseguindo assim uma melhor produção de metano nos reatores que utilizaram os aditivos, se comparados com o reator que continha só o dejeto diluído em água.

O reator com melhor performance de produção de metano foi o que utilizou a linha verde como aditivo, tendo um desempenho de cerca de 300% a mais de produção de biogás em escala laboratorial nessa diluição, se comparado com o reator sem o aditivo.

Também foi observado o aumento da velocidade de produção inicial de biogás com a adição dos aditivos de abatedouro, tendo uma produção imediata após a montagem do reator com a linha verde e também no reator com a linha vermelha, já nos reatores sem o aditivo houve o início da produção só após um período de 3 dias, mostrando que se conseguiu uma melhora na velocidade de produção com a utilização dos aditivos.

As análises físico-químicas foram primordiais para entender todo o processo e o que estava ocorrendo dentro de cada reator montado no laboratório, auxiliando no entendimento das etapas da biodigestão de cada reator, obtendo-se um maior conhecimento da composição de seus subprodutos, possibilitando assim propor uma destinação mais adequada a eles, como por exemplo a utilização como biofertilizantes devido ao seu teor de nitrogênio e fósforo, que são dois dos três elementos essenciais para um fertilizante de qualidade e para o crescimento das plantas, também mostrando assim os parâmetros que podem ser melhorados nos reatores em estudos futuros.

Ainda se faz necessário maiores testes com os aditivos para verificar sua aplicação em uma grande escala, mas pode-se concluir que a utilização dos resíduos do abatedouro como aditivos na produção de biogás, foram eficazes, sua utilização no processo de biodigestão também pode resultar na retirada de um passivo ambiental e na geração de renda, com um produto que seria descartado sem nenhuma utilização rentável.

6. Referências

AGEITEC - Agencia Embrapa de Informação Tecnológica: Adubação – Resíduos alternativos 2018. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html. Acesso em: 14 ago. 2020.

ALVES, I. R. F.S.: **Avaliação da Codigestão na Produção de Biogás**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica: Boletim Energético 2018. Disponível em:https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+2018/01298785-3069-c0e7-d9c8-a2cca07cddd9. Acesso em: 03 jan. 2020.

APHA; AWWA; WEF.: **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 2ª ed. Washington, 2012.

AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; SANTOS, M. L. F.; MONTEGGIA L. O.: **Metodologias para Determinação da Atividade Metanogênca Específica (AME) em Lodos Anaeróbicos**. Scientific Electronic Library, 2007.

ARAUJO, J. S. S.: **Eficiência de Biofertilizantes no Crescimento, Produção e Qualidade da Produção da Bananeira Nanica em Neossolo Flúvico**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

ARAUJO, P. P. P.; COSTA, L. P.: **Impactos Ambientais Nas Atividades De Abate De Bovinos**: Um Estudo No Matadouro Público Municipal De Caicó-RN. Revista Holos, 2014.

ASSUNÇÃO, G. P.: **Avaliação da Produção de Metano no Biogás Frente a Diferentes Diluições do Dejeto Bovino e a Influência Nutricional**. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2020.

ASTALS, S.; NOLLA, A. V.; MATA A. J.: **Thermophilic co-digestion of pig manure and crude glycerol: Process performance and digestate stability**. Journal of Biotechnology, v. 166, 2013.

BACCA, L. A. M.; ZENATTI, C. D.: **Estudo de Caso: Acompanhamento de Biodigestor no Município de Pato Bragado**. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 9, 2020.

BEN - Balanço Energético Nacional: **Relatório Síntese / Ano Base 2019**. [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf. Acesso em: 19 jul. 2021.

BNDES: **Banco Nacional do Desenvolvimento**, 2020. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Hotsites/Relatorio_Anual_2020/src/index.html. Acesso em: 09 fev. 2021.

BRASIL. Decreto n° 30.691, de 29 de março de 1952. Aprova o novo Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal, Rio de Janeiro, 1952.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo: **Operação e Manutenção de Lagoas Anaeróbias e Facultativas**. São Paulo, 1989.

CETESB: **Abate Bovinos e de Suínos**: Guia Técnico Ambiental De Abate (Bovino E Suíno). São Paulo, 2008.

CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. **Improving the design and operation of UASB reactors for treating domestic wastewater**: management of gaseous emissions. IX Latin American Workshop and Seminar on Anaerobic Digestion, Eastern Island, 2008.

CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis-Biogás: Nota Técnica n° 02/2020 de abril de 2020 – Panorama do biogás no Brasil em 2019. Foz do Iguaçu, 2019.

COELHO, T. S.: **Tecnologia de Produção e uso de Biogás e Biometano**: Gases Combustíveis e Sustentabilidade. 1 ed. São Paulo, 2018.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução Conama nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Conama, 1986.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005. Conama, 2005.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente: Resolução Conama nº 481, de 03 de outubro de 2017. Conama 2017.

