

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E
INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE
MESTRADO PROFISSIONAL
CAMPUS RIO VERDE**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE
BIODIGESTORES MISTURA COMPLETA (CSTR)
VERSUS LAGOA COBERTA NO SUDOESTE
GOIANO**

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto

Discente: Moacir Fernando Cordeiro

**RIO VERDE – GO
NOVEMBRO – 2022**

MOACIR FERNANDO CORDEIRO

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE BIODIGESTORES
MISTURA COMPLETA (CSTR) VERSUS LAGOA COBERTA NO SUDOESTE
GOIANO**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

**RIO VERDE – GO
NOVEMBRO – 2022**

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

C794a Cordeiro, Moacir Fernando
Avaliação Comparativa do Desempenho de
Biodigestores Mistura Completa (CSTR) versus Lagoa
Coberta no Sudoeste Goiano / Moacir Fernando
Cordeiro; orientador Dr. João Areis Ferreira Barbosa
Júnior; co-orientador Dr. Bruno de Oliveira Costa
Couto. -- Rio Verde, 2022.
81 p.

Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissional em
Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (Campus Rio
Verde)) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio
Verde, 2022.

1. Suinocultura . 2. Dejeito suíno. 3. Biodigestor.
4. Biodigestão anaeróbica. 5. Biogás. I. Barbosa
Júnior, Dr. João Areis Ferreira, orient. II. Couto,
Dr. Bruno de Oliveira Costa , co orient. III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 106/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 57
Data: 28/11/2022	Hora de início: 08:00h	Hora de encerramento: 10:00h
Matrícula do discente:	2020202331440117	
Nome do discente:	Moacir Fernando Cordeiro	
Título do trabalho:	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE BIODIGESTORES MISTURA COMPLETA (CSTR) VERSUS LAGOA COBERTA NO SUDOESTE GOIANO	
Orientador:	João Areis Ferreira Barbosa Júnior	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Eficiência Energética e Sustentabilidade	
Projeto de pesquisa de vinculação	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE BIODIGESTORES MISTURA COMPLETA (CSTR) VERSUS LAGOA COBERTA NO SUDOESTE GOIANO	

Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
------------	--------------------------------------------------

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior (Presidente da banca), Prof. Dr. Danns Pereira Barbosa (Avaliador Externo), Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira (Avaliador Externo), Prof. Dr. Édio Damásio Da Silva Junior (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada por vídeo conferência via Google Meet à distância, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de MOACIR FERNANDO CORDEIRO, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, João Areis Ferreira Barbosa Júnior, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Sérgio Botelho de Oliveira, Sérgio Botelho de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 28/11/2022 15:05:44.
- Edio Damasio da Silva Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/11/2022 11:31:55.
- Danns Pereira Barbosa, Danns Pereira Barbosa - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano (1), em 28/11/2022 11:29:18.
- Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/11/2022 11:24:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/11/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 445272
Código de Autenticação: d9950b3cb4



Campus Rio Verde, Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 120/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE BIODIGESTORES MISTURA COMPLETA (CSTR)
VERSUS LAGOA COBERTA NO SUDOESTE GOIANO**

Autor: Moacir Fernando Cordeiro

Orientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de
Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 28 de novembro de 2022.

Prof. Dr. Danns Pereira Barbosa
Avaliador externo - PUC / Goiás

Prof. Dr. Édio Damásio Da Silva
Junior
Avaliador Interno - IF Goiano / Rio
Verde

Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira
Avaliador externo - IFG / Goiás

Prof. Dr. João Areis Ferreira
Barbosa Júnior
Presidente da banca - IF Goiano /
Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Sérgio Botelho de Oliveira, Sérgio Botelho de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1)**, em 30/11/2022 12:00:11.
- **Edio Damasio da Silva Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/11/2022 11:32:18.
- **Danns Pereira Barbosa, Danns Pereira Barbosa - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano (1)**, em 28/11/2022 11:26:53.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/11/2022 11:19:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/11/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 445279

Código de Autenticação: 2967c54b30



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo: _____

Nome completo do autor:

MOACIR FERNANDO CORDEIRO

Matrícula:

2020202331440117

Título do trabalho:

Avaliação comparativa do desempenho de biodigestores mistura completa (CSTR) versus lagoa coberta no Sudoeste Goiano

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIF Goiano: 25/03/2023

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

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

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

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

RIO VERDE, GO

Local

25/03/2023

Data

MOACIR FERNANDO

CORDEIRO:685595699

87

Assinado de forma digital por

MOACIR FERNANDO

CORDEIRO:685595699

Dados: 2023.01.25 08:59:15 -03'00'

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais.

Ciente e de acordo:

João Arns F. Barbosa Jr.

Assinado de forma digital por João

Arns Femeira Barbosa Júnior

Dados: 2023.01.25 08:59:15 -03'00'

Assinatura do(a) orientador(a)

Dedico este trabalho à minha esposa e à
minha filha, pela compreensão e suporte
neste objetivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade da vida e de evolução a cada dia.

A esta instituição, ao Programa de Pós-Graduação e ao seu corpo docente, pelo conhecimento e oportunidade a mim concedidos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Areis, pelo empenho e atendimento excepcional em todas as etapas do projeto.

Aos doutores Bruno Costa Couto e Ana Paula Gomide e demais doutores do Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, que colaboraram de forma indireta e incansável neste meu objetivo.

Ao Ilustre Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira, do Instituto Federal de Goiás, pelo suporte ao aprendizado.

À minha família, em especial à minha esposa Meriélen e à minha filha Letícia, pela compreensão da minha ausência durante a dedicação a este projeto; à minha mãe Edna, pelo seu empenho e dedicação incansável a meus estudos básicos e de graduação, que me fortaleceram para a conclusão dessa nova atualização; e ao meu saudoso pai José (*in memoriam*), pelos ensinamentos de garra nas atividades.

“Eu não falhei. Eu encontrei 10.000
maneiras que não funcionam.”

(Thomas Alva Edison)

RESUMO

A suinocultura desponta como importante atividade relacionada à produção de proteína, bem como ao desenvolvimento de municípios do interior do país. Como toda atividade agroindustrial, o uso de água e o descarte dos rejeitos são intrínsecos ao processo, mas, neste caso específico, os dejetos são altamente contaminantes pela presença da alta carga orgânica e de patógenos. Como agravante, Rio Verde está localizada sobre o Sistema Aquífero Guarani – SAG, o que requer um cuidado redobrado quanto à sua destinação no solo como fertilizante. Uma forma habitual de tratamento destes dejetos ocorre através de lagoas de estabilização, porém com baixa eficácia. Já com o uso de biodigestor anaeróbico, além de potencializar a degradação do substrato, fornece biogás como fonte de energia renovável e descentralizada. Embora já sejam tecnologias muito utilizadas, os biodigestores têm certa complexidade na operação. O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de duas tecnologias distintas de biodigestão anaeróbica na região do Sudoeste Goiano, sendo uma *Continuous Stirred Tank Reactor* - CSTR e a outra com Biodigestor Lagoa Coberta-BLC, pela realização de análises das concentrações dos macro e micronutrientes, pH, matéria orgânica (MO) e matéria seca (MS) do digestato, ainda monitorando os componentes metano, ácido sulfídrico, gás carbônico e amônia, para avaliar a melhor tecnologia de biodigestão anaeróbia para produção de biogás na região do sudoeste Goiano. Tais tecnologias são empregadas em duas granjas de terminação com ocupação média de 12.000 suínos, na cidade de Rio Verde - GO. As amostras semissólidas foram coletadas através de 6 visitas com intervalo entre 30 e 40 dias, ao longo oito meses, nos pontos de entrada e saída de cada biodigestor e na saída da lagoa de estabilização, totalizando 36 amostragens. As amostras gasosas foram coletadas na saída de gás de cada biodigestor, perfazendo 48 amostras. Os parâmetros dos nutrientes foram obtidos nos laboratórios de análises de solo da cidade de Rio Verde e as concentrações de biogás, no kit de análise de biogás Alfakit. Os resultados mostraram que ambos os sistemas são similares na redução da carga orgânica. O CSTR, operando isoladamente, não resultou níveis de CH₄ e H₂S melhores que o BLC. Destaca-se que o BLC, já muito difundido na região, pode ser otimizado com o uso de equipamentos adotados no CSTR, incluindo pré-agitação e agitação interna do dejetos, assegurando a melhor performance durante a anaerobiose. O monitoramento de variáveis do dejetos como MO, MS e pH

colaboram contra o desperdício de água nas instalações. Já o monitoramento das variáveis do biogás é fundamental para o bom e constante funcionamento de sistemas de geração de energia. A injeção de O_2 para reduzir o H_2S é fundamental para o pleno aproveitamento do biogás na geração de energia, mas os volumes diários injetados devem ser calculados para cada caso, e as resultantes devem ser monitorados frequentemente na planta.

Palavras-chave: Suinocultura. Dejeito suíno. Biodigestor. Biodigestão anaeróbica. Biogás.

ABSTRACT

Pig farming emerges as an important activity related to protein production, as well as the development of municipalities in the interior of the country. Like any agro-industrial activity, the use of water and the disposal of waste are intrinsic to the process, but in this specific case, the waste is highly polluting due to the presence of a high organic load and pathogens. As an aggravating factor, Rio Verde is located on the Guarani Aquifer System – SAG, which requires extra care in terms of its use in the soil as fertilizer. A common way of treating these wastes is through stabilization ponds, but with low efficiency. With the use of anaerobic biodigester, in addition to enhancing substrate degradation, it provides biogas as a source of renewable and decentralized energy. Although they are already widely used technologies, biodigesters have a certain complexity in operation. The objective of this work is to compare the performance of two different technologies of anaerobic digestion in the region of the Southwest of Goiás, being a Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR and the other with Biodigester Lagoon Covered-BLC, through the analysis of the concentrations of macro and micronutrients, pH, organic matter (OM) and dry matter (DM) of the digestate and also monitoring the components of the biogas Methane, Sulfidric Acid, Carbonic Gas and Ammonia, to evaluate the best technology of anaerobic digestion for biogas production in the southwest region of Goiás. Such technologies are employed in two finishing farms with an average occupancy of 12,000 pigs, in the city of Rio Verde - GO. The semi-solid samples were collected through 6 visits between 30 and 40 days apart, in a time interval of eight months, at the entry and exit points of each biodigester and at the exit of the stabilization lagoon, totaling 36 samples. Gas samples were collected at the gas outlet of each biodigester, totaling 48 samples. The nutrient parameters were obtained through soil analysis laboratories in the city of Rio Verde and the biogas concentrations through the Alfakit biogas analysis kit. The results showed that both systems are similar in reducing the organic load. The CSTR operating alone did not result in better levels of CH_4 and H_2S than the BLC. The BLC, already widespread in the region, can be optimized with equipment adopted in the CSTR, such as pre-agitation and internal agitation of the manure, ensuring the best performance during anaerobiosis. The monitoring of waste variables such as MO, MS, pH, collaborate against wasting water in the facilities. The monitoring of biogas variables, on the other hand, is fundamental for the good and constant functioning of energy generation systems. The injection of O_2 to reduce H_2S is fundamental for the full use of biogas in energy generation, but the daily injected volumes must be calculated for each case and the resulting must be monitored frequently in the plant.

Keywords: biogas. anaerobic digestion. pig farming. pig slurry. biodigester

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	1
2	Objetivos	4
2.1	Objetivo geral:	4
2.2	Objetivos específicos	4
3	Revisão de Literatura	5
3.1	Suinocultura e os dejetos suínos	5
3.2	Processos de tratamento de dejetos com biodigestores	8
3.2.1	<i>Biodigestor Indiano</i>	9
3.2.2	<i>Biodigestor Chinês</i>	10
3.2.3	<i>Biodigestor (UASB)</i>	11
3.2.4	<i>Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC)</i>	11
3.2.5	<i>Biodigestor Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)</i>	12
3.3	Tecnologias estudadas na pesquisa.....	12
3.3.1	<i>Biodigestor de mistura completa- CSTR</i>	13
3.3.2	<i>Biodigestor Lagoa Coberta - BLC</i>	14
3.3.3	<i>Descrição sucinta dos dois sistemas de biodigestores abordados</i>	15
3.4	Digestato e biodigestão anaeróbia	16
3.4.1	<i>A importância dos nutrientes no digestato</i>	17
3.4.2	<i>Caracterização dos nutrientes do digestato</i>	19
3.5	Fases metabólicas de processo da biodigestão	21
3.6	Características e análise do digestato	23
3.6.1	<i>Definição e importância das análises do digestato</i>	23
3.7	Aspectos bioquímicos do biogás	27
3.7.1	<i>Caracterização do Biogás</i>	28
3.7.2	<i>Influência dos componentes do biogás</i>	28
3.8	Aproveitamento de energia elétrica	29
3.8.1	<i>Produção de energia elétrica com suínos de terminação</i>	30
3.8.2	<i>Dispositivos auxiliares de tratamento do biogás para produção de energia elétrica</i>	30
4	Referências bibliográficas.....	38
5	Capítulo 1	46
6	Introdução	48
7	Material e Métodos	49

8	Resultados e Discussão	54
9	Conclusões	62
10	Recomendações.....	62
11	Literatura citada	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição resumida dos sistemas de biodigestores abordados	16
Tabela 2. Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos	19
Tabela 3. Concentração de micronutrientes essenciais durante a DA	19
Tabela 4. Classificação dos microrganismos de acordo com a temperatura	25
Tabela 5. Composição teórica do biogás	29
Tabela 6. Parâmetros avaliados nas amostragens em cada granja	51
Tabela 7. Concentrações média de gases no biogás	54
Tabela 8. Resultados das análises dos macronutrientes de DSL para o CSTR, BLC e LE	58
Tabela 9. Redução percentual da concentração de macronutrientes através dos sistemas CSTR e BLC, respectivamente	59
Tabela 10. Concentração de macronutrientes na entrada do CSTR e BLC, respectivamente	59
Tabela 11. Resultados das análises dos micronutrientes de DSL para o CSTR, BLC e LE.....	59
Tabela 12. Redução percentual da concentração de micronutrientes através dos sistemas CSTR e BLC.....	60
Tabela 13. Concentração média de micronutrientes no CSTR e BLC, respectivamente:	60
Tabela 14. Resultados das análises do pH, densidade, MS, MO do DSL para o CSTR, BLC e LE.....	61
Tabela 15. Dados estatísticos de pH, densidade, MS o MO na saída do processo CSTR e BLC, respectivamente:.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Potencial de biogás dos estados brasileiros em 2019	6
Figura 2. Síntese resumida da produção de biogás da suinocultura	7
Figura 3. Representação do biodigestor indiano.....	10
Figura 4. Representação do biodigestor chinês	10
Figura 5. Representação do biodigestor UASB	11
Figura 6. Representação do biodigestor BLC	12
Figura 7. Representação do biodigestor CSTR.....	12
Figura 8. Biodigestor CSTR em estudo	14
Figura 9. Biodigestor BLC em estudo	15
Figura 10. Classificação dos nutrientes essenciais da tabela periódica	18
Figura 11. Sequência metabólica e grupos microbianos na DA	23
Figura 12. Temperaturas ideais para a DA	26
Figura 13. Gerador a biogás da Granja B	30
Figura 14. Filtro com carvão ativado - CSTR	32
Figura 15. Filtro de secagem por condensação em uso no CSTR	33
Figura 16. Filtro para redução de H ₂ S	34
Figura 17. Fluxo de purificação do biogás	35
Figura 18. Sistema de aquecimento do CSTR	36
Figura 19. Agitadores incorporados ao CSTR.....	36
Figura 20. Tipos de agitadores adotados em biodigestores	37
Figura 21. Detalhe do agitadores BLC* em série ao CSTR.....	37
Figura 22. Mapas de Rio Verde e localização	49
Figura 23. Localização dos equipamentos.....	50
Figura 24. Pontos de coleta das amostras na planta de biogás	52
Figura 25. Ponto (I): coleta do dejetos na entrada dos biodigestores.....	52
Figura 26. Pontos de coleta de biogás:	53
Figura 27. Comparativo NH ₃ no CSTR e BLC	55
Figura 28. Comparativo H ₂ S no CSTR e BLC	56
Figura 29. Comparativo CH ₄ no CSTR e BLC.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

ANA	- Agência Nacional de Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BLC	- Biodigestor de lagoa coberta
C/N	- Relação Carbono e Nitrogênio
COV	- Carga Orgânica Volumétrica
CSTR	- do inglês <i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
DA	- Digestão Anaeróbica
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
g.L ⁻¹	- Grama por Litro
GMG	- Grupo Motogerador
H ₂ O _v	- Vapor de água
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
mg.L ⁻¹	- Miligrama por Litro
MO	- Matéria Orgânica
MS	- Matéria Seca
PEAD	- Polietileno de Alta Densidade
PEBDL	- Polietileno de Baixa Densidade Linear
SAG	- Sistema Aquífero Guarani
SISTRATES®	- Sistema de Tratamento de Dejetos Suínos
SOV	- Sólidos Orgânicos Voláteis
ST	- Sólidos Totais
SV	- Sólidos Voláteis
TIR	- Taxa Interna de Retorno
ton.a ⁻¹	- Tonelada por Ano
TRH	- Tempo de Retenção Hidráulica
TRS	- Tempo de Retenção de Sólidos
UASB	- do inglês <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UPL	- Unidade de Produção de Leitões
\bar{X}	- Média
S	- Desvio Padrão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Entre as décadas de 1990 e 2000, houve um expressivo crescimento do agronegócio do município de Rio Verde. Com isso, os produtores, visando ao desenvolvimento econômico, investiram em granjas de suínos na região, o que atualmente enquadra o município como o 2º maior produtor nacional IBGE (2019). A proposta de construção das granjas no município era que obrigatoriamente deveria constar, além dos barracões, um sistema de tratamento de dejetos com lagoas de estabilização.

A nível de Brasil, o aumento da produção brasileira de carne suína, que era de 3.237 milhões ton.a⁻¹ em 2010, passou para 4.436 milhões ton.a⁻¹ em 2020, e a nível mundial o país se destaca como o 4º maior produtor e o 4º maior exportador mundial (ABPA, 2020).

A expansão da suinocultura e a intensificação da produção confinada em granjas aumentaram consideravelmente os percentuais de resíduos orgânicos na região, que está localizada sobre o Sistema Aquífero Guarani (SAG), que, conforme cita Oliveira (2009), somente dentro do estado de Goiás, corresponde a uma área de 44.000 km², o que torna de suma importância checar o que há de disponível em termos de resíduos da atividade para aplicação no solo, após o devido tratamento anaeróbico.

O uso de água no processo é necessário e recorrente, com base nos dados publicados pela UNESCO (2017), cerca de 70% da água doce consumida mundialmente se refere ao setor agrícola. O desperdício de água nas instalações é um inibidor do processo da biodigestão e um agravante ao meio ambiente. Lopes (2014) cita que a falta de cuidados com lagoas de dejetos, sua aplicação excessiva no solo, vazamentos de água nas instalações e manejo inadequado podem trazer danos imensos ao ar, rios, solo e a lençóis freáticos.

O avanço da suinocultura para o Centro-Oeste trouxe também aumento da concentração de resíduos poluidores. Dados como a fisiologia digestiva dos animais de

um determinado lote, sexagem, condições nutricionais do trato e a quantidade de água em excesso contribuem para o aumento do potencial poluidor (Vivan et al., 2010).

