

CLENOIR ANTONIO SOARES

ESTUDOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM SUINOCULTURA CICLO
COMPLETO USANDO UM BIODIGESTOR DE LAGOA COBERTA
CIRCULAR COM AGITAÇÃO, AQUECIMENTO E ISOLAMENTO
TÉRMICO

CASCVEL
PARANÁ - BRASIL
OUTUBRO – 2024

CLENOIR ANTONIO SOARES

**ESTUDOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM SUINOCULTURA CICLO
COMPLETO USANDO UM BIODIGESTOR DE LAGOA COBERTA
CIRCULAR COM AGITAÇÃO, AQUECIMENTO E ISOLAMENTO
TÉRMICO**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de
Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti

Coorientadores: Prof. Dr. Armin Feiden

Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL

PARANÁ – BRASIL

OUTUBRO – 2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Soares, Clenoir Antonio

Estudos de produção de biogás em suinocultura ciclo completo usando um biodigestor de lagoa coberta circular com agitação, aquecimento e isolamento térmico / Clenoir Antonio Soares; orientador Reinaldo Aparecido Bariccatti; coorientador Armin Feiden. -- Cascavel, 2024.
112 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2024.

1. Biodigestor circular. 2. Manejo dos dejetos. 3. Características físico química. 4. Análise econômica. I. Bariccatti, Reinaldo Aparecido, orient. II. Feiden, Armin, coorient. III. Título.

CLENOIR ANTONIO SOARES

Estudos de produção de biogás em suinocultura ciclo completo usando um biodigestor de lagoa coberta circular com agitação, aquecimento e isolamento térmico.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 REINALDO APARECIDO BARICCATTI
Data: 13/11/2024 10:43:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador - Reinaldo Aparecido Bariccatti
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 WALDIR MARIANO MACHADO JUNIOR
Data: 04/11/2024 14:31:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Waldir Mariano Machado Junior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 MARITANE PRIOR
Data: 04/11/2024 17:17:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maritane Prior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 RICARDO MULLER
Data: 06/11/2024 14:39:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ricardo Muller

Documento assinado digitalmente
 GEAN DELISE LEAL PASQUALI
Data: 07/11/2024 08:40:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gean Delise Leal Pasquali
Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus de Erechim (UFFS)

Cascavel, 31 de outubro de 2024.

“Dedico a Deus, minha Família, a Cooperalfa, a Unioeste, ao meu Orientador e Coorientadores, Professores e Colegas de curso em especial a Equipe de trabalho a qual juntos foi possível realizar esta pesquisa”.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde concedida, também a minha vontade e persistência de continuar os estudos focando no tema apresentado neste trabalho. A minha família Daniela e Duan que sempre apoiaram nas horas difíceis durante os momentos que estive ausente para estudar. À Cooperativa Agroindustrial Alfa, em nome do Diretor e 1º Vice-Presidente Sr. Cládis Jorge Furlanetto, que sempre me apoiaram a continuidade dos estudos, bem como aplicar os conhecimentos na minha área de atuação na empresa, relacionada ao meio ambiente.

Ao meu orientador Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti, os coorientadores Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza e Prof. Dr. Armin Feiden, os professores das minhas bancas pelas contribuições no meu aprendizado, incentivo, apoio e amizade, aos demais professores em nome do Prof. Dr. Jair e a Profª Dr.ª Gean, aos alunos das disciplinas cursadas e também a secretaria do curso em nome da Secretária Vanderléia agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Agricultura, do Centro de Engenharias e Ciências Agrárias, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Cascavel (UNIOESTE).

Agradecer também os colegas de trabalho da Unidade de Produção de Suínos, onde foi realizado a pesquisa, Srs. Adriano, Irceu, Rudinei e Felipe. E de forma especial agradecer a equipe do setor da Assessoria Ambiental a Engª Ambiental e Sanitarista Marina Sbardelotto, as Engª Química Bruna M. Dalarosa e Beatriz Cervinski que contribuíram da melhor forma possível para a realização deste trabalho de pesquisa em todas as suas etapas, com seus conhecimentos e competência ajudaram na condução dos trabalhos a campo e laboratório. *In memoriam* ao amigo Sr. Santiago Ibarra, o qual sempre me incentivou a gostar das atividades no seguimento de energias renováveis, com o seu dizer: “amiguinho, temos que criar mais discípulos”.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de um biodigestor CSTR..... | 6 |
| Figura 2 - Biodigestor CSTR no Biogás Lab IFG-UFG..... | 7 |
| Figura 3 - Desenho técnico digestor CSTR Brasileiro..... | 7 |
| Figura 4 - Amostras de efluentes da Terminação..... | 13 |
| Figura 5 - Amostras de efluentes da Terminação..... | 14 |
| Figura 6 - Rotas metabólicas e grupos microbianos na digestão anaeróbia..... | 16 |
| Figura 7 - Composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa..... | 17 |
| Figura 8 - a) Visualização área de estudo: 1 - Localização no País, 2 - Estado e 3 - Município b) Projeto de pesquisa: 1 – Biodigestor circular, 2 - Terminação e 3 - UPL..... | 21 |
| Figura 9 - Equipamentos do projeto: a - Biodigestor circular, b - Caixa de 80 m ³ ,.... | 22 |
| Figura 10 - a) Isolamento térmico do reator e b) válvula de segurança pressão..... | 22 |
| Figura 11 – Gerador de energia elétrica a Biogás e cogeração de calor água. a) Grupo motogerador, b) Sistema de cogeração e c) Boiler de armazenamento água..... | 23 |
| Figura 12 - Equipamentos: a) Painel de automação da temperatura, b) Sistema de controle (T °C) entrada e saída da água quente, c) Aquecimento dentro biodigestor..... | 23 |
| Figura 13 - Sistema de revolvimento da massa com os agitadores..... | 24 |
| Figura 14 - Ponto de medição da produção do biogás..... | 24 |
| Figura 15 - Sistema de filtragem e redução do H ₂ S. a) Filtragem do biogás b) Inserção de oxigênio nos biodigestores..... | 25 |
| Figura 16 - Galpões 1, 2 e 3 da Terminação, suas divisões em salas e as calhas/fosso de manejo..... | 26 |
| Figura 17 - Medidor de vazão tipo thermal para gás série FT2A..... | 28 |
| Figura 18 - Densímetro para massa específica 001 5582..... | 29 |
| Figura 19 - Cone Imhoff graduado para análise sólidos sedimentáveis..... | 29 |
| Figura 20 - Termômetro infravermelho laser digital modelo TC 0380..... | 30 |
| Figura 21 - Monitor GEM5000 de extração de gases..... | 30 |
| Figura 22 - Comportamento SV Totais, DQO e Massa injetada na Produção de Biogás..... | 36 |
| Figura 23 - Comportamento dos SV Totais, DQO, Massa Injetada, na Faixa de Melhor Produção do Biogás..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 - Comportamento dos Sólidos Sedimentáveis na Produção do Biogás.... | 42 |
| Figura 25 - Comportamento em Percentual da Queda na Produção de Biogás com a Massa Injetada nos - Dias 11, 12, 13, 14 e 15. | 43 |
| Figura 26 - Faixa de Melhor Produção de Biogás. | 44 |
| Figura 27 - Comportamento do pH nas Faixas 1 e 2 com a Produção do Biogás. | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Características físico-químicas para efluentes brutos da suinocultura. ... | 11 |
| Tabela 2 - Equivalência energética do biogás. | 18 |
| Tabela 3 - Porcentagem de CH ₄ e CO ₂ com suas Densidade e PCI. | 19 |
| Tabela 4 - Consumo médio de biogás segundo o uso. | 19 |
| Tabela 5 - Usos do biogás e requisitos de concentrações de H ₂ S. | 20 |
| Tabela 6 - Cronograma de manejo dejetos das calhas nas edificações. | 26 |
| Tabela 7 - Ajustes da temperatura e idade dos suínos. | 27 |
| Tabela 8 - Parâmetros (T °C) e suas medições nos galpões e salas da terminação. | 27 |
| Tabela 9 - Indicadores da Produção do Biogás. | 35 |
| Tabela 10 - Comportamento das Temperaturas da Água na Entrada e Saída do Reator na Faixa de Melhor Produção de Biogás. | 46 |
| Tabela 11 - Comportamento do pH na Produção do Biogás. | 48 |
| Tabela 12 - DQO _{média} de entrada e DQO _{média} de saída na faixa de melhor produção de biogás. | 51 |
| Tabela 13 - DQO _{média} de entrada e DQO _{média} de saída nas 4 semanas. | 51 |
| Tabela 14 - Investimentos Realizados no Estudo da Produção do Biogás. | 53 |
| Tabela 15 - Amortização do Investimento no Estudo da Produção do Biogás. | 53 |
| Tabela 16 - Amortização do Investimento sem Escavação de Laje. | 55 |