CONCLA: **Resíduos do Abate Bovino,** 2017. Disponível em: https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?subclasse=1011201&tipo=cnae&versao=9&view=subclasse. Acesso em: 03 mar. 2021.

COSTA, G.: **Avaliação da Biodegradabilidade Anaeróbia de Esterco Ovino em Condições Termofílicas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C.: **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A.: **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. Wiley, 2011.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética: **Balanço Energético de 2018**. [*S. l.*], 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018. Acesso em: 23 jul. 2021.

ESTADÃO: **Jornal o Estadão de São Paulo**, 1973. Disponível em: https://acervo.estadao.com.br/pagina/#!/19731028-30242-nac-0086-999-86-clas. Acesso em: 16 ago. 2020.

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente: **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria.** Fundação Estadual do Meio Ambiente em Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte, 2015.

FEISTEL, J. C.: **Tratamento e Destinação de Resíduos e Efluentes de Matadouros e Abatedouros**. Trabalho para Disciplina de Seminários (Pós-Graduação em Ciência Animal da Escola de Veterinária e Zootecnia), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

FILHO, C. D. V.; SILVA, A. J.; SILVA, P. A. P.; SOUSA, F. C.: **Aproveitamento de Resíduos Agroindustriais na Elaboração de Subprodutos**. II Congresso Internacional das Ciências Agrárias 2017, Pernambuco, 2017.

FONSECA, B. C.: **Produção de Hidrogênio por Fermentação por um Novo Isolado de *Clostridium beijerinckii***. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2016.

FUKAYAMA, E. H.: **Características Quantitativas e Qualitativas da Cama de Frango Sob Diferentes Reutilizações: Efeitos na Produção de Biogás e Biofertilizante**. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias e Veterinárias) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.

GASPAR, R. M. B. L.: **Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GHOUALI, A.; SARI, T.; HARMAND, J.: **Maximizing biogas production from the anaerobic digestion**. Journal of Process Control, 2015.

GIODA, A.: **Comparação dos Níveis de Poluentes Emitidos pelos Diferentes Combustíveis Utilizados para Cocção e sua Influência no Aquecimento Global**. Revista Química Nova, v.41, Rio de Janeiro, 2018.

GOLDEMBERG, J.: **Energia e Desenvolvimento Sustentável**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 94 p. v. 1. ISBN 978-85-212-0570-8.

HENZEL, M. E.: **Análise de resíduos, como mecanismo de auxílio à redução de impactos ambientais**: um estudo de caso em abatedouro, 2009. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=163996. Acesso em: 02 jan. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Efetivo de Animais da Pecuária**, 2019. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2019-agencia-de-noticias/noticias/29164-rebanho-bovino-tem-leve-alta-em-2019-apos-dois-anos-seguidos-de-quedas. Acesso em: 05 fev. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Países e Estatísticas**. 2020. Disponível em: https://paises.ibge.gov.br/#/mapa. Acesso em: 15 nov. 2020.

IBGE: **Agricultura e Pecuária**, 2020. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9203-pesquisas-trimestrais-do-abate-de-animais.html. Acesso em 22 dez. 2020.

INBS: **Instituto Brasileiro de Sustentabilidade,** 2019. Disponível em: https://www.inbs.com.br/estatistica/. Acesso em 20 ago. 2020.

JORGE, L. H. A.; OMENA, E.: Dossiê técnico – Biodigestor. SENAI, Antônio Simões, 2012.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; CHHMEIER N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G.: **Manual Básico de Biogás**. 1 ed. Lajeado, 2014.

KLANK, M.: **Avaliação da Eficácia no Tratamento de Efluentes Líquidos em um Frigorifico de Bovinos** 2011. Trabalho de conclusão de curso (MBA em Gestão Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

KONRAD, O.; FILHO, M. G.; LUMI, M.; HASAN, C.: **Atlas das Biomassas do Rio Grande do Sul para Produção de Biogás e Biometano**. 1. ed. Lajeado, 2016.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C.: **Fundamentos da Digestão Anaeróbica, Purificação do Biogás, uso e Tratamento do Digestato**. 1 ed. Concórdia, 2019.

LOPES, K.; MARTINS, E. M.; MIRANDA, R. L.: **A Potencialidade Energética da Biomassa no Brasil**, Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate, v.5, n.1, 2019.

MALLMANN, P. S.: **Avaliação do Potencial Metanogênico na Codigestão do Pó de Tabaco com Dejeto Suíno** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio Sinos, São Leopoldo, 2019.

MATHEWS, B.W.; SOLLENBERGER, L.E. **Grazing systems and spatial distribution of nutrients in pastures: soil considerations**. In: Nutrient Cycling In Forage Systems. University of Missouri, 1996.