A região Sul do Brasil mantém uma alta concentração de suínos confinados nos seus estados, alojando cerca de 600 matrizes nas unidades de produção de leitões (UPL) ou 750 em unidades de terminação (UT). A migração da atividade suinícola para as Regiões Centro-Oeste e Sudeste do país ocorre após o ano 2000, promovendo a maior disponibilidade de grãos e maiores áreas para a agricultura, o crescimento da população de suínos nesta região. Diferentemente das granjas do Sul, as granjas do Centro-Oeste alojam, em média, 4.400 matrizes UT ou cerca 2.000 UPL, trazendo, com isto, novos desafios para o correto manejo dos efluentes gerados na suinocultura (SUINOCULTURA INDUSTRIAL, 2006).

A escolha das tecnologias disponíveis para o tratamento do dejetos deve considerar aspectos técnicos e econômicos intrínsecos à suinocultura regional assim como as características da instalação, incluindo número de animais alojados, volume de efluente e disponibilidade de área para uso agrônômico dos dejetos (SUINOCULTURA INDUSTRIAL, 2006).

A oportunidade de geração de energia para consumo próprio e ainda de fertilizantes orgânicos para uso na propriedade garante a sustentabilidade desta produção (SUINOCULTURA INDUSTRIAL, 2006).

Os dejetos suínos são constituídos por fezes, urina, restos de alimento e água do trato dos animais, pelos e limpeza das baias, que geram significativo montante de dejetos, que, por sua vez, geram um grande volume de água residuária (Ros et al., 2017). Este volume, quando inserido num processo anaeróbico, transforma os compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples, posteriormente em CH_4 e CO_2 , entre outros gases.

O modelo de biodigestor mais comum no Sudoeste Goiano é do tipo biodigestor de lagoa coberta (BLC), que se destaca pelo menor custo de construção, tecnologia mais simples e possibilita o armazenamento do biogás gerado (Calza et al., 2015). Cheng & Wei (2018) também citam o menor custo de construção do BLC e a simplicidade da operação, aliados ao aproveitamento dos seus subprodutos: biogás e biofertilizante. Já o biodigestor de mistura completa (CSTR) tem uma série de equipamentos que potencializam a DA, destacando-se o agitador mecânico e o aquecimento térmico, exigindo, porém, maior dedicação na sua operação e maior nível tecnológico.

Experiências inexitosas de geração elétrica com motogeradores adaptados do diesel e erros de dimensionamento elétricos deixaram uma imagem muito negativa para tal aplicação na região, em razão dos inúmeros problemas de funcionamento e da falta de conhecimento sobre o monitoramento do biogás, desacreditando este modelo de projeto para a utilização do biogás. Mariani (2018) cita que a instalação de sistemas de geração de biogás demanda de altos investimentos de aquisição em decorrência das tecnologias aplicadas.

Entretanto, a partir de 2014, os constantes reajustes de tarifa de energia elétrica e as inúmeras quedas de energia acarretaram perdas na cadeia produtiva do setor, evidenciando a necessidade de buscar novamente soluções energéticas alternativas, tendo sido retomada a geração de energia elétrica através do biogás.

O empenho de empresas do ramo de geração, que investiram no desenvolvimento tecnológico de motores ciclo Otto ou de ignição por centelha, acoplados a alternador, especificamente para o uso do biogás *in natura*, propiciou uma geração de energia de maior confiabilidade, que supre toda ou boa parte da demanda energética das granjas (Souza, 2016).

Neste sentido, o aproveitamento do biogás para a geração de energia alia a busca de fontes energéticas renováveis à neutralização da carga orgânica do processo, não esquecendo ainda que mantém a geração de empregos na região, contemplando o tripé social, econômico e ambiental.

A suinocultura vem mantendo sua expansão nos últimos anos no Brasil, o que garante que haverá biomassa abundante resultante deste processo e, conseqüentemente, alta carga de resíduos contaminantes do solo, trazendo consigo aumento do consumo de energia elétrica e de água, demandando, assim, aprimoramento das técnicas de biodigestão já conhecidas.

O dejetos sem tratamento ou sem conhecimento de suas concentrações não pode ser dispensado no solo para fertirrigação, devido a seu potencial poluidor. Com a tendência de aumento do uso de biodigestor para redução das cargas orgânicas e geração de biogás, observa-se que o CSTR vem ganhando espaço no Brasil, e este estudo de caso visa a verificar se ele pode ser considerado mais eficiente que o BLC, seja em termos de redução da carga orgânica ou de aumento de produção de biogás após a biodigestão, visto ser ele de maior complexidade técnica e operacional.

A influência do meio exterior e interior de um biodigestor em que temperatura, ações sobre o manejo dos dejetos e correções químicas pontuais sobre o processo

influenciam diretamente no seu rendimento, mesmo em regiões com temperaturas médias mais elevadas, como as do Centro-Oeste do Brasil, nos instiga a verificar a viabilidade da adoção de um sistema CSTR ao invés do BLC, já bastante difundido na região.

Um estudo comparativo entre os dois sistemas CSTR e BLC pode auxiliar no aprimoramento da técnica de biodigestão na suinocultura regional, já que dispositivos utilizados em uma tecnologia podem ser adaptados a outra.

O monitoramento periódico dos nutrientes contidos no digestato é fundamental para manter a constância de produção de biogás, pois visa a identificar o balanço de nutrientes na biodigestão ou ainda a identificar o uso excessivo de água no processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral:

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de duas tecnologias de biodigestão anaeróbica (DA) no Sudoeste Goiano, sendo uma CSTR e a outra BLC, realizando análises das concentrações de nutrientes na entrada e saída dos biodigestores e monitorando as principais componentes do biogás CH_4 , H_2S , NH_3 e CO_2 , compilando informações de cada granja para propor melhorias nos processos.

2.2 Objetivos específicos

Este projeto tem como objetivos específicos:

1. Analisar se o sistema CSTR, que contempla um controle de operação mais apurado, apresenta superioridade no tratamento do digestato e na geração de energia;
2. Verificar se a periódica realização de análises químicas do digestato pode auxiliar na verificação de balanço de nutrientes;

3. Compreender o funcionamento de ambos os sistemas para eventual interação tecnológica entre os mesmos e sugestão de melhorias em projetos locais;

3 REVISÃO DE LITERATURA

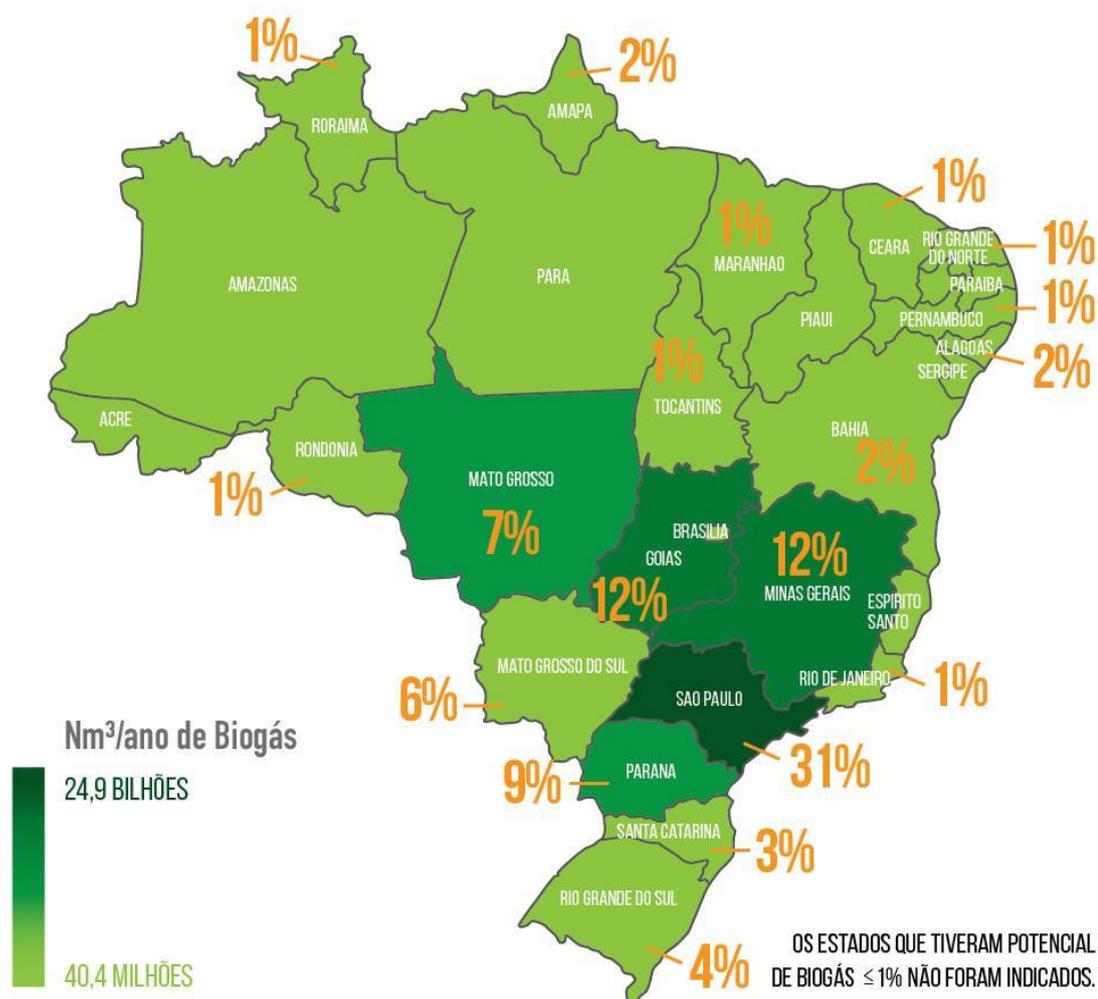
3.1 Suinocultura e os dejetos suínos

Com o aumento populacional mundial, mesmo em ritmo mais lento que em décadas passadas, a demanda por proteína animal vem crescendo a cada ano. A carne suína vem se destacando pela produção em escala e pela qualidade nutricional. Porém, por se tratar de uma atividade de confinamento que consome alto volume de água, necessita de uma correta destinação de seus efluentes. Reforçando essa assertiva, o solo da região Centro Oeste requer alta demanda por fertilizantes, o que favorece o tratamento local para posterior incorporação no solo.

Conforme cita ABIOGÁS (2020), Figura 1, o Brasil tem grande potencial de biogás oriundo de efluentes em diversos estados.

A região de Rio Verde-Goiás conta com vasto número de biodigestores subaproveitados pelas granjas de suinocultura. A falta de conhecimento das técnicas disponíveis, do entendimento teórico do funcionamento da anaerobiose e ainda da não realização de análises periódicas dos componentes físico-químicos do biogás e do digestato não promove o aproveitamento deste combustível.

Figura 1. Potencial de biogás dos estados brasileiros em 2019



Fonte: Adaptado de ABIOGÁS (2020).

Com base na Figura 2, tem-se uma síntese inicial do processo, em que fezes, urina, pelos e restos de alimentos não digeridos pelos suínos são descartados através da lavagem das salas de alojamento, higienizadas periodicamente com água de poços, auxiliados por lavadores de pressão. As águas residuais da lavagem e os compostos da excreta dos animais são conduzidas através de canaletas de armazenamento e tubulações de policloreto de vinila (PVC), em determinado dia do mês, liberadas por gravidade ao biodigestor, levando consigo elevada concentração de matéria orgânica, N, P, metais pesados e patógenos (Waki et al., 2018).

Conforme citado acima, a utilização de água é inerente ao processo e em volumes consideráveis, requerendo, assim, grande cuidado quanto à sua aplicação e desperdício. A utilização de água sem controle aumenta a dispersão dos dejetos, agravando ainda mais os problemas ambientais. A poluição da atividade suinícola é

muito alta, visto que a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é extremamente alta se comparada ao esgoto doméstico.

López-Pacheco (2021) cita que a produção da proteína suína vem se expandindo nos últimos anos e traz consigo um significativo aumento de resíduos através de suas águas residuais, e a falta de aplicação de tecnologias de tratamento destes resíduos traz consequências danosas ao solo e aos corpos hídricos.

Figura 2. Síntese resumida da produção de biogás da suinocultura



Fonte: O Autor

Sunada et al. (2014) comentam sobre as elevadas concentrações de matérias orgânicas dos dejetos suínos além dos elevados teores de coliformes totais e termotolerantes e significativa quantidade de nutrientes, em especial o N e P, o que confirma que a atividade suinícola tem alto impacto poluidor para o meio ambiente.

Coelho et al. (2018) citam que os biodigestores são lagoas anaeróbicas cobertas, onde não há presença de oxigênio, que promovem a degradação da matéria orgânica por meio da digestão anaeróbia (DA).

O aumento da produção de suínos obtido pelo sistema intensivo, também chamado de confinamento, proporciona um maior controle sobre o processo. Contudo, devido ao acúmulo dos dejetos presentes em pequenas áreas de terras, torna-se uma preocupação ambiental, pois tais dejetos se caracterizam como uma fonte altamente poluidora quando não tratados adequadamente (Pasini et al., 2019).

É necessário avaliar e tomar medidas de controle na geração do “passivo” ambiental gerado pela suinocultura *versus* seu potencial de uso após tratamento adequado por ser uma fonte rica de carga orgânica com aplicabilidade na própria região da granja produtora.

Com base em experimentos realizados pela EMBRAPA Suínos e Aves (2019), os efluentes do biodigestor, chamados de digestato, podem ser tratados por métodos físicos e químicos para remoção de N, P e partículas em suspensão, sendo aplicado de maneira modular de acordo com as necessidades da granja, ou seja, módulo BIO + módulo N + módulo P, pelo sistema denominado Sistema de Tratamento de Dejetos Suínos (SISTRATES®). Nesse sistema, o lodo e os nutrientes se sedimentam através dos vários tanques projetados e podem ser aplicados na agricultura, a água pode ser reutilizada na própria localidade para fins não nobres como limpeza dos chiqueiros e irrigação das lavouras, inclusive, ser descartada no corpo hídrico local.

De acordo com Jarvie (2018), a biomassa é composta de material orgânico C, N e O, que alimentam o processo de DA. Os microrganismos utilizam esses compostos orgânicos como substrato para crescimento e reprodução se combinam com H₂O para formar CO₂ e CH₄. A conversão desse material orgânico em metano não é feita por um único microrganismo único, mas por vários, ocorrendo em estágios complementares.

3.2 Processos de tratamento de dejetos com biodigestores

De acordo com López-Pacheco (2021), ainda se dá pouca atenção aos tratamentos dos dejetos animais, que muitas das vezes ainda são tratados em sistemas simples como lagoas de estabilização ou apenas despejadas no meio ambiente sem tratamento prévio, sendo estas águas residuais de suínos uma das principais causas dos processos de eutrofização. Entre os tratamentos possíveis para mitigação deste dano, está o biodigestor, uma opção ambientalmente sustentável que remove compostos como nitrogênio, fósforo e alguns íons metálicos.

Os biodigestores são tecnologias já aplicadas no tratamento de dejetos da suinocultura brasileira, que consiste na deposição do efluente proveniente das granjas de animais confinados e visa a manter este volume retido em um ambiente anaeróbico, auxiliando sua estabilização e decomposição, para ser degradado bioquimicamente

através de reações naturais das arqueobactérias, e após certo tempo de detenção, obtém-se uma redução da carga orgânica do efluente. Em paralelo a isso, ainda são obtidos o biogás e o fertilizante resultante do processo.

Uma das tecnologias mais difundidas e indicadas para o tratamento dos dejetos da atividade suinícola é a utilização de biodigestores, que se destacam por serem tecnologias anaeróbicas já reconhecidas como de grande importância entre os suinocultores devido ao baixo custo e à produção de biogás rico em metano, que vem sendo utilizado para gerar eletricidade e calor em granjas de suínos (Cheng et al., 2018).

A tecnologia de DA tem se mostrado uma técnica promissora devido à sua eficiência na redução do volume de resíduos ao produzir energia na forma de biogás e digerido como biofertilizante (Chiumenti et al., 2019).

De acordo com Amaral (2017), é crescente o foco em aplicação de sistemas com biodigestores e conseqüentemente em usinas de biogás, pois contribuem com a geração de energia elétrica e reduzem as concentrações orgânicas dos efluentes, citando ainda que é de grande importância mensurar o potencial bioquímico do metano dos efluentes da atividade suinícola de forma segura, indicando as produções de metano nas diferentes etapas da produção animal.

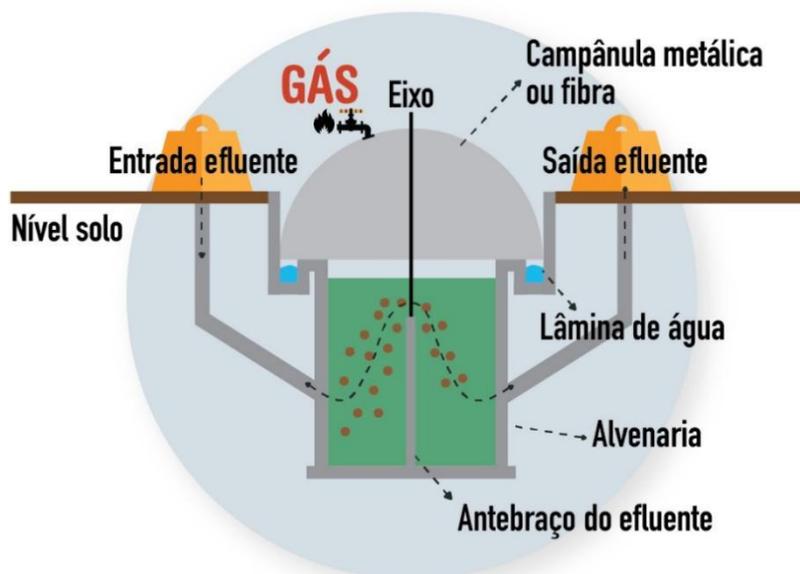
A melhoria contínua do processo de tratamento de dejetos e de monitoramento das variáveis orgânicas que ocorre no processo é fundamental para o correto tratamento via digestão anaeróbia.

De acordo com Cândido et al. (2022), a aplicação do conceito de economia circular que utiliza os ciclos da própria natureza para preservar materiais e nutrientes e ainda dispor de energia para uso na própria granja de suínos foi desenvolvida e validada, mostrando como é possível integrar estes processos.

3.2.1 Biodigestor Indiano

Considerado o mais popular do mundo pela grande população, o biodigestor indiano, Figura 3, tem sua construção baseada em uma campânula, de fibra ou metal, imersa em selo de água ou sobre o próprio dejetos. De construção simples e ocupando pequenas áreas, ele tem longa vida útil.