LISTA DE ABREVIÇÕES

- BLC** - Biodigestor de lagoa coberta
- BMP** - Potencial Bioquímico de Metano
- CH₄** - Gás metano
- CO₂** - Gás dióxido de carbono
- COV** - Carga Orgânica Volumétrica
- CSTR** - Reator de Tanque com Agitação Contínua
- EPS** - Poliestireno expandido
- GLP** - Gás liquefeito de petróleo
- GEE** - Geração de energia elétrica
- GHG** – Greenhouse gas - gases de efeito estufa
- H₂S** - Gás sulfídrico
- kWh** - Quilowatts hora
- Kcal** - Quilocalorias
- kgDQO_{rem}** - Quantidade de DQO removida
- Nm³** - Normais metros cúbicos
- Off grid** - Sistema isolado ou sistema autônomo
- PdB** - Produtividade de Biogás em $\text{m}^3_{\text{N biogás}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \cdot \text{d}^{-1}$
- PdM** - Produtividade de Metano em $\text{m}^3_{\text{N CH}_4} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \cdot \text{d}^{-1}$
- PrB** - Produção de Biogás em $\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{d}^{-1}$
- Prfv** - Poliéster reforçado com fibra de vidro
- PEX** - Polietileno Reticulado
- PEBDL** - Polietileno de baixa densidade linear
- PEAD** - Polietileno de alta densidade
- TRH** - Tempo de Retenção Hidráulica em h ou d
- Terminação** - Engorda dos leitões de 23 a 110 kg
- T** - Temperatura em °C
- tCO₂** - Tonelada de dióxido de carbono
- tCO_{2e}** - Tonelada de dióxido de carbono equivalente
- UPL** – Unidade de produção de leitões até 23 kg
- UASB** - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

SOARES, CLENOIR ANTONIO. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ, OUTUBRO DE 2024. **Estudos de produção de biogás em suinocultura ciclo completo usando um biodigestor de lagoa coberta circular com agitação, aquecimento e isolamento térmico.** PROF. DR. REINALDO APARECIDO BARICCATTI.

RESUMO

A pesquisa foi realizada para investigar a produção do biogás, em uma granja de suínos ciclo completo com alojamento para 3.500 matrizes (fêmeas) em sistema de Unidade de Produção de Leitões (UPL) e 10.000 animais em ciclo de terminação. Com a ampliação do plantel após o ano 2016, para atender o atual volume de efluentes 165 m³/dia, a unidade de biodigestão precisou ser reestruturada com outras tecnologias, sendo também implementado no sistema um biodigestor de lagoa coberta circular equipado com sistema de agitação, aquecimento, isolamento térmico e tempo de retenção hidráulica de 26 dias. Sendo assim, o estudo e os investimentos foram necessários para evitar o colapso dos três biodigestores fluxo pistão já existentes, através do assoreamento pelas diferentes cargas. Desta forma, tem-se que as cargas orgânicas das edificações seguiram programação de manejo semanal, sendo direcionadas para o novo biodigestor, com suas distintas características na composição físico-química e tempo de retenção hidráulica nas edificações. Com o processamento anaeróbio das cargas orgânicas no novo biodigestor, foi possível obter uma produção de biogás de 635,62 m³_N.d⁻¹ e uma eficiência média de 61,32% para remoção da carga de DQO. Observou-se também o rendimento dos sólidos voláteis adicionado de 0,193 m³ de biogás por kg SV por m³ de reator, bem como o rendimento de DQO adicionado de 0,086 m³ de biogás por kg DQO por m³ de reator, com valor médio do pH de 7,53 e taxa de transferência de calor em até 7°C. A quantificação da produção do biogás permitiu conhecer a operação da geração de energia elétrica *off grid* atingindo 20,31%, avaliar a cogeração da água quente usada no sistema interno de aquecimento do biodigestor. A amortização do investimento ocorreu em 5 anos e 5 meses, com uma TIR de 4,03%, VPL de R\$ 99.806,96 e 0% TMA.

Palavras-chave: Biodigestor circular, Temperatura dos dejetos, Manejo dos dejetos, Características físico química, Análise econômica.

SOARES, CLENOIR ANTONIO. STATE UNIVERSITY OF WESTERN PARANÁ, OUTUBRO 2024. **Biogas production studies in full cycle pig farming using a circular covered lagoon biodigester with agitation, heating and thermal insulation.** PROF. DR. REINALDO APARECIDO BARICCATTI.

ABSTRACT

The research was carried out to investigate biogas production on a full-cycle pig farm with accommodation for 3,500 sows in a Piglet Production Unit (PLU) system and 10,000 animals in the finishing cycle. With the expansion of the herd after 2016, in order to meet the current volume of effluent of 165 m³/day, the biodigestion unit needed to be restructured with other technologies, and a circular covered lagoon biodigester equipped with an agitation system, heating, thermal insulation and a hydraulic retention time of 26 days was also implemented in the system. The study and investments were therefore necessary to prevent the three existing piston flow digesters from collapsing due to silting from the different loads. In this way, the organic loads from the buildings followed a weekly management schedule and were directed to the new biodigester, with their different characteristics in terms of physical-chemical composition and hydraulic retention time in the buildings. With the anaerobic processing of the organic loads in the new biodigester, it was possible to obtain a biogas production of 635.62 m³N.d⁻¹ and an average efficiency of 61.32% for removing the COD load. An added volatile solids yield of 0.193 m³ of biogas per kg VS per m³ of reactor was also observed, as well as an added COD yield of 0.086 m³ of biogas per kg COD per m³ of reactor, with an average pH value of 7.53 and a heat transfer rate of up to 7°C. The quantification of biogas production made it possible to find out about the operation of off-grid electricity generation, which amounted to 20.31%, and to evaluate the cogeneration of hot water used in the biodigester's internal heating system. The investment was amortized in 5 years and 5 months, with an IRR of 4.03%, NPV of R\$ 99,806.96 and 0% TMA.

Keywords: Circular biodigester, Manure temperature, Waste management, Physical-chemical characteristics, Economic analysis.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 3 |
| 1.1.2 Objetivo específico..... | 4 |
| 2. Revisão bibliográfica..... | 5 |
| 2.1 Operacionalidade de um reator de tanque agitação contínua - CSTR | 5 |
| 2.2 Influência da temperatura na biodigestão..... | 8 |
| 2.3 Caracterização, digestão e influência das cargas orgânica da suinocultura | 10 |
| 2.4 Biogás e suas características | 16 |
| 3. Material e métodos | 21 |
| 3.1 Considerações da área de estudo..... | 21 |
| 3.2 Caracterização da pesquisa | 22 |
| 3.3 Manejo dos efluentes | 25 |
| 3.4 Características da terminação com ambiente controlado..... | 26 |
| 3.5 Coleta dos dados..... | 28 |
| 4. Resultados e discussões | 35 |
| 4.1 Análise do manejo, carga orgânica dos dejetos e cálculos de produção..... | 36 |
| 4.2 Análise do aquecimento do reator | 46 |
| 4.3 Monitoramento do pH | 48 |
| 4.4 Eficiência do Biodigestor Lagoa Coberta Circular | 50 |
| 4.5 Amortização do Investimento | 52 |
| 5. Conclusões | 57 |
| 6. Referências bibliográficas | 59 |
| 7. Anexos..... | 70 |

1. Introdução

Com o crescimento da demanda por proteína animal no mundo, segundo Organização das Nações Unidas – ONU (2019), a população global estava próxima a 8 bilhões, em algumas regiões o crescimento dos habitantes continua acelerado. Estima-se que para o ano de 2050 deverá atingir os 10 bilhões de pessoas, destacando para as regiões da África e Ásia.

Atualmente a China ocupa o posto de país mais populoso e, deverá perder sua posição para a Índia até 2027, quando provavelmente chegará a 1,7 bilhão de habitantes até 2050.

O agronegócio brasileiro vem demonstrando a sua importância para atender o mercado consumidor, com isso para ocupar esta fatia de mercado a atividade de suinocultura vem aumentando as suas produções, bem como maior número de propriedades operando neste seguimento, onde a quantidade de animais criados e alojados aumentaram nos últimos anos nos sistemas produtivos.