MATOS, C. F.: **Produção de Biogás e Biofertilizante a Partir de Dejetos de Bovinos, sob Sistema Orgânico e Convencional de Produção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

MAZARELI, R. C. S.: **Co-digestão Anaeróbia de Resíduos Vegetais e Águas Residuárias de Suinocultura em Reatores Horizontais de Leito Fixo e Alta Taxa**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.

NAZARO, M. S.: **Desenvolvimento de um Biodigestor Residencial para Processamento de Resíduos Sólidos Orgânicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

OLIVER, A. P. M.; NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E.: **Manual de Treinamento em Biodigestão**. 2 ed. Fortaleza, 2008.

PASCHOETO, F. J.; PAVAN, D. C.; ROCHA, G. H. M.; OLIVEIRA, A. D.; FIORUCCI, L. L. R.; AZENHA T. D.: **Biodigestor e a Geração de Biofertilizante e Biogás**. X Encontro Internacional de Produção Científica, Maringá, 2017.

PEREIRA, R. O.; QUADRO, M. S.; ANTUNES, R. M.; KOETZ, P. R.: **Influência da Recirculação e da Alcalinidade no Desempenho de um Reator UASB no Tratamento de Efluente de Suinocultura**. Revista Brasileira de Agrociência, v.10, n.1, 2004.

PINTO, D. M. C. L.: **Avaliação da Partida da Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos Inoculados com Percolado**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

RABONI, M.; VIOTTI, P.; CAPODAGLIO A. G.: **A comprehensive analysis of the current and future role of biofuels for transport in the European Union (EU)**. Journal of Applied Science. Taubaté, 2015.

REZENDE, B. X.: **Estudo da Viabilidade da Utilização de Biomassa para Geração de Energia Elétrica**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017.

RIETH, F.; VELDEN, F. V.: **Da Criação ao Abate:** Etnografias dos caminhos da pecuária no Brasil. Revista de Antropologia e Arqueologia, v.7, n.1, 2019.

ROCHA, G.M.; GARCIA, J. M.; SILVA, A. L.; LONGO, R. M.: **Atributos físicos do solo de florestas urbanas como indicadores de degradação**, Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 30, 2020.

RODRIGUES, N. H. P.; MARTINKOSKI, C.; RODRIGUES, R. L.; GOMES, J. J.; MARTINKOSKI, C. J.; MORAIS, C. R.: **Portfólio Bibliográfico da Utilização de**

Resíduos Provenientes da Suinocultura na Geração de Bioenergia. Revista Espacios, v. 38, 2017.

SALOMON, K. R.: **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas: **Compost Barn**. 2015. Disponível em: https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/conheca-o-compost-barn-novidade-de-manejo-para-o-setor-leiteiro,d6647383f9cbe410VgnVCM1000003b74010aRCRD. Acesso em: 28 fev. 2020.

SGANZERLA, E.: **Biodigestores: uma solução**. 1 ed., Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática: **Banco de Tabelas Estatísticas**, 2019. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca15/brasil. Acesso em: 12 nov. 2020.

SIDRA: **Abate Tabelas**, 2020. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/abate/tabelas. Acesso em: 05 dez. 2020.

SORIANO, E.; LONGE, L. R.; GREGORIO, L. T.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L. **Crise hídrica em São Paulo Sob o Ponto de Vista dos Desastres**, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), 2016.

STATISTA: **Maiores Produtores de Carne Bovina**. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/263990/leading-beef-producers-around-the-world-since-2021/. Acesso em: 10 jul. 2021.

STUCHI, J. F.: **Biofertilizante: Um Adubo Líquido de Qualidade que Você Pode Fazer**. 1 ed. Brasília, 2015.

SUNDBERG, C.; SOUD, W.A.; LARSSON, M.; ALM, E.; YEKTA, S. S.; SVENSSON, B. H.; SORENSEN, S. J.; KARLSSON, A.: **Pyrosequencing analyses of bacterial and archaeal richness in 21 full-scale biogas digesters**. FEMS microbiology ecology. ResearchGate, 2013.

VENCESLAU. R. M. B. B.: **Diversificação das Aplicações do Bagaço de Cana de Açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) - Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

WANG, J.; WAN, W.: **Factors influencing fermentative hydrogen production: A review**. International Journal of Hydrogen Energy, 34 ed., 2009.

WIEGANT, W. M.; ZEEMAN, G.: **The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes**. Agricultural Wastes, V. 16, 1986.

ZANATO, J. A. F.: **Produção e Qualidade do Biogás Gerado com os Dejetos de Diferentes Espécies Animais**. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

ZHAO, X.; JOSEPH, B.; KUHN, J.; OZCAN, S.: **Biogas Reforming to Syngas: A Review**. Iscience, v. 23, 2020.