Figura 3. Representação do biodigestor Indiano

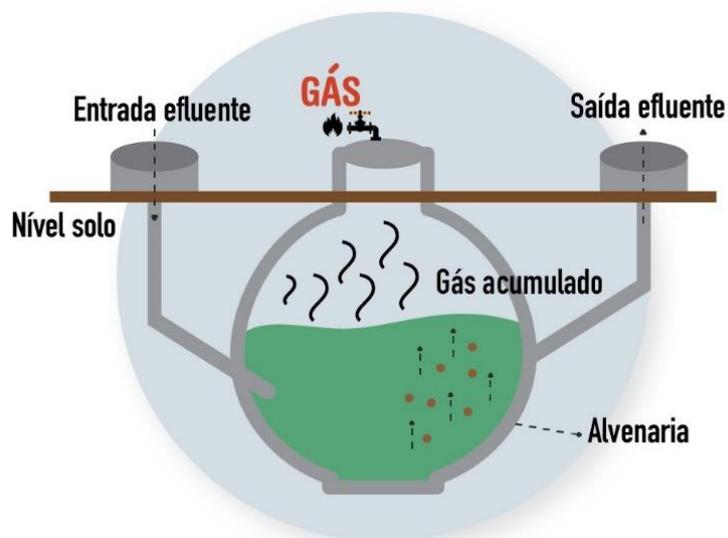


Fonte: O autor

3.2.2 Biodigestor Chinês

O biodigestor chinês, Figura 4, não tem campânula instalada, é robusto e de formato circular, e a pressão hidráulica exercida pelo dejetos leva o biogás para a saída do reator. É robusto e, como o biodigestor indiano, ocupa pequenas áreas e atende a usos em pequenas propriedades.

Figura 4. Representação do biodigestor chinês

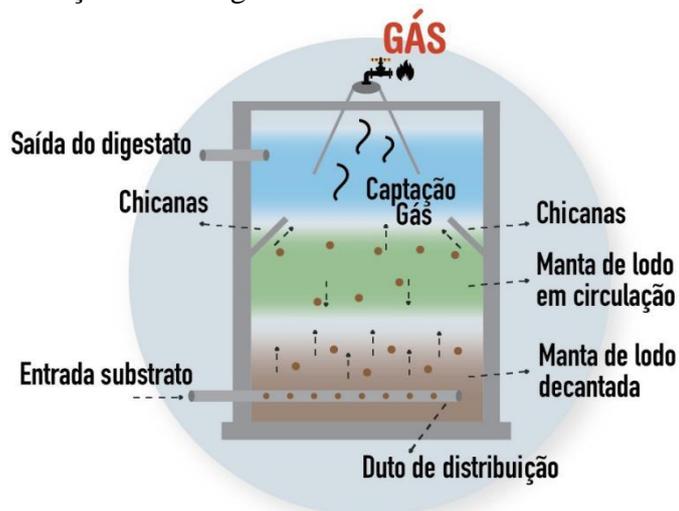


Fonte: O autor

3.2.3 Biodigestor (UASB)

O modelo UASB (do inglês- *upflow anaerobic sludge blanket*) consiste em estruturas metálicas, cuja alimentação é junto à parte inferior do reator, que, ao passar pela manta de lodo decantada existente no seu fundo, cria um ciclo de suspensão e recirculação constante do digestato. Chicanas promovem a separação das bolhas de gás e a direcionam para fora do sistema, como representado na Figura 5.

Figura 5. Representação do biodigestor UASB

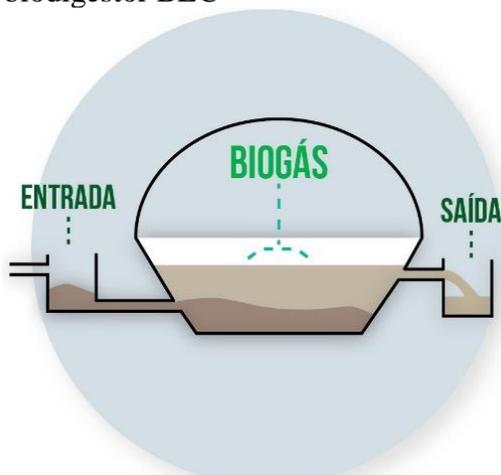


Fonte: O autor

3.2.4 Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC)

O biodigestor de lagoa coberta (BLC), Figura 6, é composto por escavação na terra, de forma trapezoidal, sendo revestido ao fundo com membrana de PVC e na parte superior fechado com PVC ou polietileno de alta densidade (PEAD). Muito difundido na região onde há granjas instaladas.

Figura 6. Representação do biodigestor BLC

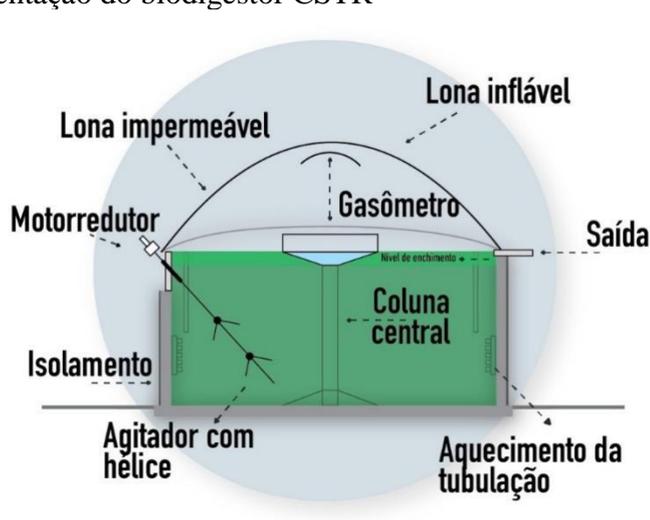


Fonte: O autor

3.2.5 Biodigestor Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)

A Figura 7 mostra o esquema de um reator de mistura completa (Biodigestor Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR) muito utilizado na Europa, com formato circular, composto por uma grande variedade de componentes de controle e agitação do substrato.

Figura 7. Representação do biodigestor CSTR



Fonte: O autor

3.3 Tecnologias estudadas na pesquisa

Foram escolhidas duas tecnologias para aprofundamento técnico, que têm plantas em operação na cidade de Rio Verde - Goiás. A literatura até então pesquisada

não apresenta normas técnicas brasileiras específicas para a construção de biodigestores. Apenas a NBR 12.209-2011, Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários, cita recomendações para a elaboração de projeto hidráulico e de processo de estações de tratamento de efluentes (ETE) para esgoto sanitário. FNR (2021) cita que a Alemanha conta com mais de 9.000 plantas de DA com tecnologia de biogás e dispõe de normas para aspectos construtivos, valendo citar as normas (DIN) do alemão -*Deutsches Institut für Normung*, através da DIN 11.622-2:2015-09, que trata de silos e tanques de esterco líquido, e a DIN EN 14.015:2018-08, Dimensionamento e fabricação no local de tanques de aço rasos, acima do solo, verticais, cilíndricos, soldados, destinados ao armazenamento de líquidos na temperatura ambiente e temperaturas mais elevadas.

3.3.1 Biodigestor de mistura completa- CSTR

A primeira tecnologia estudada são os biodigestores denominados de CSTR, também chamados de mistura completa, muito difundidos na Europa e em início de expansão pelo Brasil.

O modelo CSTR, Figura 8, é composto de uma estrutura circular de concreto armado reforçado, com isolamento externo com auxílio de telhas isotérmicas, com altura aproximada de 6 m e diâmetro 30 m. Conta ainda com um sistema de agitação em dois pontos e um sistema de aquecimento do substrato dentro da sua circunferência, através de tubulações de inox, que são controladas e aquecidas pelo reaproveitamento do calor do escapamento/motor do grupo motogerador.

Kunz et al. (2019) citam que o biodigestor CSTR é aplicado quando se dispõe de substratos com alto nível de composição ST, como, por exemplo, substratos com até 10% de ST e TRH de 15 dias.

Segundo Pomberger et al. (2019), o CSTR é um reator com geometria diferenciada que pode operar com uma quantidade muito grande de sólidos totais (ST), 3 a 10%, já que conta com agitação mecânica e aquecimento do substrato.

Tem alto controle das variáveis de modo automatizado, controlando de maneira configurável as variáveis que impactam na biodigestão, incluindo pressão na cúpula, temperatura interna do dejetto, tempo de agitação e intervalos de intermitência.

Figura 8. Biodigestor CSTR em estudo



Fonte: O autor (2021)

3.3.2 Biodigestor Lagoa Coberta - BLC

A segunda tecnologia é o modelo BLC, também conhecido como modelo canadense. Como apresentado na Figura 9, este modelo tem uma base retangular, quando visto de cima, e uma forma trapezoidal, quando visto em corte transversal, assim o perímetro no nível do solo, comprimento + largura, é maior que no nível enterrado. A cúpula ou gasômetro ou ainda a câmara de gás que nada mais é que a parte superior do biodigestor para armazenamento do biogás é composta por manta flexível de PVC ou Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL), que infla ou se retrai conforme a produção do biogás. Essa cúpula pode ser removida periodicamente para manutenção e limpeza do biodigestor. Seu fundo é revestido por uma camada de lona plástica 1,0~1,25 mm, cuidadosamente soldada para evitar vazamentos no solo. Conta com uma viga de baldrame em seu perímetro, que interliga a lona do revestimento do fundo à lona da cúpula, através de chapas de alumínio e chumbador *parabolt*. Sua operação é simplificada, pois sendo abastecido diariamente, ele elimina por gravidade o digestato retido.

CIBIOGÁS (2020) cita que os BLC apresentam menor eficiência, mais robustez no tratamento de resíduos e, com seu baixo custo e baixa complexidade de operação, são viáveis e amplamente empregados em propriedades rurais.

Sua operação é relativamente simples, necessitando atenção apenas às cargas carregadas diariamente, à remoção de lodo e a vazamentos de gás (Thomas et al., 2017).

O abastecimento do biodigestor se dá por gravidade, fazendo com que a alimentação seja intermitente desde que haja liberação das valas da granja. Muitos equipamentos dessa natureza têm dutos de 150~200 mm de PVC, que adentram em diagonal a estrutura junto ao nível do solo indo em direção ao fundo do biodigestor, permitindo uma agitação inicial ou recirculação forçada do dejetos. Tubulações de PVC

perfuradas são instaladas entre o solo e a lona para conduzir eventuais vazamentos de biogás para o lado externo no biodigestor.

De acordo com Figura 9, o gás é conduzido por dutos de PVC de 100 a 200 mm de diâmetro conectados por mangas que saem do BLC até o abrigo do gerador.

Kunz et al. (2019) citam que, no caso deste tipo de biodigestor BLC, apesar da baixa recuperação de biogás, sua utilização é bastante comum na suinocultura brasileira, devido ao baixo custo de manutenção e à facilidades de operação. Kunz et al. (2019) citam ainda que um ponto negativo deste biodigestor se relaciona à sua vida de operação, em média de 5 anos, requerendo após esse período sua abertura para remoção do lodo do fundo e consequentes reparos nas lonas.

O processo do BLC é comparado com o de fluxo tubulado (do inglês - *plug flow*), que, quando tem matéria alimentada constante e controlada, pode fornecer ótimos resultados de biodigestão, com menor custo de mão de obra, de investimento inicial e de automação (Liu, 2017).

Figura 9. Biodigestor BLC em estudo



(a) saída do biogás



(b) chegada do biogás

Fonte: Acervo do Autor

3.3.3 Descrição sucinta dos dois sistemas de biodigestores abordados

A Tabela 1 permite uma comparação sucinta de cada tecnologia abordada no estudo, apresentando suas principais características.

Tabela 1. Descrição resumida dos sistemas de biodigestores abordados

Detalhes/tecnologia	CSTR	BLC
Nível Tecnológico	- Maior tecnologia envolvida, demanda mais expertise no processo e acompanhamento dedicado;	- Com baixo nível tecnológico, são mais baratos e de pouca manutenção;
Agitador	- Ocorre de imediato e de forma permanente entre o dejetos que adentra e o já existente. Conta com sistema de agitação embarcado;	- Geralmente não há agitação/mistura do substrato novo o qual já está no interior do BLC; - Pode demandar separador de sólidos na entrada, evitando seu rápido assoreamento;
Separador de sólidos	- Geralmente não aplicado,	- Separador com grelhas ou telas auxiliam na retenção de objetos não desejáveis ao processo de DA;
Sistema de aquecimento	- Contam com sistema de aquecimento do dejetos - O afluente entra no CSTR após permanecer no pulmão misturador e já permanece com agitação controlada;	- Raramente contam com sistema de aquecimento interno; - O afluente é recebido por uma caixa de entrada e canalizado para o fundo do biodigestor que segue o fluxo como se fosse o leito de um rio, por isso chamado fluxo tubular.
Operabilidade	- Contam com vários sensores de controle e medição de variáveis - Tem característica de seção circular, que facilita o sistema de agitação e aquecimento e as medições de variáveis do dejetos;	- Extremamente raro encontrar algum tipo de controle e medição - Tem dimensões físicas com seção em forma de trapézio retangular e ocupa grandes áreas, fica escavado no solo, protegido ao fundo por camada de lona de pvc, recoberta com geomembrana de PVC 0,8mm ou ainda PEBDL de 1,25mm;
Dimensões e características físicas	- Ocupa menor área na propriedade,	- Não conta com apoio interno, somente cintas externas para evitar inflar acima da sua elasticidade; - Grande área quadrada de exposição ao sol; Cor branca.
Cúpula	- Apoiada por cintas unidas na estrutura central e que pode ser adaptada com tela de malha de polipropileno, que auxilia na retenção do H ₂ S, Cor verde. - Menor área exposta ao sol	- O TRH gira em torno de 30 dias; - Indicado para ST de até 3%;
TRH-Tempo retenção hidráulica ST- Sólidos totais	- O TRH varia entre 15 e 20 dias; - ST acima de até 15%	- Em épocas de chuva, o acúmulo de águas sobre a cúpula causa grande transtorno para sua retirada, pois se mantida, o gás não consegue inflar a cúpula;
Chuvas	- A cúpula tem um apoio mecânico interno que não deixa o excesso de águas de chuva abaixá-la;	

Fonte: O Autor.

3.4 Digestato e biodigestão anaeróbia

O processo de DA ocorre na ausência de oxigênio de forma natural, seja no trato digestivo dos animais ruminantes como em ambientes anaeróbicos, onde os microrganismos presentes no biodigestor consomem os nutrientes do substrato, usando-os para seu crescimento e reprodução. Em geral, a DA é a quebra natural da matéria

orgânica desempenhada por dois grupos de microrganismos: bactéria e arquea (Kunz et al., 2019).

De acordo Jarvie (2018), o processo de DA é utilizado no tratamento de efluentes típicos de águas residuais, onde os resíduos orgânicos são digeridos anaerobicamente, reduzindo o volume dos resíduos sólidos e produzindo metano, que cada vez mais é visto pelas usinas municipais como um subproduto benéfico do processamento e que pode ser usado no próprio local do biodigestor.

3.4.1 A importância dos nutrientes no digestato

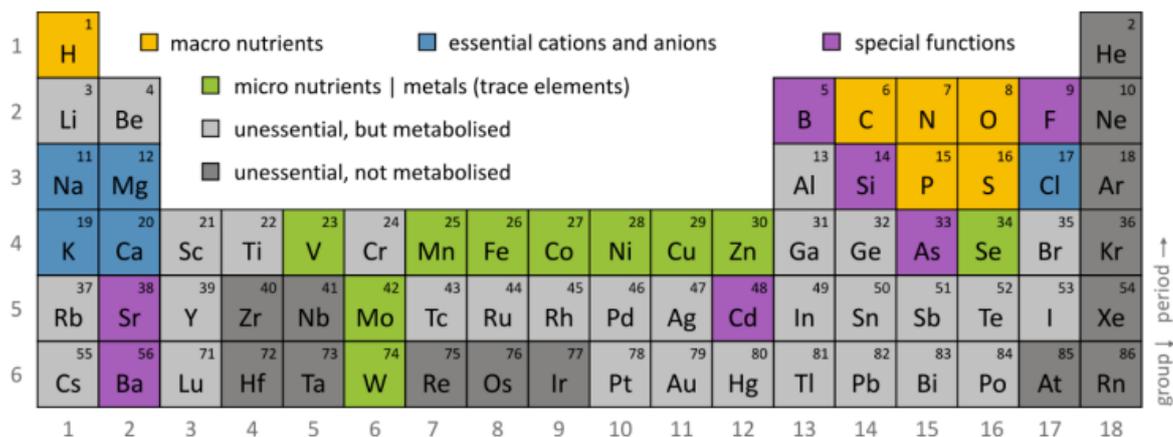
São muitos os elementos nutritivos requeridos para uma decomposição microbiana: N, P e S são classificados como macronutrientes e Fe, Ni, Co, Se, Mo e W, como micronutrientes (CIBIOGÁS, 2020).

Conforme Demirel & Scherer (2011) e Vintiloiu et al. (2012), citados por Weinrich & Nelles (2021), a concentração e a biodisponibilidade dos nutrientes necessários também têm uma grande influência no comportamento da degradação de bactérias e archaeas envolvidas. A falta de nutrientes geralmente leva a um crescimento microbiano reduzido, baixas taxas de biogás e altas concentrações de ácido e é, portanto, entre outros fatores, a principal razão para o processo inibido e instável da biodigestão. Substratos com alto teor de água e com carga orgânica definida podem ser usados eficientemente através dos vários processos de conversão bioquímica para fornecer combustíveis líquidos ou gasosos (Weinrich & Nelles, 2021).

Assim, de acordo com Scherer et al. (2009) e Zinder & Koch (1984), citados por Weinrich & Nelles (2021), a adição de co-substratos contendo nutrientes ou oligoelementos suplementares é recomendada para garantir uma concentração equilibrada de nutrientes individuais para garantir condições de processo estáveis.

Na Figura 10, Weinrich & Nelles (2021) destacam na tabela periódica os elementos essenciais para a biodigestão.

Figura 10. Classificação dos nutrientes essenciais da tabela periódica



Fonte: Weinrich e Nelles (2021).

Os compostos de C presentes nos materiais orgânicos são usados como fonte de energia. Já o N é considerado necessário para o metabolismo dos microrganismos. Uma relação C/N adequada deve ser sempre observada, pois o processo de DA é sensível a esta relação. Várias citações na literatura mostram que a razão C/N ideal para o crescimento bacteriano deve estar na faixa compreendida entre 20 e 35 (Mao et al., 2015) e uma relação C/N muito elevada (mais C do que N) diminui a atividade metabólica, mas o contrário gera excesso de amônia, o que pode até cessar o processo de biodigestão.

Segundo Chen (2011), os microrganismos anaeróbios consomem energia em seu processo, sendo o carbono a fonte necessária para tal reação. Já o nitrogênio desempenha papel importante no aumento da população microbiana. Com isso, ele ressalta que a relação C/N indica o nitrogênio amoniacal total (NAT) liberado, o acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) dentro do digestor e o nível de nutrientes de uma matéria-prima.

As células dos microrganismos anaeróbios contêm nitrogênio, fósforo e enxofre nas proporções aproximadas de 12, 2 e 1%, respectivamente, de matéria seca. Para o processo anaeróbio, é necessária uma relação de 700:5:1 de demanda biológica de O₂, N e P, respectivamente. Os íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato são necessários para o bom funcionamento da digestão anaeróbia. Elementos

traços como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio são importantes para o crescimento celular (Kunz et al., 2019).

Existem poucos estudos investigando a distribuição ótima de macronutrientes em substratos. No entanto, os resultados isolados desses estudos podem diferir amplamente. Em geral, de acordo com Scherer (2011), uma proporção equilibrada de nutrientes pode ser adotada aproximadamente como C:N:P:S = 3000:50:3:1 e segundo Weiland (2010) 600:15:5:1.