Segundo a EMBRAPA (2023), para manter a expansão produtiva na agricultura e pecuária é necessário estar atento a três problemas: baixar o custo da alimentação para o povo brasileiro, abrir canais de exportação para escoar o excedente de produção e incluir agricultores excluídos da modernização na dinâmica produtiva da agropecuária.

Em 2023, o Brasil abateu 57,17 milhões de suínos, registrando aumento de 1,3% em relação a 2022. A região sul do Brasil correspondeu a 65% desta produção sendo, 29,5% para Santa Catarina que exportou 658,2 mil toneladas de carne suína, o Paraná com 21,2% e com 17% o Rio Grande do Sul.

Com as ampliações do mercado de proteína animal e o crescimento produtivo nos sistemas de criações, vem também o problema da geração dos efluentes com os seus impactos ambientais, necessitando cada vez mais aplicar tecnologias e conhecimentos para o tratamento dos efluentes os quais possibilitam também a geração de receitas. Como exemplo do biogás, o qual é usado em motores geradores para produzir a energia elétrica, bem como, na substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP), lenha, óleo diesel, carvão entre outros produtos usados como fonte de energia térmica.

Segundo a CiBiogás (2023), as propriedades rurais podem usar o biogás como fonte de energia para aquecimento e combustível nos equipamentos e instalações

diminuindo assim os custos na propriedade e também melhorando o tratamento e a qualidade dos efluentes.

Em seus estudos para mapeamento de energias renováveis a Fundação Científica e Tecnológica em Energias Renováveis FCTER (2024), constatou que o Brasil foi o país que mais recebeu investimentos em projetos de energia renovável aos longos dos anos 2000 e 2020, valores estes de US\$ 46,8 bilhões (IRENA, 2022).

Também a FCTER (2024) constatou que a produção de biogás no Brasil até agosto de 2023 foi de 2,82 bilhões de Nm³/ano, distribuídos 251,01 milhões na agropecuária, 407,70 milhões na indústria, 2,16 bilhões resíduos sólidos urbano e esgoto. O número de plantas/usinas de biogás no Brasil neste período foram de 628 para agropecuária, 96 na indústria, 87 no resíduo sólido urbano e esgoto.

Sendo que, em Santa Catarina 68 plantas de biogás, gerando 71,76 milhões de Nm³/ano, operando com 61 plantas na agropecuária produzindo 25,71 milhões de Nm³/ano, 3 plantas no seguimento industrial com 2,38 milhões de Nm³/ano e 4 plantas em tratamento de resíduo sólido urbano e esgoto gerando 43,67 milhões de Nm³/ano (CIBIOGÁS, 2023).

Atualmente a ABiogás (2024), disponibilizou o mapa regulatório do setor de biogás e biometano e o mesmo tem como objetivo compilar e informar aos usuários da tecnologia de produção de biogás as legislações pertinentes ao seguimento, levando em consideração a abrangência do país e as unidades federativas.

Recentemente instituiu-se a Lei Nº 19.032, de 2 de agosto de 2024, que trata da destinação dos animais mortos não abatidos, permitindo a utilização de uso de tecnologias para tratamento, sendo uma delas através de biodigestores (SANTA CATARINA, 2024). Conforme estudos realizados por Soares *et al.* (2020) sobre utilização de placentas inseridas no reator, avaliou-se resultados positivos na agregação da produção de biogás.

Conforme a WBA (2019), existem uma diversidade de materiais orgânicos passíveis de serem aproveitados com a digestão anaeróbia, resíduos como: efluentes sanitários, restos de colheitas e dejetos de animais, que representam um grande potencial de aproveitamento para geração de biogás, porém, apenas 2% são usados.

A composição gasosa do biogás contribui também para outras utilizações como fonte de energia, os quais já vem sendo usado como o nitrogênio e o dióxido de carbono. Outra grande importância da captura do biogás está relacionada com as emissões dos gases de efeito estufa.

Sobre as fontes de emissões atmosféricas na granja objeto desta pesquisa Cervinski (2023), utilizou a metodologia do Programa Brasileiro GHG Protocol, a qual visa estimar a quantificação, gestão e compreensão das emissões dos gases de efeito estufa em três escopos.

Ao mensurar o escopo 1, onde levou-se em consideração as emissões diretas de fontes que a granja controla, obtiveram valores de 744,426 tCO₂ para as emissões biogênicas e de 6.957,747 tCO_{2e} para as emissões não biogênicas. Para o escopo 2, que tratou das emissões indiretas provenientes da compra de eletricidade, as emissões não biogênicas foram de 45,126 tCO_{2e}. Devido à complexidade na coleta de dados, o escopo 3 não foi pesquisado por envolver emissões indiretas provenientes de atividades que ficam fora do controle do empreendimento (CERVINSKI, 2023).

Como o desenvolvimento das atividades na suinocultura tem oscilações no processo e na produção, os quais refletem no manejo, na geração de efluentes e, por consequência, no tempo de retenção hidráulica, no controle de temperatura, nas cargas orgânicas e na produção do biogás. Ainda nos dias de hoje, há necessidade de pesquisas e projetos, que discorram números reais de resultados desenvolvidos em escala operacional em granjas de suínos, principalmente para aquelas de grande porte.

Diante disto, esta pesquisa foi necessária para desenvolver uma metodologia através da reestruturação da unidade de biodigestão, com uso de equipamentos e procedimentos que permitam maximizar a produção de biogás com o mínimo de variações ocasionais, para atender ao cenário de plantel, o volume total de efluentes, com as diferentes cargas orgânicas e suas dificuldades de segregação de fases devido ao tempo de permanência dos dejetos dentro das instalações e os diferentes manejos nas edificações.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Compreender e quantificar a produção de biogás usando um biodigestor de lagoa coberta circular com sistema de agitação, isolamento térmico e aquecimento, para tratar diferentes cargas orgânicas em granja de suínos ciclo completo, com diferentes formas de manejos em suas edificações.

1.1.2 Objetivo específico

- Identificar e quantificar os fatores que interferem e limitam a produção do biogás, com as distintas cargas orgânicas e manejo operacional;
- Quantificar a produção do biogás observando o comportamento das cargas orgânicas, temperatura e fatores físico-químicos dos dejetos;
- Identificar e avaliar a necessidade de ajustes dos sistemas para a melhor combinação de ações, para a produção do biogás com as características distintas na carga orgânica e no manejo;
- Conhecer os valores necessários para o investimento e sua amortização.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Operacionalidade de um reator de tanque agitação contínua - CSTR

A definição da tecnologia a ser adotada em sistemas de tratamento, demanda de análises individuais, uma vez que depende das circunstâncias dos fatores locais, técnicos e econômicos do local de implantação. Conforme estudado por Neto, Junior e Guesser (2019), no estado de Santa Catarina a utilização da tecnologia de biodigestores registrou-se com baixa adesão, mesmo com estímulos apresentados pelas integradoras e as instituições financeiras, os produtores rurais ainda seguem aplicando as tecnologias convencionais. Ainda segundo os autores, constatou-se também que, dentre os investimentos realizados nesta área, o modelo mais usado de reator foi o tipo canadense (fluxo pistão).

Já, em estudos realizados por Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), apontam-se que os reatores modelos CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor ou reator com tanque agitado continuamente) são os mais utilizados em plantas industriais de biogás, e, na Europa registra-se aproximadamente 90% dos biodigestores construídos. Sendo a definição de aplicação da tecnologia atrelada ao tipo de substrato a ser tratado.

Sobre biodigestores anaeróbios, Azevedo (2021), estudou alternativas tecnológicas para produtores e cooperativas, abordando sobre as características do reator CSTR. Sendo considerado um biodigestor moderno de alto desempenho o equipamento possui homogeneização constante do substrato, para a movimentação da massa dos dejetos e apresenta tecnologias de automação que possibilitam o controle de parâmetros, oferecendo condições operacionais e estabilidade aos microrganismos. Esse modelo suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas entre 1 a 4 kgSVm⁻³d⁻¹ e até 15% nas concentrações dos sólidos, porém, os custos de implantação são elevados e a complexidade tecnológica é média a alta. Por isso, deve-se considerar todos estes fatores para definir a aplicação da tecnologia.