De acordo com Kunz et al. (2019), o metabolismo dos microrganismos anaeróbios mesofílicos é dependente de diversos fatores, com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados (Tabela 2).

Verifica-se ainda que os macro e micronutrientes presentes no digestato e suas relações necessárias para o bom desempenho, variam em função da etapa de biodigestão.

Tabela 2. Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura (°C)	25 - 35	32 - 42
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10-45	20-30
Concentração de matéria seca (%)	<40	<30
Potencial Redox (mV)	+ 400 até - 300	<-200
Relação de C:N:P:S necessária	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: Adaptado de Wellinger et al. (2013), citado por Kunz et al. (2019).

3.4.2 Caracterização dos nutrientes do digestato

Os nutrientes contidos no volume do substrato, que, após adentrar o biodigestor, recebem o nome de digestato, são fundamentais para a criação e reprodução das bactérias. A Tabela 3 aponta os principais elementos e suas concentrações ideais para a biodigestão.

Tabela 3. Concentração de micronutrientes essenciais durante a DA

Micronutriente essencial	Concentração ótima (mg.L ⁻¹)
Bário (Ba)	0,05
Ferro (Fe)	0,2
Cálcio (Ca)	0,03
Cobalto (Co)	0,005
Magnésio (Mg)	0,02
Molibdênio (Mo)	0,05
Níquel (Ni)	0,01

Fonte: Adaptado de JØrgensen (2009), por Matiello (2017).

O Quadro 1 apresenta um resumo dos parâmetros nutricionais e sua função na biodigestão.

Quadro 1. Principais parâmetros dos nutrientes e sua função na biodigestão

Parâmetro	MACRONUTRIENTES	Referências
Nitrogênio total (N)	- Aumento da população microbiana, - No que tange ao Nitrogênio, quando a poluição é recente, ele se apresenta na forma de nitrogênio orgânico ou amônia. Quando a poluição é antiga, o nitrogênio se converterá na forma de Nitrato, - A amônia inibe a operação normal das bactérias.	Chen (2011), Panigrahi e Dubey (2019)
Fósforo (P)	- Necessário nas transformações metabólicas de energia nas células dos monogástricos. Um dos mais caros componentes da nutrição de animais.	Taverbari (2016)
Potássio (K)	- Necessário para o bom funcionamento da DA;	Kunz et al. (2019)
Carbono (C)	- Fonte de energia para os microrganismos anaeróbios que promovem a degradação do substrato. A relação C/N auxilia na percepção de amônia e nos ácidos voláteis e impacta na relação entre C/N.	Chen (2011)
Parâmetro	MICRONUTRIENTES elementos traços*	Referências
Cl (Cloro)	- Para o bom funcionamento da (DA), importante ânion inorgânico	Gottschalk, citado por DBFZ (2021)
Cobre (Cu)	- Promotor de crescimento	Vivan (2010)
Ferro (Fe)	- Transporte de elétrons e função de determinadas enzimas	Kunz et al. (2019)
Manganês (Mn)	- Importantes para o crescimento celular.	Kunz (2019)
Magnésio (Mg)	- Importante para o crescimento celular e para o bom funcionamento da (DA)	Kunz (2019)
Molibdênio (Mo)	- Elementos traço essenciais para a metanogênese	Kunz et al. (2019)
Cobalto (Co)	- Elementos traço essenciais para a metanogênese	Abdoun (2009)
Níquel (Ni)	- Elementos traço essenciais para a metanogênese	Kunz et al. (2019)
Selênio (S)	- Elementos traço essenciais para a metanogênese	Abdoun (2009)
Zinco (Zn)	- Colabora para o controle da diarreia dos animais	Vivan (2010)

* Elementos traço: Assim chamados pela baixa concentração

Fonte: O Autor

3.5 Fases metabólicas de processo da biodigestão

A degradação da matéria orgânica dos substratos é uma reação bastante complexa, pois envolve uma série de microrganismos, operando em sinergia dentro dos reatores, cada qual com diferentes funções em cada etapa. O digestato contém uma série de nutrientes que estavam presentes nos substratos, incluindo nitrogênio, fósforo, potássio e outros minerais, que podem ser aproveitados como biofertilizantes na agricultura, dependendo de suas concentrações. Cada tipo de microrganismo requer condições ambientais específicas como temperatura, pH, tempo, concentração de matéria orgânica e presença de nutrientes. Os compostos químicos produzidos em uma etapa são chamados de metabólitos intermediários, sendo aproveitados como substrato pelos microrganismos da etapa posterior. A reciclagem de nutrientes é mais uma das vantagens da DA (CIBIOGÁS, 2020).

O processo de DA envolve quatro grupos de bactérias responsáveis pela degradação da matéria orgânica, no entanto, o processo de conversão do substrato complexo em biogás é uma função da relação simbiótica que ocorre entre os microrganismos, que incluem bactérias fermentativas, acetogênicos sintróficos, homoacetógenos, metanógenos hidrogenotróficos e metanógenos acetoclásticos (Xiaoye et al., 2019).

De acordo com Haosagul et al. (2019), as águas residuais das granjas de suínos contêm alto volume de Carga Orgânica Volumétrica (COV) e alto teor de sólidos suspensos, que são adequados para a produção de biogás. Citam ainda que as condições anaeróbicas auxiliam na degradação biológica da matéria orgânica, produzindo o biogás, o qual é produzido pelas bactérias formadoras de ácido e pelas bactérias produtoras de metano, presentes em uma série de estágios metabólicos.

São diversas as variáveis que influenciam no digestato durante o processo de produção do biogás e, conseqüentemente, no desempenho dos biodigestores, isto porque, devido à complexa cadeia de reações que ocorrem na DA, os processos ficam mais fáceis de serem compreendidas com base na Figura 11.

As fases do processo de biodigestão são citadas em diversos estudos e compreendem quatro etapas.

- Hidrólise

A hidrólise é a primeira etapa da DA e serve para iniciar o processo, atuando na transformação de polímeros orgânicos, tornando-os componentes menores de açúcares, ácidos graxos e aminoácidos, preparando o digestato para a próxima etapa com as bactérias acidogênicas.

- Acidogênese

De acordo com a PROBIGÁS (2015), os materiais hidrolisados na fase acima permitem às bactérias liberar enzimas, convertendo carboidratos complexos em monômeros e açúcares e proteínas em aminoácidos e gorduras que, depois de sua emulsificação, se transformam em ácidos graxos voláteis. Em paralelo a isso, as mesmas bactérias atuam na fermentação, que, durante a acidogênese dos produtos obtidos, formam moléculas menores.

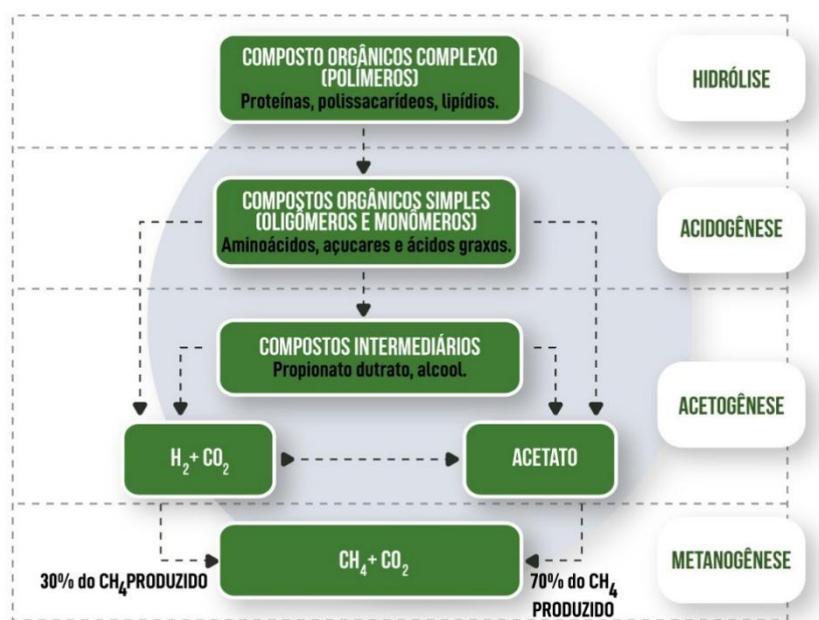
- Acetogênese

Certa parte das partículas do substrato já foi convertida em acetato, mas há outra parte de partículas, de ácidos orgânicos voláteis, que precisam estar acessíveis à metanogênese. As bactérias acetogênicas consomem H_2 e CO_2 para produzir acetato.

- Metanogênese

Na fase final da DA, ocorre a metanogênese, quando as arqueas anaeróbicas utilizam o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano (Weinrich e Nelles, 2021). O substrato nesta etapa já está acessível para ser consumido por microrganismos metanogênicos, consequentemente produzindo metano (Meegoda et al., 2018).

Figura 11. Sequência metabólica e grupos microbianos na DA



Fonte: Adaptado de Fuess (2017), tendo como referência MacCarty e Smith (1986).

3.6 Características e análise do digestato

É de fundamental importância acompanhar as características físico-químicas dos componentes nutricionais do digestato em atividade em um biodigestor. Esta análise auxilia na detecção da energia disponível para o crescimento e reprodução dos microrganismos. Já a análise do biogás colabora para identificar as condições das reações ocorridas no meio em biodigestão.

A ausência de medição dos parâmetros pode causar atraso, perda parcial ou até o comprometimento total da biodigestão. Assim, é fundamental a análise do digestato de forma periódica para compreender o desempenho do biodigestor.

3.6.1 Definição e importância das análises do digestato

Os substratos orgânicos podem melhorar a composição, e seu teor de micro e macronutrientes auxilia na definição da relação ideal e real do C/N, facilitando os ajustes necessários para evitar as substâncias inibitórias (Chen et al., 2019).

O desempenho ideal da DA e a otimização da obtenção do metano dependem das condições de vários parâmetros para seu funcionamento, incluindo temperatura,

pH, tamanho de partículas, relação C/N, carga orgânica e TRH (Sidique & Wahid, 2018).

A grande variabilidade dos teores de nutrientes encontrados no digestato torna imprescindível a análise laboratorial para caracterização do fertilizante (Nicoloso et al., 2016).

3.6.1.1 Influência do DBO e DQO

A poluição orgânica da água originada da suinocultura causa um rápido crescimento de microrganismos, resultando numa elevada demanda bioquímica de oxigênio, com isso, reduzindo a quantidade de oxigênio disponível para a manutenção da vida aquática. De acordo com Arezi (2020), o dejetos suíno é rico em material orgânico, nitrogênio, fósforo e potássio, portanto, uma excelente fonte para produção de biogás e biofertilizante. Atualmente o dejetos é mantido armazenado em lagoa de estabilização (LE) ou BLC por um período de detenção suficiente para sua estabilização em relação à diminuição da carga orgânica. A digestão anaeróbia pode favorecer este processo com um período menor, diminuindo a DBO e a DQO, promovendo a formação do biogás, que é uma fonte de energia renovável, que pode ser utilizada nas propriedades rurais como uma fonte de energia térmica, por exemplo.

3.6.1.2 Influência do pH

As alterações de pH durante a DA influenciam nas fases de formação do biogás, devendo ser respeitada uma faixa ideal que não comprometa tal processo. Segundo Panigrahi & Dubey (2019), é necessário controlar as variáveis que afetam o processo da biodigestão, entre elas o pH.

Cada grupo de microrganismo tem um valor adequado de pH ótimo para sua subsistência. As arqueas metanogênicas são extremamente sensíveis ao pH, com um valor ótimo entre 6,7 e 7,5. Os microrganismos fermentativos são menos sensíveis e podem se adaptar a maiores variações de pH entre 4,0 e 8,5 (Kunz et al., 2019).

Cada grupo de microrganismo tem um valor diferente de pH ótimo. As arqueas metanogênicas são extremamente sensíveis ao pH, com um valor ótimo entre 6,7 e 7,5. Em baixos valores de pH, os principais produtos são os ácidos acético e butírico,

enquanto pH próximo a 8,0 resulta na produção dos ácidos acético e propiônico. Os ácidos voláteis produzidos durante a biodigestão tendem a reduzir o pH do meio reacional. Essa redução é normalmente combatida pela atividade das arqueas metanogênicas, que também produzem alcalinidade na forma de dióxido de carbono, amônia e bicarbonato (Kunz et al., 2009).

3.6.1.3 Temperatura

Um dos principais parâmetros a serem controlados é a temperatura, que tem efeitos importantes na formação das comunidades microbianas (Pap et al., 2015).

Esta importante variável para a DA deve se manter na faixa entre 10 e 60°C dentro de um biodigestor em operação, já que cada etapa da DA tem sua temperatura de trabalho (Silva, 2016).

De acordo com Kunz et al. (2019), a temperatura tem efeitos importantes nas propriedades físico-químicas de componentes encontrados nos substratos anaeróbios. Também influencia a velocidade de crescimento e o metabolismo dos microrganismos e, com isso, a dinâmica populacional em um biodigestor. Os microrganismos podem ser classificados de acordo com a temperatura (Tabela 4).

Tabela 4. Classificação dos microrganismos de acordo com a temperatura

Biometanização ou DA	Temperatura ótima de crescimento (° C)
Termofílicos	60
Mesofílicos	37
Psicrofílicos	15

Fonte: Adaptado de Kunz *et al.* (2019).

De acordo com Silva (2016), para que as arqueas metanogênicas se desenvolvam de forma mais regular e constante, elas devem estar expostas a uma faixa de temperatura compreendida entre 10 e 60 °C. Os microrganismos responsáveis pela digestão podem ser divididos em três grupos ou categorias, de acordo com sua faixa de temperatura ideal de atuação: psicrófila (< 20 °C), mesofílica (20~45 °C) e termofílica (> 45 °C).

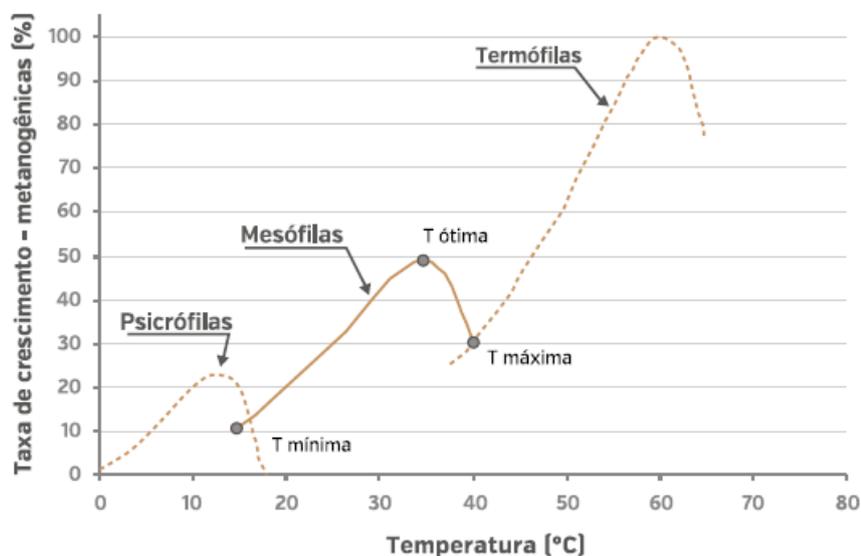
De acordo com Kunz et al. (2019), as arqueas metanogênicas acetoclásticas são os microrganismos mais sensíveis ao aumento de temperatura, já que elas exercem um efeito na pressão parcial de hidrogênio no biodigestor, influenciando a cinética do metabolismo.

Termodinamicamente, observa-se que as reações endotérmicas (em condições padrão), como a quebra do propionato em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio, se tornam energeticamente mais favoráveis em altas temperaturas, entretanto, quando as reações são exotérmicas, como, por exemplo, as metanogênicas hidrogenotróficas, são menos favorecidas em altas temperaturas (Kunz et al., 2019).

De acordo com Kunz & Saqib (2016), um aumento de temperatura proporciona vários benefícios, incluindo aumento na solubilidade de compostos orgânicos, agilizando as reações bioquímicas. Além disso, proporcionam ainda um aumento na taxa de eliminação de patógenos, sem esquecer que a temperatura influencia também em parâmetros como a dissociação da amônia, podendo ter um efeito inibitório para DA.

A Figura 12 mostra, de forma melhorada, as temperaturas ótimas de cada fase metanogênica.

Figura 12. Temperaturas ideais para a DA



Fonte: PROBIOGÁS (2015), adaptado de Chernicharo (1997).

De acordo com Khan et al. (2016), a temperatura tem grande influência na velocidade metabólica e no crescimento de microrganismos, melhorando a produção de biogás e reduzindo a população de patógenos.

3.6.1.4 Influência do tempo de retenção hidráulica TRH

O TRH consiste no tempo médio em dias que o substrato permanece no interior do biodigestor, podendo ser determinado pela razão entre o volume total armazenado no biodigestor (m^3) e a vazão de alimentação em ($m^3 \cdot h^{-1}$).

Nos casos estudados, temos os tempos teóricos determinados considerando um consumo de 8 litros de água por animal dia, pois não há medição de consumo diário de água exclusivo para cada núcleo.

$V_{\text{volume CSTR}} = 3.200 m^3$ e $Vazão = (24.000 \text{ suínos} \times 8 \text{ litros.dia}^{-1})$, o que equivale:

$$TRH_{\text{CSTR}} = 17 \text{ dias} * e,$$

$V_{\text{volume BLC}} = (600 m^3 \times 5 \text{ bios}) = 3.000 m^3$ e $Vazão = (12.000 \text{ suínos} \times 8 \text{ litros.dia}^{-1})$, o que equivale:

$$TRH_{\text{BLC}} = 31,2 \text{ dias.}$$

Caso ocorra maior uso de água no processo, o TRH cai consideravelmente. * Na granja com CSTR, após o segundo mês do acompanhamento, cobriu-se uma LE, tornando esta um BLC em série para melhorar a DA, pois foi observado que a produção de CH_4 não era satisfatória.

Segundo Lorimor et al. (2006), citados por Bosco et al. (2016), a tecnologia cujo tempo de detenção hidráulica normalmente é de 15 a 20 dias promove a estabilização dos dejetos, reduz sólidos voláteis e gera metano e dióxido de carbono, geralmente na proporção de 60 a 70 % e de 30 a 40 %, respectivamente.

De acordo com Panigrahi & Dubey (2019), há dois tipos significativos de tempo de retenção, o TRH, que é o tempo teórico médio que a partícula de água depende para circular da entrada à saída do biodigestor, e não menos importante o tempo de retenção de sólidos TRS, que é a média do tempo que as bactérias passam no interior do biodigestor.

3.7 Aspectos bioquímicos do biogás

O biogás produzido através de digestão anaeróbia é um processo natural em que bactérias anaeróbias atacam as estruturas da matéria orgânica para se alimentarem e quebram as cadeias de polímeros compostos, reduzindo-os a compostos simples. que,

no decorrer da digestão, resultam principalmente na formação de CH_4 , CO_2 , H_2S e O_2 . O biogás bruto tipicamente contém cerca de 65% de CH_4 e 35% de CO_2 (Wickham et al., 2018).

3.7.1 Caracterização do Biogás

Pode-se resumir que o biogás é resultante da decomposição de matéria orgânica que, após ser consumido por bactérias, pode ser usado como fonte de combustível.

As concentrações típicas dos gases contidos no biogás são citadas em diversas pesquisas já realizadas e informam um intervalo de concentração percentual dos principais componentes do biogás, servindo de base para novos estudos.

De acordo com Angelidaki et al. (2018), o biogás é conhecido como resultante da DA e consiste basicamente de CH_4 numa faixa entre 50 e 70% e de CO_2 numa faixa entre 30 e 50%. As proporções obtidas dependem principalmente da natureza do substrato utilizado no reator.

3.7.2 Influência dos componentes do biogás

Os principais componentes do biogás devem ser medidos e analisados periodicamente, pois não há como comprovar sua qualidade somente pelo volume do biodigestor. O CO_2 , o H_2S e a NH_3 são substâncias que, em concentrações elevadas, interferem negativamente na qualidade do biogás, valendo citar as características básicas particulares de cada um.

De acordo com Li et al. (2018), o CH_4 é fator determinante para o sucesso de uma geração a combustão, de forma que baixos teores impedem que os motores operem adequadamente, reforçando, assim, a necessidade de monitoramento periódico da composição do biogás. A produção de metano é considerada o indicador mais intuitivo que pode refletir a eficiência da utilização de orgânicos durante a DA.

Já o H_2S , é um elemento com altas concentrações corrosivas, sendo fundamental seu controle para a correta produção dos equipamentos de geração a biogás. Sob condições anaeróbicas, compostos orgânicos contendo enxofre e sulfato são

reduzidos a sulfeto, liberado no biogás na forma de H_2S , gás incolor que exala cheiro desagradável.

O CO_2 , formado na fase de hidrólise/acidogênese e na metanogênica, é uma substância não combustível que diminui o poder calorífico do biogás.

O O_2 é usado como referência para sistemas de dessulfurização, o qual, quando injetado na forma de ar atmosférico (O_2+N_2) e com doses controladas de 3% a 6% em volume da quantidade de biogás liberado, não prejudica as arqueas metanogênicas, sendo sua função oxidar o enxofre presente no ácido sulfídrico, convertendo-o em enxofre elementar (CIBIOGÁS, 2020).

Fricke et al. (2007) afirmam que se a amônia (NH_3) permanece na concentração de até 1.000 mg.L^{-1} , auxiliando na estabilização do pH. Fricke et al. (2007) citam ainda que se a NH_3 ficar na faixa de 30 a 100 mg.L^{-1} (sob $pH < 7$ e temperatura $< 30\text{ }^\circ\text{C}$) há inibição da metanogênese.

São inúmeras as fontes que citam os percentuais contidos no biogás, sendo tais parâmetros apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Composição teórica do biogás

Composto	Símbolo químico	Conteúdo (Vol.%)
Metano	CH_4	50 - 75
Dióxido de carbono	CO_2	25 - 45
Vapor d'água	H_2O	2 ($20\text{ }^\circ\text{C}$) – 7 ($40\text{ }^\circ\text{C}$)
Oxigênio	O_2	<2
Nitrogênio	N_2	<2
Amônia	NH_3	<1
Hidrogênio	H_2	<1
Sulfeto de hidrogênio	H_2S	<1

Fonte: Adaptado de Al Seadi et al. (2008).

3.8 Aproveitamento de energia elétrica

O biogás normalmente tem índice calorífero baixo em comparação com os combustíveis fósseis, mas isso não impede que seja utilizado em grupos geradores adaptados para tal combustível. A concentração de CH_4 , CO_2 e H_2S deve ser monitorada e controlada para obter uma melhor qualidade e um melhor resultado de queima em motores de combustão (CIBIOGÁS, 2020).

Vale lembrar que a vantagem principal sobre os combustíveis fósseis é que, além de se tratar de uma energia renovável disponível dentro da propriedade, auxilia na

descentralização de geração no sistema integrado brasileiro. A Figura 13 apresenta o motogerador a biogás de 330 kVA com efetivos 210 kW, instalado na granja B.

Os motores de combustão acoplados a geradores elétricos, chamados motores geradores, podem ser utilizados por propriedades rurais e agroindústrias, com disponibilidade de biomassa residual e biogás para a geração distribuída de energia elétrica (Souza, 2016).

3.8.1 Produção de energia elétrica com suínos de terminação

De acordo com Santos et al. (2018), a atividade da suinocultura apresenta grande potencial de geração de energia, decorrente das elevadas cargas orgânicas de seus efluentes, viabilizando plantas de tratamento e geração.

Figura 13. Gerador a biogás da Granja B



Fonte: Acervo do Autor

3.8.2 Dispositivos auxiliares de tratamento do biogás para produção de energia elétrica

Como acessórios auxiliares para um eficaz tratamento de biodigestão, citam-se na literatura os agitadores mecânicos, os filtros de purificação, entre eles o de carvão ativado ou de resfriamento do gás, e os trocadores de calor.

3.8.2.1 Agitação

Aplicada no interior do biodigestor, a agitação visa a uma mistura homogênea do substrato, que pode ocorrer de forma mecânica, hidráulica ou pneumática, permitindo o permanente contato entre as bactérias presentes no interior do digestor, evitando regiões sem atividade biológica. São utilizadas como meios de agitação bombas externas de recirculação, bombas parafuso internas de recirculação e injeção/recirculação de biogás ou dejetos.

CIBIOGÁS (2020) cita que o mecanismo ideal para o revolvimento é determinado em função do substrato utilizado, pressupondo, assim, que cada unidade deve predefinir o modelo e os parâmetros de funcionamento do agitador.

De acordo com Kunz et al. (2019), a recirculação de efluente por agitação acoplada aos reatores pode ser categorizada como agitação mecânica, hidráulica e pneumática, sendo que a última utiliza o próprio biogás do reator para recircular em forma de borbulhamento.

A utilização desse recurso implica o ganho de 15 a 30% na produtividade de biogás, uma vez que aumenta a distribuição de substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor (CIBIOGÁS, 2020).

3.8.2.2 Sistemas de filtragem do biogás

O biogás obtido nos biodigestores, antes de ser consumido na queima pela cogeração, deve passar por uma unidade de remoção de H_2S e ainda por um secador, permitindo maior durabilidade aos componentes mecânicos dos equipamentos utilizados (Mainier et al., 2007).

Segundo Amaral (2019), o biogás é um composto gasoso que, além de seus principais componentes, os gases CH_4 e CO_2 , também tem gases contaminantes como H_2S e ainda o vapor de água (H_2O), os quais, quando combinados, formam um vapor sulfuroso, que é danoso às partes internas do motogerador e às turbinas e instalações metálicas circundantes ao biodigestor, assim a remoção de umidade também é essencial ao bom desempenho da geração.

3.8.2.3 Filtros de purificação do biogás (adsorção e secagem)

Os modelos existentes no caso estudado são de resfriamento do biogás (absorção) e de filtro de carvão ativado (adsorção), ficando ambos em série na linha do biogás antes de ser injetado na admissão do grupo motogerador. A “limpeza do biogás” se dá pela remoção de compostos indesejáveis para a utilização, como H_2S , Siloxanos, CO_2 e NH_3 , sendo apenas H_2S o principal alvo de muitas plantas atuais de biogás (Angelidaki et al., 2018).

3.8.2.3.1 Filtro por adsorção com carvão ativado

De acordo com Mattiello (2017), pode-se verificar a eficiência do uso do filtro de adsorção com carvão ativado contribuindo para a redução do H_2S e do CO_2 .

O processo de dessulfurização, com adsorção por carvão ativado, auxilia na remoção do H_2S e pode ser utilizado em escala comercial até uma carga máxima de aproximadamente 500 ppm no gás bruto, sendo mais usado como um filtro em série para limpeza fina (PROBIOGÁS, 2015). A Figura 14 mostra o filtro mencionado, empregado na granja A.

Figura 14. Filtro com carvão ativado – CSTR



Fonte: O Autor

Usualmente, diferentes tipos de carvão ativado são utilizados como material adsorvente. Esses materiais adsorvem o CO_2 e o H_2S do biogás, enriquecendo-o consequentemente com CH_4 (Borschiver & Silva, 2014).

PROBIOGÁS (2015) cita que a remoção de siloxanos do biogás é uma exigência relativamente nova e que poucos estudos já foram realizados neste campo até o momento, mas que o carvão ativado, entre outros materiais, já auxilia neste quesito.

3.8.2.3.2 Filtro de secagem por condensação

De acordo com PROBIOGÁS (2015), o processo de secagem se dá por resfriamento do gás, baseado na condensação da umidade, que ocorre pelo resfriamento do biogás abaixo do ponto de orvalho e posterior retirada do condensado do sistema.

A secagem é obtida pela redução de temperatura do biogás, que resulta na retirada de sua umidade (PROBIOGÁS, 2015). A Figura 15 mostra o filtro de secagem empregado na granja A.

Figura 15. Filtro de secagem por condensação em uso no CSTR



(a) Filtro retenção de umidade



(b) Vista da resfriadora

Fonte: O autor

3.8.2.3.3 Filtro por adsorção a limalha de ferro

Além dos sistemas já citados, outro tratamento utilizado em plantas de pequeno porte da região, adaptado do filtro de esponja de ferro utilizado nos Estados Unidos, é feito pela adsorção do H_2S com óxidos e hidróxidos de ferro, devido ao baixo custo e à simplicidade construtiva. Neste processo, o sulfeto de hidrogênio reage facilmente com o óxido de ferro, formando sulfetos de ferro. No entanto, este sistema, que é muito

antigo, é de rápida saturação e baixa eficiência. Cita-se ainda que na prática a limalha de ferro é consumida rapidamente, usando 100g de óxido de ferro para remoção de aproximadamente 20g de H_2S (PROBIOGÁS, 2010). A Figura 16 (a) mostra a estrutura do filtro “simplificado” encontrado na região, composto por colunas de PVC, que são preenchidas de limalha de ferro, por onde o biogás é direcionado antes de entrar no motor a combustão, e a Figura 16 (b) mostra o filtro mais robusto, que é utilizado em plantas dos Estados Unidos.

Figura 16. Filtro para redução de H_2S



(a) Filtro comumente utilizado junto aos BLC da região para redução de H_2S



(b) Filtro adotado nos Estados Unidos

(c) Fonte: Gooch, Pronto e Labatut (2011)

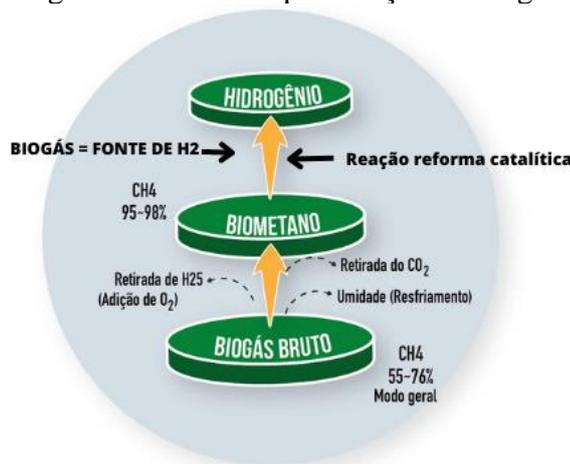
Fonte: Acervo do Autor

Fica evidente que, dependendo da finalidade do biogás de cada instalação produtora, ele pode ser melhorado com técnicas já disponíveis no mercado, deixando-o mais “puro” para sua devida aplicação.

López-Pacheco et al. (2021) citam que o dejetos suíno ainda tem outros tipos de contaminantes, que, muitas das vezes, não recebem a atenção devida do produtor, podendo ser destacados os antibióticos e hormônios oriundos dos cuidados veterinários dos animais. Estes contaminantes, quando direcionados ao biodigestor, podem impactar negativamente na produção de biogás.

A Figura 17 apresenta sucintamente as etapas de purificação até a reforma do biogás, visando a melhorar sua aplicabilidade e rendimento.

Figura 17. Fluxo de purificação do biogás



Fonte: Adaptado de PROBIOGÁS (2015)

3.8.2.4 Aquecimento do digestato

Entre as formas mais conhecidas para aquecimento do digestato, está o uso de serpentinas no interior do biodigestor, alimentadas por água proveniente do trocador de calor instalado no escapamento do grupo gerador ou pelo seu radiador, se tornando um dispositivo de troca constante de fluido aquecido que recircula no sistema. A Figura 18 apresenta o sistema do CSTR estudado.

O aquecimento interno pode ser através da circulação de água em trocador de calor, porém monitorando a temperatura para que a água não ultrapasse 54,4 °C, o que prediz a formação de incrustações do conteúdo do digestor na tubulação (Benincasa et al., 1991).

Já Maradini (2021) cita que os resultados obtidos das trocas térmicas atestaram que a radiação solar é a fonte primária de aquecimento dos reatores anaeróbios BLC e que a elevada inércia térmica do solo contribui com a pequena variação da temperatura da biomassa ao longo do dia, mesmo no cenário com o efluente aquecido. Maradini (2021) cita ainda que mesmo para os cenários com ou sem aquecimento do dejetos, as trocas térmicas que ocorrem entre o ambiente externo e o biogás e entre o biogás e a biomassa apresentaram as mesmas relações, com diferenças apenas entre os períodos quente e frio.

Figura 18. Sistema de aquecimento do CSTR



Fonte: O Autor

3.8.2.5 Sistema de agitação do digestato

3.8.2.5.1 Agitação mecânica para CSTR

Conforme já citado, o constante contato das bactérias com o substrato pela agitação do material contido no biodigestor é essencial na DA. Em casos como o CSTR estudado, indicado na Figura 19, pode-se ver o agitador instalado no perímetro do biodigestor, ficando as pás submersas no substrato.

Figura 19. Agitadores incorporados ao CSTR



(a) em detalhe

(b) acoplado no biodigestor CSTR

Fonte: O autor (2021).

3.8.2.5.2 Agitação mecânica para o BLC

Apesar de ainda ser pouquíssimo utilizado na região para o caso do BLC, o sistema de circulação pode ser instalado através de dutos de PVC ou inox, que são deixados como “esperas” com tampa cega, e quando programados e temporizados, ocorre a movimentação mecânica do substrato no interior do biodigestor. Na Figura 20, são apresentados os agitadores dos modelos, bombas de recirculação e de hélice, que ficam instalados externamente e conectados via mangueiras corrugadas que adentram transversalmente o biodigestor. Na Figura 21, pode-se ver o agitador existente no BLC em série do CSTR, inserido no decorrer da pesquisa.

Figura 20. Tipos de agitadores adotados em biodigestores



(a) Recirculação



(b) Hélice

Fonte: (20 A) <https://www.netzsch.com.br>, (20B) Autor 2022

Figura 21. Detalhe dos agitadores BLC* em série ao CSTR



(a) vista lateral



(b) vista topo

*Agitador do BLC em série do CSTR

Fonte: O Autor (2021).

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOGÁS. **O Potencial Brasileiro de Biogás** – NOTA TÉCNICA 2020. Disponível em <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/> . Acesso em 02 de fevereiro de 2021.
- ABDOUN, E., WEILAND, P.: **Optimierung der Monovergärung von Nachwachsenden Rohstoffen durch die Zugabe von Spurenelementen**. In: Wie viel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss Symposium des Biogas Crops Network (BCN). Potsdam, Germany, 2009.
- ABPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. Reporte anual, 2020 disponível em : <https://abpa-br.org/mercados>. Acesso em 13 de agosto de 2021.
- ANGELIDAKI, I, TREU, L., TSAPEKOS, P., LUO, G., CAMPANARO, S., Wenzel, H., KOUGIAS, P. G.; **Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives, Biotechnology Advances**, Volume 36, Issue 2, 2018, Pages 452-466,
- AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas Handbook**. Universidade do Sul da Dinamarca Esbjerg, Dinamarca, 2008
- AMARAL, A. C. do., **Digestão anaeróbia de dejetos suíno: potencial bioquímico de metano e a influência de estratégias operacionais**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR. Jul. 2014, 2017. Tese de Doutorado
- AMARAL, A. C. do., **Desenvolvimento e avaliação de um filtro para remoção de umidade do biogás**. Medianeira: UTFPr, 2019. Trabalho de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás
- ATV **Technologische Beurteilungskriterien zur anaeroben Abwasserbehandlung (Technological appraisal factors for anaerobic wastewater treatment)**, 2. Arbeitsbericht des Fachausschusses 7.5, Korresp.Abw. 40 2, 217–223 (1993).
- ATV (**Practical guidelines and references for anaerobic treatment plants**). KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 49 (12), 1708–1714 (2002).
- BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.F.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores convencionais**. Jaboticabal, FUNEP, 25p. (1991).
- BORSCHIVER, S.; SILVA, A.L.R.; **Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais**. Florianópolis, SC. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA – COBEQ, 20, (2014), Anais.
- BOSCO, T. C. D.; COSMANN, N. J.; SBIZZARO, M.; TAIATELE JUNIOR, I.; SILVA, J. dos S, **Caracterização de águas residuárias de suinocultura provenientes de dois sistemas de tratamento**. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, v. 8, n. 3, p. 111-120, Set. (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v8n32016864>.

CALZA, L. F., DE LIMA, C. B., NOGUEIRA, C. E. C., SIQUEIRA, J. A. C., & SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, 2015.

CÂNDIDO, D., BOLSAN, A.C., HOLLAS, C.E., VENTURIN, B., TÁPPARO, D. C., BONASSA G. ANTES.F.G., STEINMETZ, R.L.R., BORTOLI, M., KUNZ, A., **Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept**, Journal of Environmental Management, Volume 301, (2022), 113825, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113825>.

CHEN, L., **The Composting Process**. Desenvolvida pela University of Idaho Extension (2011). Disponível em: <<https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1179.pdf>>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

CHEN, Y., ZHU, R., JIANG, Q., SUN, T., LI, M., SHI, J., CHAI, H., GU, L. AI, H., HE, Q., **Effects of green waste participation on the co-digestion of residual sludge and kitchen waste: A preliminary study**. Science of The Total Environment, Volume 671, 2019, Pages 838-849, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.339>

CHEN, Y. R. **Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications**. Agricultural Wastes, 8(2), 65–81 (1983). doi:10.1016/0141-4607(83)90105-1.

CHENG, D.L. , NGO, H.H. , GUO, W.S. , LIU, Y.W. , ZHOU, J.L., CHANG, S.W. , NGUYEN, D.D. , BUI, X.T. , ZHANG X.B. **Bioprocessing for elimination antibiotics and hormones from swine wastewater** Sci. Total Environ., 621 (2018), pp. 1664-1682, 10.1016/j.scitotenv.2017.10.059

CHENG, D.L; WEI, D.; (2018). **Problematic effects of antibiotics on anaerobic treatment of swine wastewater**. Bioresource technology 263:642-653.

CHERNICHARO, C.A.L., **Desenvolvimento de um respirômetro automatizado para avaliação da atividade microbiana anaeróbia**. Revista de Engenharia Sanitária, v. 2, n. 3-4, p. 120-126, (1997).

CHIUMENTI, A.; PEZZUOLO, A.; BOSCARO, D.; DA BORSO, F. **Exploitation of mowed grass from green areas by means of anaerobic digestion: Effects of grass conservation methods (drying and ensiling) on biogas and biomethane yield**. Energies 2019, 12, 3244.