Na Figura 1 a seguir, são apresentados os principais componentes de um reator CSTR, com sistema de aquecimento, agitador, entrada do substrato e saída do digestato, reservatório de biogás e válvula de segurança, mecanismos estes que possibilitam controlar a temperatura interna, estabilização das populações de

microrganismos e, conseqüentemente maior capacidade de produção de biogás, (BAYERN, 2007).

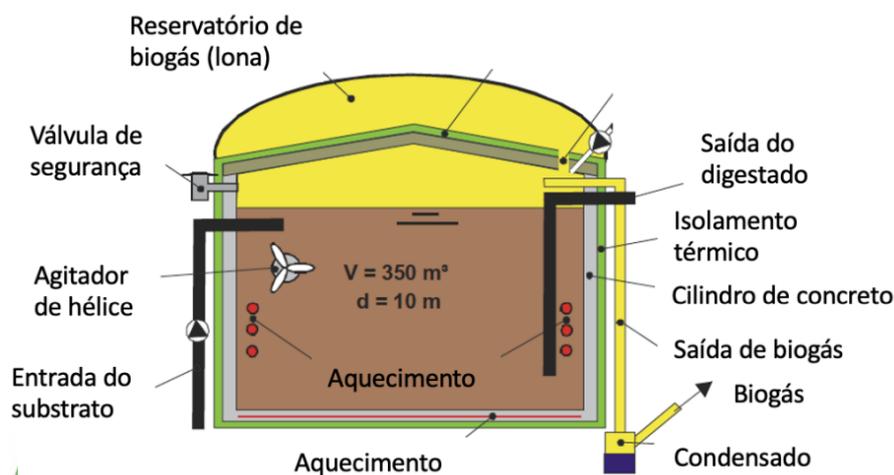


Figura 1 - Esquema de um biodigestor CSTR.
Fonte: Bayern (2007).

Ainda, Azevedo (2021) descreveu sobre o Reator CSTR Brasileiro onde, o modelo foi desenvolvido com o princípio da tropicalização dos biodigestores para serem modernos, automatizados e adaptados aos materiais e condições brasileiras. O reator conta com um sistema de agitação automatizado, programado para agitar o substrato por um tempo determinado por hora várias vezes ao dia e, sistema de aquecimento solar para controle da temperatura. Acoplado também uma bomba a qual tem-se o controle por microprocessadores (termostato), garantindo assim a estabilidade da temperatura e homogeneização do substrato.

Este reator brasileiro foi inicialmente desenvolvido para operar com resíduos orgânicos provenientes da indústria sucroalcooleira, vinhaça e torta-de-filtro. O dimensionamento do equipamento foi projetado para um volume aproximado de 6 m^3 , com o TRH recomendado para 15 dias e uma carga orgânica volumétrica de $3 \text{ kgSVm}^{-3}\text{d}^{-1}$. No estudo a produção média do biogás para esse reator foi de $1 \text{ m}^3\text{kg.sv}$ por dia, o equipamento está implantado na IFG-UFG no laboratório de biogás, com a capacidade aproximadamente de 250 kg de esterco bovino, contendo 74 g de SV por kg com produção estimada de $18 \text{ m}^3/\text{dia}$ de biogás.

Na Figura 2, apresenta-se o Biodigestor CSTR instalado no Biogás Lab IFG-UFG e a posição dos equipamentos (AZEVEDO, 2021).



Figura 2 - Biodigestor CSTR no Biogás Lab IFG-UFG.

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

Fonte: Azevedo (2021).

A seguir na Figura 3, demonstra-se o desenho técnico de Zang e Fonseca (2019), em corte longitudinal do reator CSTR Brasileiro, pode-se visualizar o posicionamento dos equipamentos que ficam na parte interna do reator, com os quais se consegue fazer a movimentação dos dejetos através do conjunto motor, braço e hélice do agitador.



Figura 3 - Desenho técnico digestor CSTR Brasileiro.

Fonte: Zang e Fonseca (2019).

Os reatores anaeróbios do tipo CSTR, conforme apontado pela Embrapa Suínos e Aves Sbera (2019), o tempo de retenção hidráulica (TRH) e o tempo de retenção de sólidos (TRS) são iguais, pois não ocorre acúmulo de lodo no reator. O TRH mínimo destes reatores encontra-se na faixa entre 15 e 20 dias, variando significativamente em função do tipo de substrato a ser digerido e, constatou-se que

os biodigestores CSTR sem a recirculação de lodo são mais adequados para efluentes com altas concentrações de sólidos.

No Brasil os modelos normalmente utilizados de reatores são: os Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC), Reator de Tanque de Agitação Contínua (*Continuous Stirred Tank Reactor – CSTR*) e Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB*). Cada equipamento tem suas características operacionais e seus parâmetros de processo.

O biodigestor BLC, opera em Carga Orgânica Volumétrica (COV) entre 0,3 a 0,5 ($\text{kg}_{\text{SV}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$), com uma produtividade de biogás de 0,03 a 0,15 ($\text{m}^3_{\text{Nbiogás}} \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \text{d}^{-1}$) e TRH de 35 a 40 dias.

Com mais tecnologias o reator CSTR, opera em Carga Orgânica Volumétrica 0,5 a 0,8 ($\text{kg}_{\text{SV}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$), com uma produtividade de biogás de 0,4 a 0,8 ($\text{m}^3_{\text{Nbiogás}} \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \text{d}^{-1}$) e TRH ≥ 15 dias. Já, o reator UASB tem características de operar com Carga Orgânica Volumétrica 1 a 4,0 ($\text{kg}_{\text{SV}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$), com uma produtividade de biogás 1 a 1,4 ($\text{m}^3_{\text{Nbiogás}} \text{m}^{-3}_{\text{reator}} \text{d}^{-1}$) e TRH entre 4 a 72 horas, (KUNZ *et al.*, 2019).

2.2 Influência da temperatura na biodigestão

A temperatura na biodigestão anaeróbia vem sendo estudada por pesquisadores a muito tempo, envolvendo o comportamento das bactérias no processo de biodigestão, uma vez que a faixa mesofílica consegue otimizar a digestão anaeróbia em temperaturas entre 30 a 35 °C. Argumenta-se também a necessidade da manutenção e estabilidade da temperatura, pois, sendo determinante para a população microbiana responsável pela produção do gás CH₄ que possui sensibilidade a variações da temperatura (SINGH, 1994).

No tratamento de dejetos suínos em fase de terminação, estudos com as temperaturas de 25, 35 e 40 °C, com ou sem uso de agitação e, com tempos de retenção hidráulica de 10, 15, 25 e 30 dias, concluíram que o melhor desempenho na eficiência da digestão anaeróbia ocorreu na temperatura de 35 °C (SOUZA, 2001).

Constatou-se também que quando a temperatura da biomassa aumentou de 20 °C para 35 °C, ocorreu um incremento na produção do biogás estimado em 30% e a manutenção da temperatura é fator muito importante para o processo, principalmente na população microbiana responsável pela produção do gás CH₄ (OLIVEIRA E HIGARASHI, 2006). Também, estudando diferenças entre as

temperaturas Chernicharo (2007), apresentou três faixas de crescimento dos microrganismos, sendo: psicrófila (0 e 20°C), mesófila (20 e 45°C) e termófila (45 e 70°C).

De acordo com Cortez *et al.* (2008), a produção do biogás é duplicada a cada aumento de 10 °C na temperatura para a faixa entre 15 e 35°C, observou também que em temperaturas mais elevadas as reações de bioconversão aceleram, resultando em um processo com maior eficiência e menor tempo de retenção hidráulica. Em temperaturas inferiores a 10 °C pode promover a inibição da atividade dos microrganismos e interrupção no processo, reduzindo a conversão da carga orgânica. Acrescenta ainda, que existem duas faixas ótimas de temperatura para a biodigestão anaeróbia, sendo elas: 35 °C para a mesófila e 50 °C para termófila.

A variação da temperatura acima ou abaixo destas faixas, pode acarretar a inibição dos microrganismos, podendo levar até mesmo a danos irreversíveis ao processo, como a suspensão completa da produção do biogás, em casos extremos (ROHSTOFFE, 2010).

Fernandes (2012), também aborda a temperatura como um parâmetro determinante para a bioconversão do material orgânico, uma vez que influencia no processo de degradação microbiana e nas quantidades de gás e biofertilizante produzidos.