CIBIOGÁS, EDWIGES, T.; MULLER, R.; MARTINEZ, D.G.; **Fundamentos da digestão anaeróbica de substratos agroindustriais**, 2020 <https://cibiogas.eadplataforma.com/> Acesso em 07 de maio de 2022.

COELHO, S. T. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 218p. 2018.

COLATTO, L.; LANGER, M. **Biodigestor: resíduo sólido pecuário para produção de energia**. UNOESC & Ciência – ACET, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119-128, jul./dez.

2011. Curso de Engenharia Bioenergética da Universidade do Oeste de Santa Catarina – Campus Xanxerê, SC.

DEMIREL, B. and SCHERER, P. **Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane**. Biomass and Bioenergy. Vol. 35, No. 3, 992–998. (2011):

EMBRAPA Suínos e Aves, 2020. **Sistrates Sistema de Tratamento de dejetos suínos**, Autores: KUNZ et al.2019, Folder 2p 2019. Concórdia Sc/Acesso em 16jul 2022 <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/900897/sistrate-suinocultura-com-sustentabilidade-ambiental-e-geracao-de-renda>.

FUESS, L.T., **Biodigestão anaeróbia termofílica de vinhaça em sistemas combinados do tipo acidogênico-metanogênico para potencialização da recuperação de bioenergia em biorrefinarias de cana-de-açúcar de primeira geração**. - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. doi:10.11606/T.18.2017.tde-13042017-145118. (2017). Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Acesso em em 3 de março de 2021.

FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: **Basisdaten Bioenergie** Deutschland 2021. FNR, Gülzow, 2021. Acesso em 27 de agosto de 2022. Acesso Internet: www.fnr.de.

FRICKE, Klaus et al. **Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW**. Waste management, v. 27, n. 1, p. 30-43, 2007.

GOOCH, C.A., PRONTO, J. LABATUT, R., **Evaluation of Seven On-Farm Anaerobic Digestion Systems Based on the ASERTTI Monitoring Protocol: Consolidated Report and Findings**. NYSERDA PROJECT NO. 6597 (2011).

HAOSAGUL S., PROMMEENATE. P., HOBBS. G, PISUTPAISAL. N., **Sulfide-oxidizing bacteria community in full scale bioscrubber treating H₂S in biogas from swine anaerobic digester**, Renewable Energy (2019), doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.139>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sidra: **Sistema de Tabelas Estatísticas**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/29163-ppm-2019-apos-dois-anos-de-queda-rebanho-bovino-cresce-0-4> Acesso em 23 de dezembro de 2021.

JARVIE, Michelle E.. **"Anaerobic digestion"**. Encyclopedia Britannica, 28 Sep. 2018, <https://www.britannica.com/science/anaerobic-digestion>. Acesso em 06 de março de 2021.

JØRGENSEN, P. J. **Biogas– Green energy**. PlanEnergi and Researcher for a Day. Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University. 2009. 36 p.

KHAN, M. A., NGO, H. H., GUO, W. S., LIU, Y., NGHIEM, L. D., HAI, F.I., DENG, L. J., WANG, J., WU, Y., **Optimization of process parameters for production of volatile fatty acid, biohydrogen and methane from anaerobic digestion**. Bioresource Technology, v. 219, p. 738–748, (2016).

KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., RAMME, M. A., COLDEBELLA, A., **Effect of storage time on swine manure solid separation efficiency by screening**. *Bioresource Technology*, v.100, n.5 p.1815-1818, (2009).

KUNZ, A., **Produção de biogás em uma Unidade Produtora de Desmame (UPD)**: Anais do III Anusis, realizado em Chapecó - SC, 01 a 03 de setembro de 2015.

KUNZ, A., SAQIB., M **Hydrophobic membrane technology for ammonia extraction from wastewaters**. *Engenharia Agrícola*, v. 36, p. 377-386, (2016).

KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. do., **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, (2019). p. 41-68. DOI: https://dx.doi.org/10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01_3. Acesso em 03 de março de 2021 <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108617>

Li, H., Si, D., Liu, C., Feng, K., Liu, C., **Performance of direct anaerobic digestion of dewatered sludge in long-term operation**. *Bioresour. Technol.* 250 (2018), 355–364. <http://210.45.242.12:8000/rwt/SCIENCEDIRECT/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.biortech.2017.11.075>.

LIU, Shijie. Chapter 5 - **Ideal Flow Reactors**, Editor(s): Shijie Liu, *Bioprocess Engineering (Second Edition)*, Elsevier, (2017), Pages 179-257, ISBN 9780444637833, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63783-3.00005-8>.

LOPES, C.R.M., **Impactos ambientais da agroindústria de suínos no sudoeste de Goiás: modelo para o alcance da sustentabilidade da atividade**. (2014). 179 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

LÓPEZ-PACHECO, I.Y., SILVA-NÚÑEZ, A., GARCIA-PEREZ, J.S., CARRILLO-NIEVES, D., SALINAS-SALAZAR, C., CASTILLO-ZACARIAS, C., AFEWERKI, S., BARCELÓ, D., IQBAL, H.N.M., PARRA-SALDIVAR, R., 2021. **Phyco-remediation of swine wastewater as a sustainable model based on circular economy**. *J. Environ. Manag.* 278 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111534>.

LORIMOR, J.; FULHAGE, C.; ZHANG, R.; FUNK, T.; SHEFFIELD, R.; SHEPPARD, D. C.; NEWTON, G.L. **Manure Management Strategies and Technologies**. In: RICE, J. M.; CALDWELL, D. F.; HUMENIK, F.J. (Eds). **Animal agriculture and the environment: National Center for Manure & Animal waste management. USA: American Society of Agriculture and Biological Engineers**, 2006. p. 409-434.

MAINIER, F. B.; SANDRES, G. C; TAVARES, S. S. M. **Corrosão por sulfeto de hidrogênio (H₂S) e suas implicações no meio ambiente e na segurança industrial**. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco

MARADINI, P. da Silva., **Implicações do aquecimento de efluentes de suinocultura na eficiência energética e termodinâmica em biodigestores modelo lagoa coberta**. UFV, Viçosa, 2021.97p. Dissertação de Mestrado

MARIANI, L., **Biogás: Diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. (2018) Tese Doutorado.

MATIELLO, S., **Avaliação da eficiência de um filtro de adsorção com carvão ativado na purificação de biogás proveniente da fração orgânica dos resíduos urbanos**. UNIR, Porto Velho, 2017.75p. Dissertação Mestrado

MATTIOLI, A., GATTI, G.B., MATTUZZI, G.P., CECCHI, F., BOLZONELLA, D. 2017. **Co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste and sludge improves the energy balance of wastewater treatment plants: Rovereto case study**. *Renewable Energy*, 113, 980- 988.

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., Ren, G., **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45:540-555. (2015) doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>

MC CARTY, P.L., SMITH, D.P. **Anaerobic Wastewater Treatment**. *Environ. (1986) Sci Technol*,20,1200-1026.

MEEGODA, Jay et al., **A Review of The Processes, Parameters, And Optimization of Anaerobic Digestion**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [s.l.], v. 15, n. 10, p.2224-2239, 11 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15102224>.

NICOLOSO, R. da S.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; CERETTA, C. A.; SPAGNOLO, E.; CASSOL, P. C.; COMIN, J. J.; BRUNETTO, G. **Adubos e adubação orgânica. In: Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016a. p. 317-328. (2016).

OLIVEIRA, L. A de. **O sistema aquífero Guarani no Estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs**. 2009. UNB, Brasília, 2009. 189p. Tese Doutorado

OLIVEIRA, P. A. V. de., HIGARASHI. M. M., **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: EMBRAPA Suínos e Aves, 2006. 42p.; 29cm (Documentos/Embrapa Suínos e Aves, ISSN 0101-6245; 115).

PANIGRAHI S, DUBEY BK (2019) **A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste**. *Renewable Energy* 143:779-797. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>

PAP, B.; GYORKEI, A.; BOBOESCU, I. Z.; NAGY, I. K.; BÍRÓ, T.; KONDOROSI, É.; MARÓTI, G. **Temperature-dependent transformation of biogas-producing microbial communities' points to the increased importance of hydrogenotrophic methanogenesis under thermophilic operation**. *Bioresource Technology*, v. 177, p. 375-380, 2015.

PASINI, F.; PASSINI, A. F. C.; PIOVEZAN, A. A.; CORREA e SILVA, D.; MACHADO, G. A. **Viabilidade de implantação de um biodigestor em uma granja de suínos.** *Holos Environment*, v. 19, n. 1, p. 60-69, 2019.

PEREIRA, R. H.; BRAGA, S. L.; BRAGA, C. V. M.; FREIRE, L. G. M. **Geração distribuída de energia elétrica – aplicação de motores bicompostível diesel/gás natural.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador. Anais. Salvador: ABPG, 6p.

POMBERGER, A., MO, Y., NANDIWALE, K.Y., SCHULTZ, V.L., DUVADIE,R., ROBINSON, R. I., ALTINOGLU, E.I., JENSEN,K.F., :**A Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR) Cascade for Handling Solid-Containing Photochemical Reactions** *Organic Process Research & Development* 2019 23 (12), 2699-2706 DOI: 10.1021/acs.oprd.9b00378

PROBIOGÁS **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto** / PROBIOGÁS Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 183 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto; 1).

RENEWABLE ENERGY WORLD - Acesso em 28 de agosto de 2022. <http://www.renewableenergyworld.com>

ROS, C. O.; SILVA, V. R.; SILVESTRIN, T. B., SILVA, R. F., PESSOTTO, P. P. (2017). Disponibilidade de nutrientes e acidez do solo após aplicações sucessivas de água residuária de suinocultura. *Revista Brasileira de Tecnologia Agropecuária*, v. 1, n. 1, p. 35-44, 2017.

SANTOS, I. F. S; GONÇALVES, A.T.T; BORGES, P.B; BRARROS, R.M; LIMA, R.S. (2018) **Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil.** *Resources, Conservation & Recycling* 136:376–388.

SCHERER, P.: **Wirkungsweise von Spurenelementen in der Biogasversorgungskette.** In: Fachtagung - Spurenelemente in Biogasanlagen: Wirkungsweise, Versorgungswege, Handlungsempfehlungen. Göttingen, Germany, 2011.

SCHERER, P., NEUMANN, DEMIREL, SCHMIDT, O., UNBEHAUEN, M. (2009): **Long term fermentation studies about the nutritional requirements for biogasification of fodder beet silage as mono-substrate.** *Biomass and Bioenergy*. Vol. 33, No. 5, 873–881.

SIDDIQUE, N. I.; WAHID, Z.Ab.; **Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion:** A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 194,2018, Pages 359-371, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.155>.

SILVA, J. E. P. **Avaliação técnica e econômica de um biodigestor de fluxo tubular: estudo de caso do modelo implantado na ETEC “Orlando Quagliato” em Santa Cruz do Rio Pardo,** Botucatu-SP: UNESP, 2016. 58p. Dissertação de Mestrado

SUINOCULTURA INDUSTRIAL (2006). **Estratégias para o manejo dos dejetos líquidos de suínos.** NICOLOSO,R.D., HIGARASHI, M.M., SILVA, M. L. B. DA.,

OLIVEIRA, P. A. V. DE. Disponível em :
 <<https://www.suinoindustria.com.br/imprensa/estrategias-para-o-manejo-dos-dejetos-liquidos-de-suinos/20160805-084539-t803>>. Acesso em 20 de agosto de 2020.

SUNADA, N. da S.; LUCAS JUNIOR, J.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JUNIOR, M. A. P.; SCHWINGEL, A. W.; SCANFERLA, A. F. L. da S. **Co-digestão Anaeróbia de Dejetos suínos, Níveis de Inclusão de Óleo de Descarte e Microrganismos Lipolíticos** – Redução do Impacto Ambiental. Cadernos de Agroecologia, v 9, n 4, Nov 2014.

SOUZA, S. N. M., **Manual de Geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural** - UNIOESTE, 2016

TAVERNARI, F DE C; KUNZ, A. ; STEINMETZ, R. L. R. ; LIMA, G. J. M. M. ; MELLO, P. A. ; DRESSLER, V. L. ; SORDI, C. ; SUZIN, L. ; MANZKE, N. E. . **Fósforo disponível de fosfato extraído de efluentes da suinocultura**. Concórdia: Embrapa, 2016 (Comunicado Técnico).

THOMAS, P.; SOREN, N.; RUMJIT, N. P.; JAMES, J. G.; SARAVANAKUMAR, M. P. **Biomass resources and potential of anaerobic digestion in Indian scenario**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 77, p. 718-730, 2017.

UNESCO, WWAP. 2017 UN **World Water Development Report**, Wastewater: The Untapped Resource.

VINTILOIU, A., LEMMER, A., OECHSNER, H. and JUNGBLUTH, T. (2012): **Mineral substances and macronutrients in the anaerobic conversion of biomass: An impact evaluation**. Engineering in Life Sciences. Vol. 12, No. 3, 287–294.

VIVAN M.; KUNZ, A.; STOLBERG, J.; PERDOMO, C.; TECHIO, V. H. **Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos**. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v.15, n.3, p. 320-325, 2010.

WAKI, M.; YASUDA, T.; FUKUMOTO, Y.; BÉLINE, F.; MAGRÍ, A. **Treatment of swine wastewater in continuous activated sludge systems under different dissolved oxygen conditions: Reactor operation and evaluation using modelling**. Bioresource Technology, v. 250, p. 574-582, 2018. » <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.078>

WEILAND, P. (2010): **Biogas production: Current state and perspectives**. Applied Microbiology and Biotechnology. Vol. 85, No. 4, 849–860.

WEINRICH, S.; NELLES, M. **Basics of Anaerobic Digestion: Biochemical Conversion and Process Modelling**. (DBFZ-Report, 40). Leipzig: DBFZ. (2021). VIII, 9-76 S. ISBN: 978-3-946629-72-6.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. **The biogas handbook: science, production and applications**. Cambridge, UK, 2013. 476 p.

WICKHAM, R., XIE, S., GALWAY, B., BUSTAMANTE, H., NGHIEM, L.D. **Anaerobic digestion of soft drink beverage waste and sewage sludge**. Bioresource Technology., 2018. 262, 141-147.

ZINDER, S.H. and KOCH, M. **Non-aceticlastic methanogenesis from acetate: Acetate oxidation by a thermophilic syntrophic coculture.** Archives of Microbiology. (1984): Vol. 138, No. 3, 263– 272.

5 CAPÍTULO 1

Comparativo do desempenho de biodigestores, mistura completa CSTR *versus* BLC no sudoeste goiano

Este artigo deverá ser submetido à Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-AGRIAMBI, classificada no Qualis Capes como B1 ENGENHARIAS I

Autor: Moacir Fernando Cordeiro

Resumo: A suinocultura tem se expandido muito no Brasil, o que vem gerando altas descargas orgânicas nas áreas rurais. Estudos comprovam a viabilidade do uso de biodigestores para a degradação da matéria orgânica e para geração de energia. O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento de duas técnicas de digestão anaeróbica existentes em Rio Verde, GO, uma com mistura completa contínua (CSTR) e outra com lagoa coberta (BLC). Amostras semissólidas foram coletadas nos sistemas para verificação da degradação dos nutrientes antes e depois do processo em que foram obtidas reduções para N=29 e 46 (%), P=78 e 71 (%) e K=29 e 31 (%) no CSTR e BLC, respectivamente. Os resultados nutricionais foram obtidos através de análise foliar e os gases através do Alfakit. O estudo mostrou a importância da realização de análises periódicas. O processo de mistura completa adicionou um biodigestor de lagoa coberta em série, tendo, após isto, obtido aumento de 11,7%.V de CH₄. A pesquisa mostrou que o processo da lagoa coberta é eficiente e simples de operar, mas que melhorias como a pré-agitação contribuirão para seu melhor desempenho e viabilidade dos projetos. A injeção de O₂ é fundamental para redução do H₂S, mas, quando não monitorado, pode inibir a produção do biogás.

Palavras-chave: biogás, suinocultura, biodigestão anaeróbica

Comparative of the performance of cstr versus blc biodigesters in southwest Goiás

Abstract: Pig farming has expanded a lot in Brazil and this advance generates high organic discharges in rural areas. Studies prove the feasibility of using biodigesters for the degradation of organic matter and for energy generation. The objective of this work was to analyze the behavior of two existing anaerobic digestion techniques in Rio Verde, GO, one with complete mixing and the other with covered lagoon. Semi-solid samples were collected in the systems to verify the degradation of nutrients before and after the process in which reductions were obtained for N=29 and 46 (%), P=78 and 71 (%) and K=29 and 31 (%) in the CSTR and BLC respectively. Nutritional results were obtained through leaf analysis and gases through Alfakit. The study showed the importance of performing periodic analyses. The complete mixture added a covered lagoon digester in series, where after that, it obtained an increase of 11.7% of CH₄. Research has shown that the covered lagoon is efficient and simple to operate, but that improvements such as pre-agitation will contribute to its better performance and project viability. The injection of O₂ is fundamental for the reduction of H₂S, but when not monitored it can inhibit the production of biogas.

Key words: biogas, swine farming, anaerobic digestion

6 INTRODUÇÃO

Em resposta à necessidade de sistemas de tratamento de dejetos da suinocultura que realmente reduzam os impactos ambientais causados pela alta emissão de carga orgânica deste processo, faz-se necessário o acompanhamento periódico das variáveis resultantes do processo anaeróbico. Segundo Panigrahi & Dubey (2019), é necessário controlar as variáveis que afetam o processo da biodigestão, entre elas o pH. De acordo com Ryue et al. (2020), a falta de monitoramento das características de nutrientes pode afetar severamente as funções diárias das bactérias anaeróbicas e suas reações de biodegradabilidade. Sendo assim, é necessário, para uma operação ideal, manter o equilíbrio dos nutrientes no processo da digestão anaeróbica.

Com o avanço da suinocultura para o centro-oeste do Brasil, houve aumento da concentração de resíduos poluidores no solo e no ar nas zonas rurais. Dados como a fisiologia digestiva dos animais de um determinado lote, sexagem, condições nutricionais do trato e a quantidade de água em excesso podem contribuir para o aumento do potencial poluidor (Vivan et al., 2010).

De acordo com Vilela Júnior et al. (2003) e Blank et al. (2007), a matéria orgânica é uma importante fonte de nutrientes para as plantas, microflora e fauna terrestre, mas na forma como sai das granjas é altamente nociva. PROBIOGAS (2010) cita que, além da concentração dos macronutrientes, os micronutrientes presentes no reator têm seu valor referencial de importância decisiva no processo da digestão anaeróbia.

Quanto à construção de um biodigestor, é fundamental projetar, entre outros fatores, o tempo de retenção hidráulica do dejetos (TRH), pois se este tempo for menor que o tempo de desenvolvimento do ciclo dos microrganismos, ele levará a uma falha do sistema de digestão anaeróbia (Dareioti & Kornaros, 2015).