Com a redução da temperatura, a ação microbiana diminui podendo ocorrer um declínio de 34% da atividade microbiana para cada 5 °C de redução da temperatura, promovendo a geração de ácidos voláteis não digeríveis e conseqüentemente redução do pH (SPEECE 1996; SALOMOM *et al.*, 2012; FERNANDES, 2012).

A faixa termófila é a que pode apresentar maior conversão, porém, há necessidade de controlar a temperatura, pois é a faixa do processo que apresenta maior instabilidade, devido ao intervalo restrito de atuação das bactérias metanogênicas (SALOMOM *et al.*, 2012).

Analisando o comportamento da temperatura interna do dejetos em reator sem controle de aquecimento da massa, marca Biokohler, instalado no estado do Paraná Utech (2013), observou no período outono e inverno que, a média das temperaturas da massa se mantiveram próximas aos 20 °C, a qual é considerada faixa limitante para as bactérias mesófilas, mas mesmo assim houve uma boa produção de biogás.

Avaliando a variação da temperatura interna dos dejetos em biodigestor modelo fluxo pistão sem aquecimento, bem como a temperatura do ambiente no período de

inverno e verão em granja de suínos na região Sul do Brasil, Soares (2016), observou que a temperatura dos dejetos no período de verão, obteve valores máximos de 26 °C e mínimos de 21 °C ficando a média em 23 °C. No período de inverno, a temperatura dos dejetos apresentou média de 19 °C, com mínimas de 13 °C e máximas de 23 °C. Já, a temperatura ambiente obteve valores mínimos de 2 °C, podendo ter interferido na temperatura interna do reator e, por consequência, na temperatura de operação do sistema.

Em estudos de Junior (2019), que abordam a estimativa da produção de biogás a partir de dejetos suínos aplicadas a um estudo de caso, tem-se que a temperatura utilizada para os processos de geração de biogás são em torno de 37 °C para as fases em que atuam bactérias mesofílicas e de 55 °C para as bactérias termofílicas.

2.3 Caracterização, digestão e influência das cargas orgânica da suinocultura

No estado de Santa Catarina a atividade de suinocultura segue as normativas do Instituto do Meio Ambiente IMA (2022), as quais estabelecem os parâmetros e o dimensionamento das cargas orgânicas para a atividade de criação de suínos, valores estes pesquisados e divulgados pela Embrapa Suínos e Aves – Concórdia SC.

A seguir na Tabela 1, encontra-se dados de diversos estudos com relação as características físico-químicas dos dejetos brutos da suinocultura relatados por diversos autores em condições distintas (FERNANDES, 2012).

Tabela 1 - Características físico-químicas para efluentes brutos da suinocultura.

| Autor (Ano) | Variáveis | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| | pH | DQO mg.L ⁻¹ | DBO mg.L ⁻¹ | ALC mg.L ⁻¹ | ST mg.L ⁻¹ | NTK mg.L ⁻¹ | NH ₄ mg.L ⁻¹ | P mg.L ⁻¹ |
| Bonett e Monticelli (1998) | - | 25.542 | - | - | 22.399 | 2.374 | - | 1.140 |
| Cazarré (2000)* | 7,06 | 20.005 | - | - | 14.322 | 2.487 | - | 541 |
| Duarte (1992)* | 7,46 | 21.670 | 7.280 | - | - | 2.150 | - | - |
| Konzen (1980) | 6,94 | 98.650 | 52.570 | - | 90.000 | 6.000 | - | 2.500 |
| Medri (1997) ⁽¹⁾ | - | 21.647 | 11.979 | - | 17.240 | 2.205 | - | 633 |
| Medri (1997) ⁽¹⁾ | - | 15.153 | 8.304 | - | 9.950 | 1.825 | - | 391 |
| Moraes e Paula Jr. (2004) | 6,8 | 2.183 | - | 441 | - | 180 | 164 | - |
| Oliveira (2002)* | - | 15.223 | 8.038 | - | 11.384 | 1.488 | - | 337 |
| Santos et al. (2007)** | - | 31.050,71 | - | - | 9.147,67 | - | 6.922,17 | - |
| Schmidt et al. (2002)** | - | 15.639 | 7.303 | - | 11.857 | 2.000 | - | 341 |
| Yang e Cicek (2008) | 7,14 | 3.840 | - | 2.364 | 494 | - | 553 | - |
| Zanotelli (2000)* | 6,87 | 26.387 | - | - | 22.867 | 2.539 | - | 1.215 |
| Silva F. (1996) | - | 25.542,9 | - | - | 22.399 | 2.374,3 | - | 577,8 |
| Moretti (2009) | 7,02 | 30.248 | - | 7.202 | 35.493 | 2.553 | - | - |
| Zhang e Zhu (2005) | 7,26 | 48.392 | 20.608 | - | 40.600 | 6.429 | - | 1.581 |
| Zhang e Zhu (2006) | 6,2 | - | 21.800 | - | 42.500 | - | - | - |
| Çelen et al. (2007) | 6,87 | - | - | 1.475 | - | - | 1.410 | - |
| Kunz et al. (2009) | 6,89 | 34.200 | - | - | - | 3.121 | - | 849 |
| Liu et al. (2009) | 5,5 | 89.000 | - | - | 62.700 | - | 1.382 | - |
| Massé et al. (2007) | - | 131.300 | - | - | 99.500 | 6.698 | 3.875 | 1.729 |
| Zhang et al. (2006) | 7,5 | 40.396 | 19.904 | - | 42.800 | 5.877 | 4.719 | 1.592 |
| González et al. (2008) | 7,3 | 50.400 | - | - | 25.900 | 3.165,3 | - | 614 |
| Karakashev et al. (2008) | 7,09 | 70.000 | - | - | 48.000 | 5.600 | 4.800 | 1.600 |
| Suzuki et al. (2007) | 7,4 | - | 4.050 | 2.130 | - | - | 532 | 145 |
| An et al. (2007) | - | 22.919 | 11.631 | - | - | 3.875 | 2.934 | 266 |
| Shin et al. (2005) | 8,36 | 4.479 | - | 5.662 | - | 1.566 | 1.502 | - |
| Ahn et al. (2006) | 6,37 | 130.800 | - | - | 61.800 | 7.300 | 4.800 | - |
| Hwang et al. (2010) | - | 124.100 | - | - | 65.600 | 7.500 | - | - |
| Cantrell et al. (2009) | 7,6 | 16.758 | 3.046 | - | - | 1.501 | 838 | 566 |
| Zhang et al. (2006) | 7,12 | 7.040 | 3.780 | - | 4.590 | 918 | 709,1 | 91,8 |
| Milán et al. (2001)** | 6,8 | 26.800 | - | 3.380 | 22.100 | 1.270 | 410 | 230 |
| Nohra et al. (2003)** | 7,4 | 80.000 | - | - | - | 4.600 | - | - |
| Walker e Kellei (2003)** | 7,2 | 19.330 | - | - | - | - | 50 | 5,2 |
| Yang e Wang (1999)** | 7,01 | 2.334 | - | - | 3.178 | 458 | - | - |
| Yang e Gan (1998)** | - | 3.242,86 | - | - | 3.257,57 | 183,83 | 79,5 | - |
| Média | 7,1 | 39.196 | 13.869 | 3.236 | 31.603 | 3.151,3 | 2.098,8 | 806,9 |
| Desvio Padrão | 0,42 | 38.164 | 13.285 | 2.399 | 27.094 | 2.214,4 | 2.138,3 | 667,8 |

Fonte: Fernandes (2012); *Oliveira (2002); **Projeto Geração Distribuída (2009a).

Pode-se observar na Tabela 1, que os maiores valores apresentados de concentrações da DQO, são para Kozen (1980) de 98.650 mg/L⁻¹; 89.000 mg/L⁻¹ para Liu *et al.* (2009); Massé *et al.* (2007) de 131.000 mg/L⁻¹; 130.800 mg/L⁻¹ para Ahn *et al.* (2006) e 124.100 mg/L⁻¹ para Hwang *et al.* (2010).

Outros autores consideram que o volume de uma carga orgânica inadequada inserida em biodigestores sem as devidas condições operacionais, pode ocasionar sobrecarga do reator apresentando resultados negativos na produção de biogás (MAO *et al.*, 2015). Em seus estudos Lins *et al.* (2017), referenciou que a carga orgânica volumétrica (COV), bem como o pH, a temperatura, relação carbono e nitrogênio, tempo de retenção hidráulica (TRH) e tempo de retenção de sólidos (TRS) afetam a produção de biogás.

Ainda, um manejo inadequado nas instalações das cargas orgânicas, com a retenção de dejetos por longos períodos em baias, resultam na geração de amônia que prejudica a qualidade do biogás e também pode afetar a qualidade do ar nas instalações (KUNZ e STEINMETZ, 2019).

Para Cândido (2021), que estudou em granja de suínos ciclo completo com 5.320 matrizes, gerando 266 m³ dejetos dia, avaliando o Sistema de Tratamento de Efluente da Suinocultura – SISTRATES, obteve produção de biogás de 284,74 ± 130,91 Nm³biogás d⁻¹, produtividade de 0,41 ± 0,19 Nm³biogás m⁻³reator d⁻¹, rendimento de 0,39 ± 0,21 Nm³biogás kg_{SVadic}⁻¹ com TRH de 35 dias para reator CSTR. A concentração de CH₄ de 62,49 ± 4,36% e concentração de H₂S de 666,50 ± 439,54 mg L⁻¹.

Continuando o estudo Cândido (2021), obteve os parâmetros de dimensionamento para os 2 (dois) biodigestores de lagoa coberta (BLC), sendo os valores divididos igualmente entre os bios. Produção de biogás de 1293,7 ± 716,14 Nm³biogás d⁻¹, produtividade de 0,26 ± 0,14 Nm³biogás m⁻³reator d⁻¹, rendimento de 0,7 ± 0,57 Nm³biogás kg_{SVadic}⁻¹ com TRH de 20 dias. A concentração de CH₄ de 66,46 ± 1,63% e Concentração de H₂S de 486,15 ± 483,75 mg L⁻¹.

Comparando as produções de biogás usando três países (Brasil, EUA e Alemanha) na atividade de suinocultura, onde, em 14 propriedades brasileiras, usaram o biodigestor fluxo tubular em criação de UPL, Ciclo Completo (CC) e Terminação, onde obteve-se a média de 0,183 m³/dia por animal de biogás.

Nas dez propriedades americanas, usando biodigestores fluxo tubular e reator de mistura completa, obteve-se a produção média em 0,163 m³/dia/animal. Para as propriedades alemãs usando reator de tanque de agitação contínua a produção de biogás foi realizada separadamente por ciclo produtivo, sendo ciclo completo média 0,18 m³/dia/animal, UPL média 0,31 m³/dia/animal e Terminação média 0,11 m³/dia/animal (MELLO, 2017).

Soares *et al.* (2024), avaliou a carga orgânica de dejetos suínos em diferentes fases de produção, observando a composição do efluente bruto na creche sendo, a densidade de 1.005,5 kg/m³, o pH 6,05 e 41.531 mgO₂L a DQO. Já, a gestação apresentou média de 1.007,5 kg/m³ na densidade, 8,25 no pH, e na DQO 15.129 mgO₂L. Para a maternidade a média foi de 1.006,5 kg/m³ na densidade, pH 7,75 e 14.530 mgO₂L para a DQO.

Continuando os estudos na mesma granja Soares *et al.* (2024), analisou a carga orgânica na terminação com instalações em ambiente controlado, com TRH nas calhas entre 25 a 30 dias, ou seja, 3 a 4 vezes maior que o TRH na creche, registrou um volume de dejetos médio de 68,83 m³/dia, o qual apresentou parâmetros médios de 1.020,5 kg/m³ na densidade, pH 7,77 e 59.772 mgO₂L na DQO.

As variações do parâmetro obtidos para a DQO podem estar associadas a fatores climáticos, tecnológicos, de manejo, tipo das instalações, bebedouro, carga orgânica e ciclo de produção, as quais podem alterar a eficiência na produção de biogás (SOARES *et al.*, 2024).

A Figura 4 ilustra a homogeneidade do efluente e a quantidade de sólidos sedimentáveis.



Figura 4 - Amostras de efluentes da Terminação.

Constatou ainda que o manejo dos dejetos é dependente da altura da lâmina de efluente para que ocorra o arraste total da carga orgânica, sem haver retenção de sólidos internamente, entretanto, o mesmo tem características homogêneas (Figura 4), dificultando assim a segregação em biodigestor fluxo pistão, promovendo nestes

uma maior taxa de assoreamento e, redução da eficiência na produção do biogás (SOARES *et al.*, 2024).

Com relação ao assoreamento, estudo em biodigestor fluxo pistão com volume de 1.800 m³, em granja de suínos ciclo de criação UPL operando durante 9 (nove) anos chegou em 1,78 metros à altura do assoreamento. Os dejetos brutos analisados apresentaram a média de 30.043,87 mgO₂/L na DQO, densidade de 1.007 kg/m³ e volume médio de carga 100 m³/dia, vistos na Figura 5. Os dados obtidos pelo autor reportam a importância de sistema de agitação (SOARES, 2016).

Verificou também que a biodigestão anaeróbia é efetiva para o tratamento dos dejetos suínos, avaliando a remoção da carga de DQO, em três biodigestores modelo fluxo pistão (*Plug Flow*). Onde foram obtidas as eficiências de 85% (biodigestor 1), 76% (biodigestor 2) e 65% (biodigestor 3) estudados no período de verão. Já, no período de inverno obteve-se as eficiências de 73% (biodigestor 1), 73% (biodigestor 2) e 76% (biodigestor 3). O autor aponta que podem ser incrementados os percentuais da eficiência, melhorando a qualidade dos efluentes bem como, instalação de sistemas para a homogeneização da massa e redução do assoreamento (SOARES, 2016).



Figura 5 - Amostras de efluentes da Terminação.
Fonte: Soares (2016).

De acordo com Brás *et al.* (2008), os processos biológicos ocorrem através da ação dos microrganismos para transformar as moléculas da biomassa em compostos mais simples e com bastante energia. Sendo assim, para entender o comportamento

do processo de biodigestão anaeróbia da carga orgânica usando dejetos de suínos fase crescimento e coletando os dejetos por raspagem, o mesmo analisou a parte sólida com e sem aplicação de técnica de separação, considerando a avaliação em diferentes tempos de retenção hidráulica de 15, 22, 29 e 36 dias.

Júnior *et al.* (2009), obteve os resultados onde, separando a fração sólida maximizou a eficiência dos biodigestores tubulares, proporcionando maior potencial de produção de biogás e ainda, maior teor de metano no biogás. Observou ainda que, ocorreu aumento de 28% na produção de biogás kg^{-1} de ST adicionados quando o TRH passou de 15 para 36 dias.

Segundo Silva (2014), a digestão anaeróbia ocorre apenas na fração orgânica do material desse modo quanto maior a quantidade de sólido voláteis (SV) maior a produção de biogás, visto que, conforme ressaltado por Oliveira e Higarashi (2006) os SV compreendem a aproximadamente 70 a 75% dos sólidos totais dos dejetos suinícolas, dependendo do tempo de retenção hidráulica.

Com relação a digestão anaeróbia das cargas orgânicas, para transformar a biomassa em energia, existem diversas tecnologias, sendo os processos mais utilizados os termoquímicos e biológicos (ALMEIDA, 2016).

Sobre a microbiologia da digestão anaeróbia, diversos grupos de microrganismos se organizam e interagem para a conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia. Também ocorre a atividade conjunta de três grupos de microrganismos, as bactérias fermentativas acidogênicas, as bactérias acetogênicas e as metanogênicas (LOBATO, 2011).

As rotas metabólicas e os grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia descrito por Chernicharo (2007), podem ser observados na Figura 6, onde mostra-se na primeira etapa as atividades das bactérias fermentativas acidogênicas, que realizam a hidrólise do material orgânico particulado, resultando em açúcares, aminoácidos e ácidos graxos solúveis. Na segunda etapa, evidencia-se a importância dos microrganismos acetogênicos onde, cerca de 60 a 70% dos elétrons do substrato de abastecimento são direcionados para produzir acetato e conseqüentemente a remoção da DQO em fase líquida que depende da conversão de acetato em metano, trabalho este realizado pelos microrganismos metanogênicos acetoclásticos.

Seguindo para a terceira etapa, apresenta-se a metanogênese onde, o acetato e o hidrogênio produzidos nas etapas anteriores são convertidos em metano e dióxido de carbono pelas arqueas metanogênicas (CHERNICHARO, 2007).