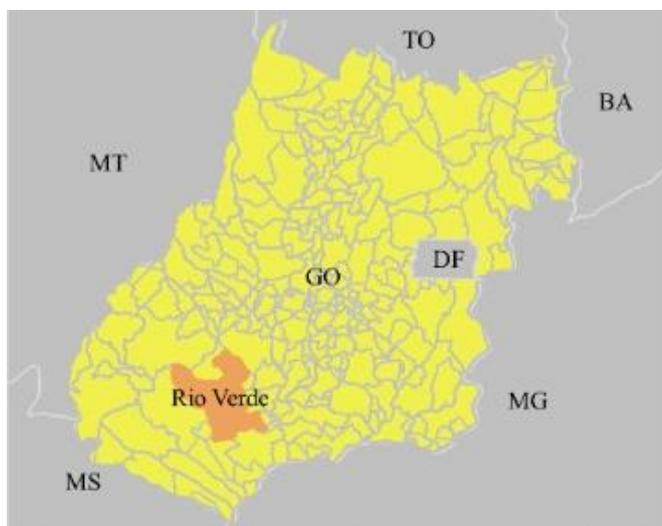
Os estudos de casos comparativos entre sistemas existentes podem auxiliar no aprimoramento da técnica de biodigestão na suinocultura regional, já que dispositivos utilizados em uma tecnologia podem ser adaptados a outra. Destaca-se ainda a importância do monitoramento periódico dos nutrientes contidos no digestato que visa a identificar o balanço de nutrientes na biodigestão ou ainda identificar falhas de operação, incluindo o uso excessivo de água no processo.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar e comparar o desempenho do biodigestor *contínuos stirred tank reactor* (CSTR) *versus* biodigestor de lagoa coberta (BLC) na região de Rio Verde - Go, ambos alimentados com esterco proveniente de cerca de 12.000 suínos cada, em ciclo de terminação, ração seca, onde foram realizadas as análises das concentrações dos macro e micronutrientes do substrato e digestato e ainda monitorados os componentes do biogás produzindo metano (CH_4), ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2), checando se o CSTR apresenta melhor eficiência em relação ao BLC e este em relação à Lagoa de Estabilização (LE).

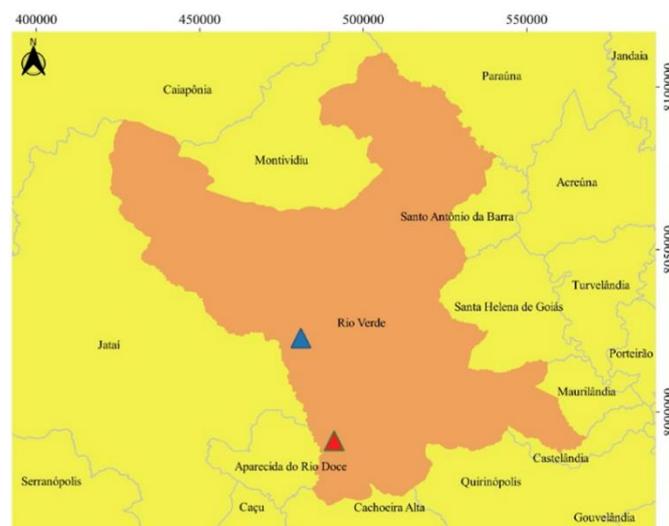
7 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo ocorreu no município de Rio Verde - GO, localizado no Sudoeste Goiano. O clima da região é mesotérmico úmido, com duas estações bem definidas: uma chuvosa, de outubro a abril, e outra seca, de maio a setembro. A temperatura média anual varia entre 20 °C e 25 °C. As propriedades analisadas foram nomeadas como Granja A, utilizando CSTR, e Granja B, utilizando BLC. A Figura 22A e a Figura 22B mostram Rio Verde dentro do estado de Goiás e as granjas destacadas na região do Sudoeste Goiano.

A Mapa de Rio Verde dentro de Goiás



B. Granjas localadas dentro de Rio Verde (B)



Fonte: Autor

Figura 22. Mapas de Rio Verde e localização

Na Figura 23A e na Figura 23B, podem ser vistas as áreas das granjas em estudo e a disposição dos biodigestores, dos grupos motogeradores (GMG) e das lagoas de estabilização (LE) e dos galpões de alojamento de cada planta.

A. CSTR



B. BLC



Fonte: Google Earth

Figura 23. Localização dos equipamentos

No Quadro 2 mostra um resumo das características dos biodigestores estudados.

Quadro 2. Resumo de características dos biodigestores

Parâmetro	Biodigestor Granja A CSTR	Biodigestor Granja B BLC
Localização	17°52'59.2"S, 51°10'48.0"W	18°10'08.4"S, 51°05'00.6"W
Volume do reator (m ³)	3.200	3.000
Área de ocupação (m ²)	800	3.600+ área segurança
Profundidade (m)	5,0 a 6,0	3,5~4,0
Tempo retenção (dias) ^{1,2}	15 a 20	30 a 60
Vazão de dejetos (m ³) estimada ³ para 12.000 suínos SVT	54,0	54,0

^{1,2} Kunz et al. (2019), ³ Embrapa (2018)

As amostras em ambas as granjas foram obtidas em intervalos máximos de 45 dias entre cada amostragem. Os procedimentos de amostragem do DSL e o transporte seguiram as orientações do Comunicado Técnico (CT) 362 da EMBRAPA (2004). As análises foram feitas pelo laboratório de análises físico-químicas Solotech Cerrado, de Rio Verde, credenciado com selo Embrapa, que adota como norma de análise o manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes 2ª edição, da EMBRAPA

SOLOS (2010), capítulo 2, adaptando o uso de 2 mL de dejetos suíno líquido (DSL) ao invés de 500 mg de tecido vegetal, gerando extratos, para que, através de digestão nitroperclórica e com auxílio das técnicas espectrofotométricas UV-VIS, absorção atômica, fotômetro de chama e turbidimetria e destilador de nitrogênio, fossem determinadas as concentrações dos elementos constantes na Tabela 6.

O número de coletas e a metodologia de testes adotada na análise do biogás seguiram a orientação do manual do kit de análise de biogás Alfakit e estão mencionados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros avaliados nas amostragens em cada granja

Parâmetro	n° coletas	Método analítico
NH ₃ (ppmV)*	6	Diferença de volume
H ₂ S (ppmV)*	6	
CH ₄ (%)*	6	Análise colorimétrica
CO ₂ (%)*	6	
Ca/Fe/Ma/Cu/Zn/P/K	6	Foliar Embrapa solos adaptado
pH	6	pHmetro
MS e MO	6	Gravimétrico

Foram feitas 6 coletas de DSL por granja ao longo de 8 meses consecutivos, no período entre 27/10/21 e 22/06/22, e 6 coletas do biogás por granja, que indicaram as componentes CH₄, CO₂, H₂S e NH₃, resultando no final em 24 resultados por granja. A Figura 24 mostra os pontos de coleta das amostras semissólidas junto aos biodigestores: I) entrada do dejetos; II) saída do dejetos; e III) na saída da lagoa de estabilização. As amostras foram identificadas com nome da granja, data, hora, condição do tempo, nome da pessoa que coletou e particularidades da granja na ocasião.

Pontos de coleta das amostras

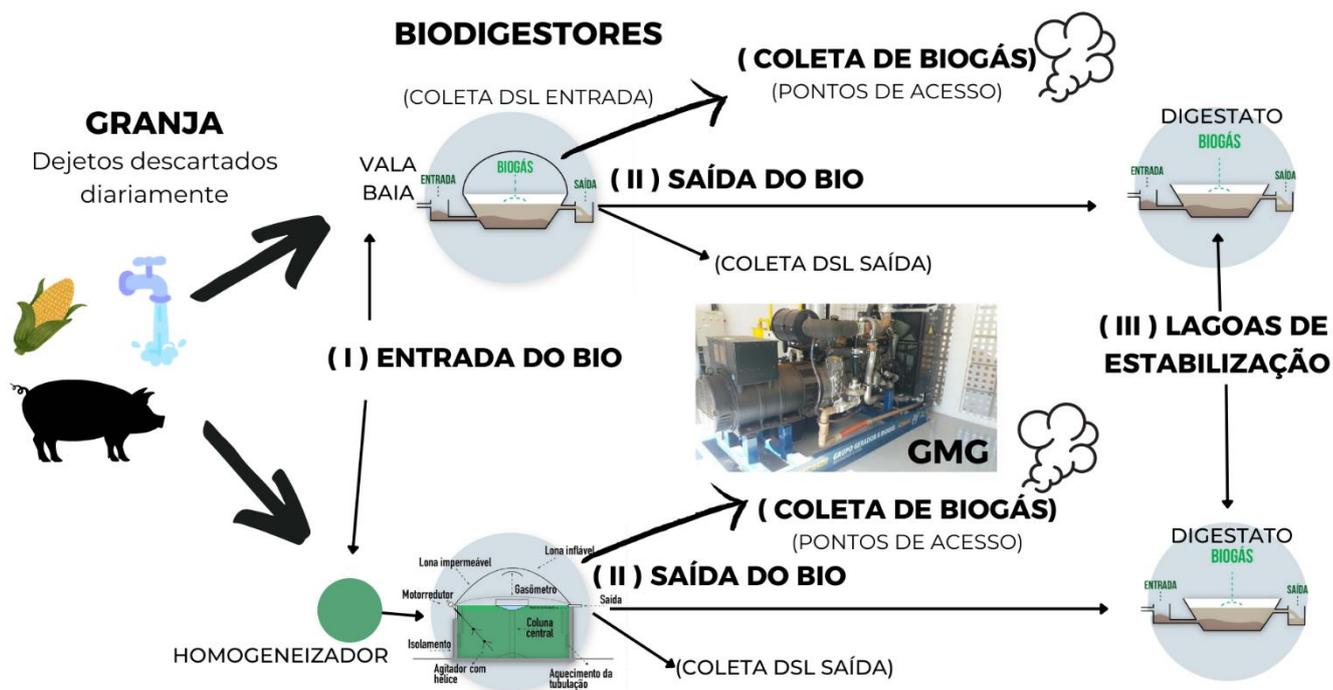


Figura 24. Pontos de coleta das amostras nas plantas de biogás

Nas Figuras 25A e 25B, é mostrado o ponto I, entrada de dejetos em cada biodigestor.

A. : Homogeneizador CSTR



B. Vala BLC



Figura 25. Ponto (I): coleta do dejetos na entrada dos biodigestores

As Figuras 26A e 26B mostram os pontos de coleta do biogás junto aos biodigestores, tendo o biogás ficado armazenado em bag plástico fornecido pelo kit até a conclusão in loco das medições das variáveis.

A. CSTR



B. BLC



Figura 26. Pontos de coleta de biogás:

Os suínos da granja A são compostos por terminação, contendo 10 lotes de variadas idades, sendo o 1º lote tendo 15 dias até o 10º lote tendo 100 dias, com aproximados 52% de machos e 48% de fêmeas. Já na granja B, os lotes entram e saem com aproximados 45 e 120 dias, respectivamente. A composição dos lotes também varia com aproximados 50% de machos e 40% de fêmeas. Ambas as granjas adotam a imunocastração dos machos.

Vale comentar que o procedimento das análises de biogás com auxílio do Alfakit é um teste qualitativo colorimétrico em escalas de valores.

Para determinação do metano disponível e considerando o número absoluto de cabeças, 12.000 suínos (terminação), a EMBRAPA (2018) adota o volume de 0,0045m³ de dejetos por animal.dia-1, tendo como respaldo as fórmulas abaixo:

Produção diária de metano (PrM):

$$PrM = B_0 * SV * Q$$

Em que:

Equação (1)

$B_0 = 0,32 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$ (m³ de metano por kg de SV),

$SV = 35,38 \text{ kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3}$ dejetos (concentração do substrato) e

$Q = 54 \text{ m}^3$ (vazão de dejetos na granja.dia⁻¹)

$$PrM = 0.32 * 35,38 * 54$$

$$PrM = 611,37 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$$

e a

Produção diária de biogás (PrB):

$$PrB = PrM * 1,67$$

Em que:

Equação (2)

* 1,67 é o fator referente ao percentual de metano no biogás (60%)

$$PrB = 1021m3.dia^{-1}$$

A título de comparação com o volume de biogás determinado acima, a granja B conta com um grupo gerador marca ERBR-330 kVA/210 kW, com consumo de 117 m³.h⁻¹ ER-BR (2018), setado para produzir 180 kW.h⁻¹, perfazendo 8,72 horas de produção.dia⁻¹, atingindo uma produção estimada mensal de 47.123 kWh.mês⁻¹. A produção média real desta mesma granja obteve entre maio de 2018 e julho de 2019 a geração de energia real de 51.357 kWh/mês, o que mostra boa proximidade ao cálculo proposto pela Rede BiogásFert/EMBRAPA, 2018).

As análises de NH₃, H₂S e CO₂ e CH₄ tiveram sua solução comparada com a tabela de cores do Alfakit.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As componentes do biogás são mostradas na Tabela 6 e apresentam média, desvio padrão e coeficiente de variabilidade, sendo observado que, segundo a literatura, a concentração de CH₄ nos dois sistemas estudados tem seu valor médio dentro da faixa ideal.

Tabela 7. Concentrações média de gases no biogás

Gás	CSTR			BLC			Literatura
	\bar{X}	S	CV	\bar{X}	S	CV	
NH ₃ (ppmV)*	183	97	0,53	29	31	1,06	>3.000 ^A / >700 ^B
H ₂ S (ppmV)*	427	241	0,56	39	20	0,51	50~2000 ^C
CH ₄ (%)*	60	5	0,08	59	9	0,15	55~76 ^C
CO ₂ (%)*	40	5	0,12	40	9	0,22	18~45 ^C

^AMc Carty (1964); ^BAngelidaki & Ahring (1994); ^CSU & Hong (2020)

* Valores corrigidos para temperatura/pressão de acordo a tabela contida no Alfakit.

Conforme citado na Tabela 7, a NH₃ apresentou valor médio de 183 ppmV para o CSTR e de 29 ppmV no BLC. Na segunda coleta do CSTR, observa-se

aumento de NH_3 acima da média, o que pode ser justificado pela abundância de N em relação ao C no substrato, que pode ser proveniente do tipo do trato dos animais naquele período. É difícil estabelecer limites claros de inibição da NH_3 sobre a DA, dada a especificidade com que cada processo reage à elevação da concentração de amônia/amônio (FNR, 2010).

Os valores obtidos para a amônia estão representados na Figura 27, destacando as duas tecnologias estudadas.

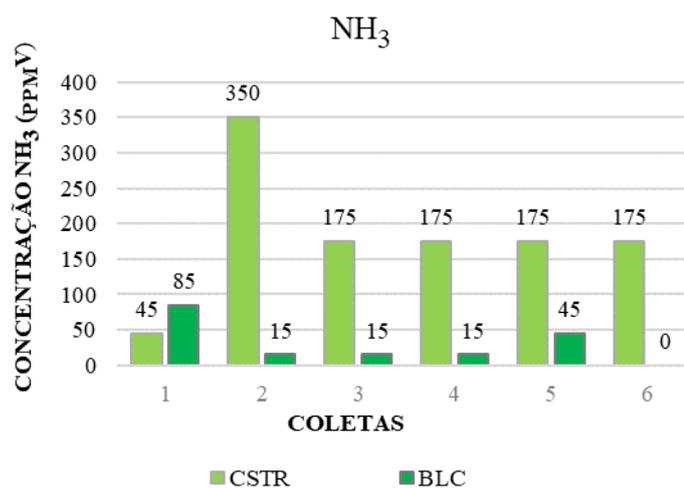


Figura 27. Comparativo de NH_3 no CSTR e BLC

A Figura 28 mostra que ocorreu aumento do ácido sulfídrico no CSTR a partir da 3ª coleta, quando foi dispensada a injeção de O_2+N_2 , tendo em vista que o grupo motogerador não estava em operação por problemas técnicos.

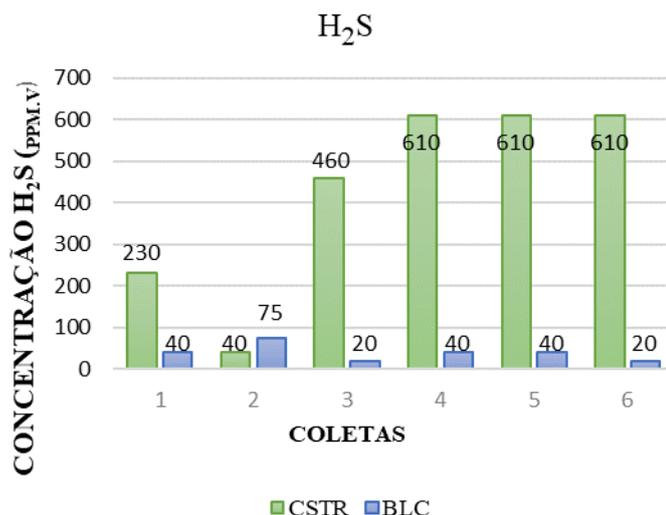


Figura 28. Comparativo H_2S no CSTR e BLC

Os sistemas estudados adotam injeção de ar atmosférico para oxidação do enxofre, presente no H_2S , em enxofre na forma de sulfato, porém não há no local especificação de vazão e período de injeção a serem adotados. CIBIOGÁS (2020) cita que esta técnica é prática e eficiente, porém o BLC não tem monitoramento diário da injeção *versus* leitura de H_2S . De acordo com Ryckebosch et al. (2011), a injeção de O_2 acima de 6% em volume da quantidade de biogás pode tornar o ambiente com risco de explosão e resultar em inibição da produção de CH_4 .

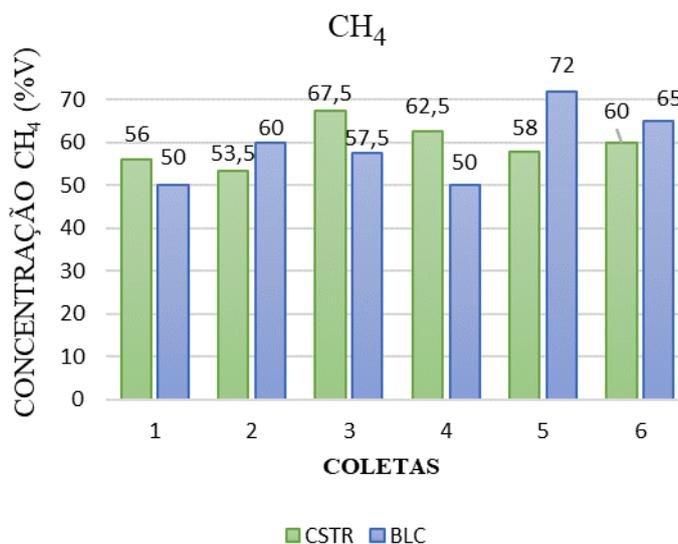


Figura 29. Comparativo CH_4 no CSTR e BLC

Ainda a partir da 3ª coleta, ocorreu a adição de um BLC em série ao CSTR e, para fins de comparação, o biogás passou a ser medido tanto no ponto já determinado do CSTR, como no novo ponto de acesso deste BLC em série, tendo este último se tornado o novo ponto de medição de biogás para o sistema CSTR+BLC. A diferença da concentração de CH₄ apresentou melhoria de 11,7% quando medido neste novo BLC, dando indícios de que antes dessa adição, só estava ocorrendo a 1ª etapa da biodigestão, a hidrólise, ou seja, a remoção do carbono orgânico do ambiente anaeróbio estava baixa e dessa forma a fase metanogênica não ocorre com grande intensidade. De acordo com Weinrich & Nelles (2021), só na fase final da DA é que ocorre a metanogênese, quando as arqueas anaeróbicas utilizam o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano.