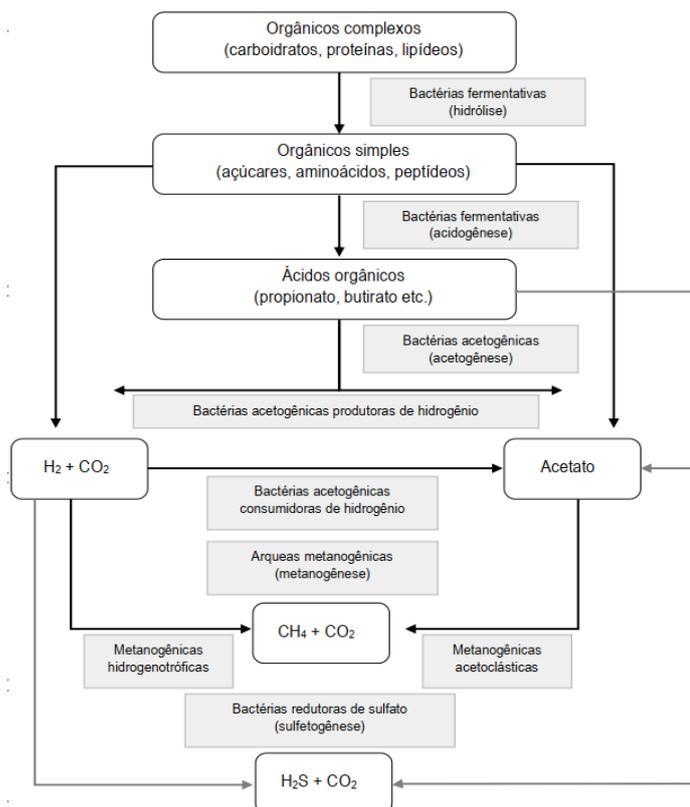


Figura 6 - Rotas metabólicas e grupos microbianos na digestão anaeróbia.

Fonte: Chernicharo (2007).

2.4 Biogás e suas características

O biogás conhecido também como gás dos pântanos é um combustível que vem sendo usado a muitos anos como fonte de energia (PECORA, 2006). Tendo registro de descoberta em 1667, e somente 100 anos após voltou a ser reconhecido pela constatação do metano (CH_4) em sua composição (CLASSEN *et al.*, 1999).

Também descrito por Pecora (2006), o pesquisador Louis Pasteur e seu aluno Ulysse Grayon em 1884, ao apresentar os trabalhos de fermentação para à Academia das Ciências, consideraram que esta energia poderia ser usada como uma fonte de aquecimento e iluminação. Segundo Nogueira (1986), Ulysse Grayon ao continuar as pesquisas no século XIX, realizou outra fermentação anaeróbia misturando dejetos e água aquecendo em temperatura de $35\text{ }^\circ\text{C}$, obtendo 100 litros de gás por m^3 .

Posterior aos anos 70, devido à crise do petróleo, o Brasil buscou alternativas em tecnologia da digestão anaeróbia onde, o Nordeste implantou vários programas para divulgar os biodigestores, contudo os resultados obtidos com o biogás e o biofertilizante não foram satisfatórios e, ocorreu a descontinuidade dos programas (BOLETIM ENFOQUE, 1999). Nos dias atuais, o biogás foi retomado fortemente com

implementação em vários países, como uma fonte alternativa de energia térmica e elétrica.

Em estudos Almeida (2016), buscou conhecer a produção de biogás a partir de biomassa de suinocultura com a adição de culturas energéticas e observou, quando o biogás tem em sua composição a presença do CH₄ maior que 60%, o motor aumenta o seu rendimento (MARCHAIM, 1992; SUZUKI *et al.*, 2011).

Sobre a composição do biogás Castanón (2002), observou a composição média dos gases presentes sendo, para o Metano (CH₄) 60%; Dióxido de carbono (CO₂) 35%; Hidrogênio (H) 2,30 %; Nitrogênio (N) 1,5%; Oxigênio (O₂) 0,55%; Ácido sulfídrico (H₂S) 0,30%; Amônia (NH₃) 0,30% e 0,05% de Monóxido de carbono (CO). Observou também Broetto (2019), a composição predominantemente para o metano (CH₄) 50 a 70%; Dióxido de carbônico (CO₂) 30 a 40%; Nitrogênio (N) 0 a 10%; Sulfeto de hidrogênio (H₂S) 0 a 1% e vapor de água cerca de 0,3%.

Na Figura 7, estão apresentados a relação da composição do substrato e a composição do biogás conforme variação dos diferentes tipos de biomassa (LINS *et al.*, 2015).

| Biomassa residual (efluente) | Composição Biogás | | |
|--|---------------------|---------------------|------------------------|
| | CH ₄ - % | CO ₂ - % | H ₂ S - ppm |
| Amidonaria (mandioca) | 54,3 | 44,9 | 97,0 |
| Bovinocultura leiteira | 59,6 | 39,1 | 329,3 |
| Misto (aves de postura + bovinocultura de corte) | 69,2 | 29,8 | 64,1 |
| Abatedouro de aves | 68,2 | 29,6 | 1897,1 |
| Suinocultura - terminação | 62,0 | 37,0 | 2.782,3 |
| Suinocultura - produção de leitões | 68,4 | 30,6 | 1.309,1 |

Figura 7 - Composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa.

Fonte: Lins *et al.* (2015).

O poder calorífico do biogás está baseado na maior concentração de metano, quando na faixa de 50 a 80% (CH₄) o poder calorífico encontra-se entre 4,95 e 7,9 kWh.m⁻³. Já, somente o metano possui de 9,9 kWh.m⁻³ (CREMONEZ, 2015).

Com relação as propriedades físico-químicas do (CH₄) metano é um gás incolor e inodoro, densidade 0,717 g.L⁻¹, pressão de vapor de 760 mmHg a -161 °C, massa molar 16,042 g.mol⁻¹, ponto de ebulição -161,53 °C e ponto de fusão -182,6 °C, sendo o principal gás causador do efeito estufa (BECKER, 2013).

Comparando o potencial energético do biogás com outras fontes de combustíveis tem-se os dados da Tabela 2. Em seu estudo Meyer *et al.* (2017), destaca que uma das vantagens na queima do metano (CH_4) é a conversão em dióxido de carbono (CO_2), e não em monóxido de carbono (CO) que possui mais propriedades tóxicas (COELHO *et al.*, 2006).

Tabela 2 - Equivalência energética do biogás.

| Combustível | Biogás 1 m ³ |
|----------------------|-------------------------|
| Gasolina (L) | 0,61 |
| Querosene (L) | 0,62 |
| Óleo Diesel (L) | 0,55 |
| Gás de cozinha (L) | 1,43 |
| Lenha (kg) | 3,5 |
| Álcool hidratado (L) | 0,8 |
| Carvão natural (kg) | 0,74 |

Fonte: Meyer *et al.* (2017); Inoue (2008).

O gás carbônico ou dióxido de carbono (CO_2) é um dos gases mais comuns no ambiente segundo Iannicelli (2008), sendo gerado na queima de combustíveis fósseis, respiração de animais e plantas, produção de energia, também é o segundo gás com maior problema para o efeito estufa.

As propriedades físico-químicas do CO_2 compreendem em um gás incolor, inodoro, densidade 1,99 kg. L⁻¹, pressão de vapor 60,16 kgf.cm⁻², massa molar 44,010 g.mol⁻¹, ponto de ebulição -56,55 °C a 5,18 bar e ponto de sublimação -56,57 °C a 5,30 bar (MEYER *et al.*, 2017; BECKER, 2013).

Na Tabela 3 estão os percentuais do metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) nas diferentes composições químicas do biogás, com a sua equivalência média energética, através do potencial calorífico inferior (PCI). O indicador PCI é a energia liberada na forma de calor, desconsiderando a energia que gastou na vaporização da água, a qual é formada em uma reação de oxidação (MEYER *et al.*, 2017).

Tabela 3 - Porcentagem de CH₄ e CO₂ com suas Densidade e PCI.

| Composição Química Biogás | Densidade (kg/m³) | PCI (kcal/kg) |
|--|-------------------------------------|----------------------|
| 10%CH ₄ 90% CO ₂ | 1,8393 | 465,43 |
| 40%CH ₄ 60% CO ₂ | 1,4600 | 2.333,85 |
| 60%CH ₄ 40% CO ₂ | 1,2143 | 4.229,98 |
| 65%CH ₄ 35% CO ₂ | 1,1518 | 4.831,14 |
| 75%CH ₄ 25% CO ₂ | 1,0268 | 6.253,01 |
| 95%CH ₄ 05% CO ₂ | 0,7768 | 10.469,60 |
| 99%CH ₄ 01% CO ₂ | 0,7268 | 11.661,02 |

Fonte: Meyer *et al.* (2017); Iannicelli (2008).