De acordo com LI et al. (2014), o CSTR conta com aprimorado controle de parâmetros do processo, que contribuem na degradação e aumento de biogás. Atualmente o CSTR representa cerca de 90% de todos os biodigestores na Europa, segundo Kunz et al. (2019), mas observa-se que eles são de dois ou três estágios de fermentação. Massanet Nicolau et al. (2013) realizaram estudo comparando a DA em reator de um e dois estágios, tendo obtido aumento de aproximadamente 40% na produção no último caso.

Os resultados de amostragem dos pontos I, II e III dos macronutrientes do DSL obtidos nas granjas pesquisadas estão relacionadas na Tabela 8, e ao compararmos estes pontos, a maioria das medições realizadas apresentou eficiência na redução de concentração de nutrientes em razão dos processos físicos e químicos que ocorrem durante a DA.

Tabela 8. Resultados das análises dos macronutrientes de DSL para o CSTR, BLC e LE

Nutri	Ponto/Amostra	Amostras CSTR (g.L ⁻¹)						Amostras BLC (g.L ⁻¹)					
		1	2	3	4 ^A	5	6	1 ^B	2 ^C	3	4	5	6
N _{TK}	(I) Entrada Bio	4,49	7,35	2,77	1,34	6,87	3,44	0,57	2,39	2,20	2,29	1,72	1,43
	(II) Saída Bio	3,53	3,25	ND	ND	ND	ND	1,43	1,53	1,34	2,10	1,81	2,10
	(III) L E	3,72	2,96	1,34	1,81	6,30	3,15	1,62	1,34	0,95	0,86	0,67	1,34
P	(I) Entrada Bio	0,43	1,0	1,0	0,36	4,73	0,60	0,05	0,19	0,12	0,40	0,10	0,04
	(II) Saída Bio	0,39	0,3	ND	ND	ND	ND	0,07	0,16	0,07	0,18	0,08	0,26
	(III) L E	0,08	0,1	0,1	0,84	2,72	0,07	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01	0,03
K	(I) Entrada Bio	1,05	3,9	1,6	1,66	2,14	2,30	0,35	0,85	0,71	0,88	2,04	1,65
	(II) Saída Bio	1,51	2,0	ND	ND	ND	ND	0,56	0,80	0,55	0,75	1,89	1,60
	(III) L E	1,05	1,9	1,5	1,84	2,13	1,94	0,59	0,75	0,49	0,50	1,68	1,50
Ca	(I) Entrada Bio	0,51	1,4	2,0	1,02	3,57	1,16	0,05	0,32	1,11	0,69	0,32	0,62
	(II) Saída Bio	0,42	0,4	ND	ND	ND	ND	0,12	0,28	0,69	0,45	0,45	0,54
	(III) L E	0,11	0,1	0,1	1,98	2,82	0,69	0,14	0,10	0,55	0,13	0,18	0,51
Mg	(I) Entrada Bio	0,17	0,5	0,4	0,15	0,87	0,36	0,05	0,08	0,10	0,15	0,05	0,08
	(II) Saída Bio	0,16	0,1	ND	ND	ND	ND	0,07	0,09	0,08	0,09	0,05	0,18
	(III) L E	0,03	0,1	0,0	0,47	0,64	0,02	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,06
S- SO ₄ ²⁻	(I) Entrada Bio	0,17	0,56	0,27	0,25	0,70	0,34	0,03	0,18	0,22	0,35	0,08	0,14
	(II) Saída Bio	0,14	0,14	ND	ND	ND	ND	0,04	0,09	0,07	0,22	0,04	0,10
	(III) L E	0,09	0,08	0,02	0,33	0,69	0,07	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,08

^A A bomba de saída do dejetto CSTR não esteve acessível a partir desta data, assim o ponto (II) saída CSTR ficou não disponível (ND) e a coleta ponto (I) foi obtida no homogeneizador, onde, na ocasião, o substrato estava extremamente grosso/flotado, por defeito no agitador e ainda ^A com a coleta realizada na bomba de fundo da LE, provavelmente captou parte do lodo decantado com maior concentração de nutrientes; ^B Coletado no ponto (II) a caixa de entrada do BLC com visível amostra diluída; ^C A partir desta amostra, coletas direto na vala da granja BLC (observando uma amostragem mais encorpada)

Entre algumas amostras coletadas, destacam-se as citadas na observação 4^A do CSTR e na 1^B do BLC, que não apresentaram redução de concentração durante o processo e isto pode ser justificado, pois a coleta na LE do CSTR foi obtida do fundo da lagoa e a do BLC a amostra da entrada estava muito diluída.

A Tabela 9 mostra redução percentual da concentração de macronutrientes e os valores da concentração do N_{TK}PK. A literatura apresenta grande variabilidade na classificação ideal da concentração, pois este quesito deve ser analisado levando em conta outras condições como pH, temperatura em cada DA e manejo da instalação.

Tabela 9. Redução percentual da concentração de macronutrientes através dos sistemas CSTR e BLC respectivamente

% (mg.L ⁻¹)	CSTR		BLC	
	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>
N _{TK}	29	25	46	23
P	78	20	71	28
K	29	32	31	13
Ca	66	33	52	24
Mg	33	12	5	4
S-SO ₄ ²⁻	76	20	73	41

Na Tabela 10 mostra a concentração dos principais macronutrientes na entrada dos biodigestores.

Tabela 10. Concentração de macronutrientes na entrada do CSTR e BLC, respectivamente

Macro (mg.L ⁻¹)	CSTR		BLC		Concentração (mg.L ⁻¹) para SVT
	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>	
N _{TK}	4376,67	2,40	1766,67	0,69	400~3.710 ^A
P	1353,33	1,70	150,00	0,13	338~1.009,40 ^B
K	2108,33	0,98	1080,00	0,63	220~1.180 ^C

^A Silva (1996), Wendt et al. (1999); Caovilla et al. (2010); ^B Duda & Oliveira (2009); Caovilla et al. (2010); ^C Silva (1996), Caovilla et al. (2010)

Os resultados de amostragem dos pontos I, II e III dos micronutrientes do DSL obtidos nas granjas pesquisadas estão relacionados na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados das análises dos micronutrientes de DSL para o CSTR, BLC e LE

Nutri	Ponto/Amostra	Amostras CSTR (mg.L ⁻¹)						Amostras BLC (mg.L ⁻¹)					
		1	2	3	4 ^A	5	6	1 ^B	2 ^C	3	4	5	6
Fe	(I) Entrada Bio	14,5	76,6	109,7	37,3	148,9	69,4	3,6	18,3	29,6	71,8	9,6	2,0
	(II) Saída Bio	31,1	23,7	ND	ND	ND	ND	4,4	4,2	10,9	66,4	12,9	2,5
	(III) L E	11,8	7,9	7,1	119,7	119,3	11,4	18,3	1,0	3,6	3,8	4,45	2,0
Mn	(I) Entrada Bio	14,4	52,5	27,8	11,3	55,63	15,5	0,8	5,1	3,2	10,8	0,4	0,2
	(II) Saída Bio	11,9	12,8	ND	ND	ND	ND	1,0	2,8	1,1	4,2	1,0	3,1
	(III) L E	2,3	4,6	0,9	20,7	43,8	1,03	1,1	0,6	0,2	0,2	0,3	0,3
Cu	(I) Entrada Bio	18,4	55,5	52,3	23,1	63,00	40,7	1,0	9,0	28,5	24,8	0,8	113,9
	(II) Saída Bio	21,3	17,5	ND	ND	ND	ND	1,4	4,0	8,9	19,0	2,3	8,4
	(III) L E	6,2	8,7	4,1	60,4	60,3	5,18	5,2	1,4	0,4	0,8	0,1	0,1
Zn	(I) Entrada Bio	31,0	53,4	83,6	17,2	72,6	47,1	0,7	14,5	14,5	32,1	1,3	1,8
	(II) Saída Bio	36,7	20,5	ND	ND	ND	ND	0,7	5,2	5,2	25,7	4,2	11,2
	(III) L E	9,1	10,9	5,2	46,9	66,2	8,21	2,6	1,2	0,1	0,1	0,1	1,1

^A A bomba de saída do dejetto CSTR não esteve acessível a partir desta data, assim o ponto (II) saída CSTR ficou não disponível (ND) e a coleta ponto (I) foi obtida no homogeneizador, onde, na ocasião, o substrato estava extremamente grosso/flotado, por defeito no agitador e ainda no ^A com a coleta realizada na bomba de fundo da LE, provavelmente captou parte do lodo decantado com maior concentração de nutrientes; ^B Coletado no ponto (II) a

caixa de entrada do BLC com visível amostra diluída; ^c A partir desta amostra, coletas direto na vala da granja BLC (observando uma amostragem mais encorpada)

Observa-se na Tabela 12 que em todos os resultados dos micronutrientes ocorreu redução de concentração. Considerando que são metais traço e que não sofrem evaporação ou degradação orgânica, a redução percentual encontrada foi muito elevada, supondo com isso que estes metais devem estar decantados no lodo da LE.

Tabela 12. Redução percentual da concentração de micronutrientes através dos sistemas CSTR e BLC

% (mg.L ⁻¹)	CSTR		BLC	
	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>
Fe	71	35	83	19
Mn	77	32	78	32
Cu	51	74	92	7
Zn	82	10	85	24

Este fato reforça que futuras amostragens de DSL devem ter sua metodologia mais bem predefinida de acordo com as condições em campo. A eficiência do processo de digestão em usinas de biogás é tipicamente de 50 a 60% na redução de concentração (Angelidaki, 2004).

A Tabela 13 mostra os dados estatísticos da concentração de Cu, Fe e Zn obtidos nas coletas e os valores inibitórios para DA com base na literatura.

Tabela 13. Concentração média de micronutrientes no CSTR e BLC, respectivamente

Micro (mg.L ⁻¹)	CSTR		BLC		Inibição (mg.L ⁻¹)
	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>	
Cu	42,18	13,13	10,71	12,83	Cu > 50 ^A
Fe	76,24	48,82	22,52	26,25	Não especificado
Zn	50,84	24,88	10,87	12,28	Zn > 150 (mg.L ⁻¹) ^A

^A Friehe et al. (2010)

Os resultados das variáveis encontrados no substrato/digestato apresentados da Tabela 14 variaram durante o processo, destacando-se o pH, que apresentou valores médios de 6,78 a 8,13 no CSTR e de 7,20 a 7,90 no BLC, estando, assim, dentro da faixa ideal para a DA. O pH influencia em todo o sistema ambiental do reator, sendo importante manter os valores entre 6,00 e 8,00 (Fernandes, 2012). Os valores de pH durante o processo podem variar de 6,50 a 7,50 dependendo do material orgânico utilizado, e valores muito fora desta faixa podem levar à inibição do sistema (Mao et al., 2015).

Tabela 14. Resultados das análises do pH, densidade, MS, MO do DSL para o CSTR, BLC e LE

item	Ponto/Amostra	Amostras CSTR						Amostras BLC					
		1	2	3	4 ^A	5	6	1 ^B	2 ^C	3	4	5	6
pH (pH)	(I) Entrada Bio	6,40	6,40	6,30	7,10	7,30	7,20	7,40	6,70	7,20	6,90	7,50	7,50
	(II) Saída Bio	7,80	8,00	ND	ND	ND	ND	7,60	7,40	7,70	7,70	7,90	7,60
	(III) L E	8,00	8,00	8,20	8,30	8,10	8,20	7,90	7,60	7,80	8,20	8,20	7,90
Dens (g.L ⁻¹)	(I) Entrada Bio	1002,00	ND	1003,00	1003,00	ND	ND	1001,00	ND	1005,00	1005,00	ND	ND
	(II) Saída Bio	1008,00	ND	ND	ND	ND	ND	1001,00	ND	1003,00	1004,00	ND	ND
	(III) L E	1006,00	ND	ND	1004,00	ND	ND	1002,00	ND	1001,00	1001,00	ND	ND
MS (%)	(I) Entrada Bio	2,93	5,72	15,41	2,32	11,87	2,90	0,10	1,17	1,57	3,75	0,68	0,61
	(II) Saída Bio	1,97	1,32	ND	ND	ND	ND	0,30	0,52	0,48	1,32	0,66	1,07
	(III) L E	0,72	0,82	0,63	2,29	5,60	0,88	0,30	0,32	0,23	0,29	0,29	0,42
MO (g.L ⁻¹)	(I) Entrada Bio	27,80	24,90	72,70	14,33	31,70	25,01	2,00	11,00	13,91	21,64	6,30	3,81
	(II) Saída Bio	13,20	8,40	ND	ND	ND	ND	0,80	3,00	1,76	14,90	5,13	5,95
	(III) L E	3,90	4,30	5,20	18,13	31,40	4,53	1,50	2,90	0,32	9,70	5,38	1,91

^A A bomba de saída do dejetto CSTR não esteve acessível a partir desta data, assim o ponto (II), saída CSTR, ficou não disponível (ND) e a coleta ponto (I) foi obtida no homogeneizador, onde na ocasião o substrato estava extremamente grosso/flotado, por defeito no agitador e ainda no ^A com a coleta realizada na bomba de fundo da LE, provavelmente captou parte do lodo decantado com maior concentração de nutrientes; ^B Coletado no ponto (II) a caixa de entrada do BLC com visível amostra diluída; ^C A partir desta amostra, coletas direto na vala da granja BLC (observando uma amostragem mais encorpada)

Tabela 15. Dados estatísticos de pH, densidade, MS o MO na saída do processo CSTR e BLC, respectivamente

Variável	CSTR		BLC	
	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>
pH (pH)	8,13	0,46	7,94	0,26
Densidade (g.L ⁻¹)	1005,00	1,41	1001,00	0,00
MS (%)	1,82	1,95	0,31	0,06
MO (g.L ⁻¹)	11,24	11,29	3,63	3,43

Ficou evidenciado que as granjas estudadas não utilizam dados de controle do volume de água utilizada exclusivamente para o processo, o que pode auxiliar na detecção de potenciais desperdícios com lavações, vazamentos nas instalações e redução da MS.

O manejo adotado em cada granja apresentou grande variação na concentração de nutrientes contidos no dejetto, apontando a importância do monitoramento diário do recurso hídrico para o processo da biodigestão (Fernandes, 2012). Nos casos estudados, observa-se uma (MS) muito reduzida em determinados meses, e isso pode induzir que haja excesso de água utilizada no processo.

9 CONCLUSÕES

- 1- A comparação entre os dois sistemas da região se mostrou interessante, pois evidenciou a importância da pré-agitação e revolvimento do lodo para incrementar a biodigestão e postergar o assoreamento do BLC.
- 2- O CSTR não demonstrou superioridade quando instalado isoladamente sem um segundo BLC em série para as condições do sistema de terminação da região.
- 3- O acompanhamento frequente dos parâmetros físico-químicos do digestato e a análise periódica do biogás são extremamente importantes para o constante desempenho do biodigestor e para fins de geração de energia.
- 4- O controle de injeção de O_2 no biodigestor e o volume de água utilizada no processo foram os principais quesitos que devem ser melhorados.

10 RECOMENDAÇÕES

Extremamente importante a correta gestão da granja quanto ao substrato que é direcionado ao biodigestor, onde ocorrem o excesso de água e descartes de medicamentos usados na produção, pois é evidente a grande variabilidade dos sólidos totais (ST) e macronutrientes em diferentes granjas mesmo sendo do mesmo dejetado (suíno terminação).

Nas futuras coletas de DSL em LE, sugere-se adotar equipamento coletor de braço retrátil ou garrafas de Van Dorn, visando à melhoria da amostragem.

Predefinir a amostragem em pontos com agitação constante do material para melhor precisão da amostra e através de amostras compostas (mistura de várias subamostras do mesmo ponto), evitando, assim, a amostragem imprecisa.

É de fundamental importância monitorar as grandezas do biogás, em especial O_2 , NH_3 , H_2S e metais tóxicos, pois, conforme o nível de concentração, podem ser parâmetros inibitórios.

Implantar as tecnologias de agitação ou pré-agitação em biodigestores BLC, pois segue o princípio de melhorar o contato físico dos microrganismos com o substrato, impedindo a formação de valas preferenciais de circulação de material no interior do biodigestor.

Fomentar novos estudos sobre a importância da amostragem do DSL na suinocultura, garantindo ou identificando as condições ideais para a DA.

11 LITERATURA CITADA

ANGELIDAKI, I.; AHRING, B.K. (1994): Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. *Wat Res* 28: 727–731

BLANK, A. F.; BLANK, M. F. A.; AMANCIO, V. F.; MENDONÇA, M. C.; SANTANA Filho, L. G. M. Densidades de plantio e doses de biofertilizante na produção de capim-limão. *Horticultura Brasileira*, v.25, n.3, p.343-349, 2007.

CAOVILLA, Franciele A. et al. Características químicas de solo cultivado com soja e irrigado com água residuária da suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [on-line]. 2010, v. 14, n. 7 [Acessado 18 Agosto 2022] , pp. 692-697. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000700002>>. Epub 02 Jul 2010. ISSN 1807-1929. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000700002>.

DAREIOTI, M.A., KORNAROS, M., 2015. Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: effect of hydraulic retention time. *Bioresour. Technol.* 175, 553 e562.

EMBRAPA (2004) CT 362 Comunicado técnico sobre amostragem de DSL, (Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves) ISSN 0100-8862 Julho/2004 Concórdia, SC.

EMBRAPA SOLOS (2010) Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos / Ciríaca Arcangela Ferreira de Santana do Carmo ... [et al.]. - Rio de Janeiro

FERNANDES, D.A., Biomassa e Biogás da Suinocultura. Cascavel, PR:UNIOESTE, 2012.209 p. Dissertação Mestrado.

FERREIRA, Aldo & Horta, MARCO & CUNHA, Cynara. (2010). Avaliação das concentrações de metais pesados no sedimento, na água e nos órgãos de *Nycticorax nycticorax* (Garça-da-noite) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada. 10. 229-241. 10.5894/rgci186.

FRIEHE, J.; WEILAND, P.; SCHATAUER, A. Descrição de substratos selecionados. In: ROHSTOFFE, F.N. (Ed). Guia prático do biogás – geração e utilização. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. 2010. p. 74 -84.

FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2010 Guia Prático do Biogás Geração e Utilização. Internet: www.fnr.de.

MC CARTY, P.L. (1964): Anaerobic waste treatment Fundamentals – Part 3 Toxic material and their controls. Pub. Works Nov., 91.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.45, p.540–555, 2015.

PANIGRAHI, S.; DUBEY, B.K.; (2019) A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Renewable Energy 143:779-797. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011.

RYUE, J.; LIN, L.; KAKAR, F. L.; ELBESHISHY, E.; Al-Mamun, A.; DHAR, B. R. A critical review of conventional and emerging methods for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion. Energy for Sustainable Development, v. 54, p. 72-84, 2020.

SU, J-J.; HONG, Y-Y. Removal of hydrogen sulfide using a photocatalytic livestock biogas desulfurizer. *Renewable Energy*, v. 149, p. 181-188, 2020.

VILELA Júnior, L. V. E. V.; ARAÚJO J. A. C.; FACTOR T. L. Estudo da utilização do efluente de biodigestor no cultivo hidropônico do meloeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.1, p.72-79, 200.