A equivalência de 1m³ de biogás com 70% de CH₄, representam 5,5 kW/h de eletricidade, 0,6 litros de óleo combustível, 1,6 kg de lenha, 0,20 m³ de butano, 0,26 m³ de propano, 0,62 m³ de gás natural (CCE, 2000).

Na Tabela 4, conforme estudado por Alves (2007) e adaptado de Zago (2003), tem-se o consumo médio do biogás em algumas formas de usos.

Tabela 4 - Consumo médio de biogás segundo o uso.

| Uso | Consumo |
|-----------------------|---|
| Motor a explosão | 0,370 m ³ /cv/h |
| Iluminação | 170 m ³ /camisa de 100 watts/h |
| Cozimento | 0,340 m ³ /pessoa/dia |
| Forno de assar | 0,420 m ³ /h |
| Aquecedor de ambiente | 0,227 m ³ /h |
| Chuveiro a gás | 0,150 m ³ /pessoa |

Fonte: Adaptado de Zago (2003).

Conforme a Embrapa (2021), os dejetos de animais, como suínos, aves e bovinos de leite, podem ser tratados com sucesso em biodigestores, produzindo biogás e biofertilizante (subproduto do processo), o estudo aborda também que para cada 1 m³ de biogás equivalem a 0,66 litros de diesel ou 0,7 litros de gasolina, possuindo um poder calorífico entre 5.000 a 7.000 kcal/m³.

Conforme Becker (2013), o sulfeto de hidrogênio (H₂S) é outro gás que gera o efeito estufa, é encontrado em pequena quantidade no biogás, porém indesejável devido seu poder de corrosão, variando com a composição da biomassa utilizada no processo. É incolor, inflamável, odor desagradável e muito agressivo, densidade 1,363

$\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$, pressão de vapor 1.740 kPa (a 21°C), massa molar 34,08 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, ponto de liquefação - 82,0 °C e ponto de ebulição - 60,0 °C, solubilidade em água 4,0 $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ (a 20 °C), calor específico de 1,003 $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\text{g}^{-1}$.

No uso do biogás para a combustão a concentração de H_2S tem influência e restrições para cada tecnologia a ser usada, conforme observa-se na Tabela 5 (ARIAS, 2010).

Tabela 5 - Usos do biogás e requisitos de concentrações de H_2S .

| Tecnologia | | Requisitos |
|------------|------------------------------|---|
| 1. | Aquecimento queima caldeira | $\text{H}_2\text{S} < 1000$ ppm; Pressão de 0,8 - 2,5 kPa; necessária a remoção de vapor d'água; para fogões de cozinha, $\text{H}_2\text{S} < 10$ ppm. |
| 2. | Motores de Combustão interna | $\text{H}_2\text{S} < 100$ ppm; necessária a remoção de vapor d'água e siloxanos; motores de quatro tempos são mais suscetíveis ao H_2S que motores a diesel. |
| 3. | Microturbinas | Tolerância a H_2S até 70.000 ppm; índice de Wobbe 350 $\text{BTU}\cdot\text{scf}^{-1}$; 520 kPa de pressão; necessária a remoção de vapor d'água e siloxanos. |
| 4. | Células de Combustível | PEM (Membrana Eletrolítica Polimérica) $\text{CO} < 10$ ppm, além de necessária remoção H_2S . PAFC (Célula de Combustível Ácido Fosfórica) $\text{H}_2\text{S} < 20$ ppm, $\text{CO} < 10$ ppm, halogênios < 4 ppm. MCFC (Célula de Combustível de Carbonato Fundido) $\text{H}_2\text{S} < 10$ ppm em combustível, halogênios < 1 ppm. SOFC (Célula de Combustível Óxido Sólido) $\text{H}_2\text{S} < 1$ ppm, halogênios < 1 ppm. |
| 5. | Similar ao gás Natural | $\text{H}_2\text{S} < 4$ ppm; $\text{CH}_4 > 95\%$; $\text{CO}_2 < 2\%$; $\text{H}_2\text{O} < 0,00005$ ppm; necessária a remoção de partículas e siloxanos > 3.000 kPa de pressão. |

Fonte: Arias (2010).

Para a remoção do H_2S do biogás, podem ser utilizados métodos biológicos, químicos e físicos conforme descrito pelo INSTITUT FÜR WÄRMETECHNIK IWT (2006), e abaixo especificados.

Processo Seco: Adsorção, adsorção com reação química, adsorção com reação química e oxidação, catálise adsorptiva.

Processo Úmido: Lavagem física, lavagem químico física, lavagem química neutralizadora, lavagem química oxidativa.

Processos Biológicos: Dessulfurização biológica.

Processo Membrana: Processo de separação por membrana, absorção por membrana a baixa pressão.

3. Material e métodos

3.1 Considerações da área de estudo

O presente estudo em escala real ocorreu durante os meses de setembro e outubro, finalizando o período de inverno e início da primavera para observar o comportamento das temperaturas durante 20 dias, onde o biodigestor lagoa coberta circular foi primeiramente abastecido com os dejetos vindos da UPL e da Terminação, e posteriormente iniciou-se a coleta de informações. O estudo ocorreu em uma granja de suínos considerada de grande porte, localizada no município de Palma Sola, Santa Catarina, (Latitude 26°17'12.08"S e Longitude 53°17'28.47"O).

As pocilgas foram construídas inicialmente no ano de 2006 em uma área de 23 hectares, sendo o piso em alvenaria em forma de grelha com alojamento para 3.500 fêmeas suínas (UPL), produzindo 100.000 leitões/ano, são terminados 40.000 suínos/ano, destes são comercializados 28.000 cabeças como fêmeas reprodutoras e 12.000 são abatidos (Figura 8). A atividade gerou média 165 m³ de dejetos/dia, sendo 45 m³ vindo da terminação e 120 m³ da unidade de produção de leitões.

A pesquisa avaliou a produção do biogás, e o comportamento das cargas orgânicas dos dejetos da UPL e Terminação através do uso de um biodigestor lagoa coberta circular, com capacidade de 2.835 m³ e TRH 26 dias, com mistura completa, isolamento térmico e sistema de aquecimento, onde a sua operacionalidade e as questões construtivas são semelhantes ao Reator de Tanque com Agitação Contínua (CSTR).

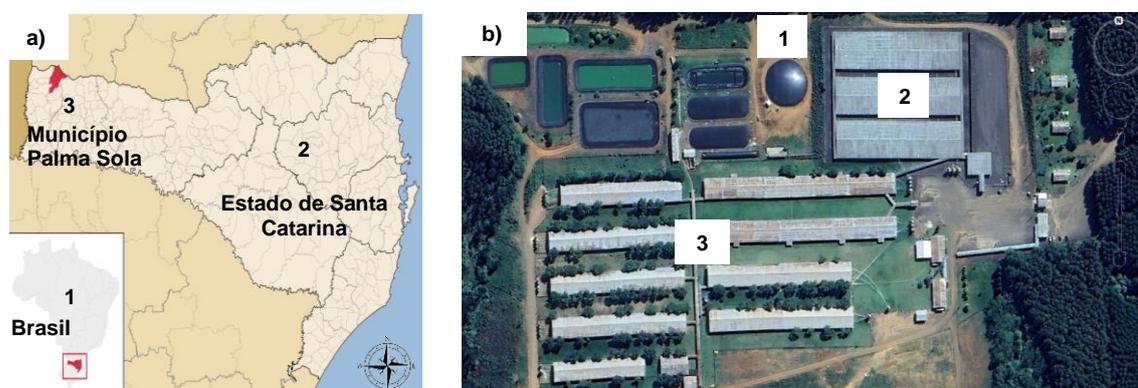


Figura 8 - a) Visualização área de estudo: 1 - Localização no País, 2 - Estado e 3 - Município b) Projeto de pesquisa: 1 – Biodigestor circular, 2 - Terminação e 3 - UPL.

Fonte: Google Earth Pro (2023).

3.2 Caracterização da pesquisa

A pesquisa constou de 1 (uma) caixa em alvenaria capacidade armazenamento 80 m³, 1 (um) tanque de Poliéster (Prfv) reforçado com fibra de vidro em filamentos contínuos com capacidade 120 m³, ambos para recebimento e gestão das cargas orgânicas vindas das instalações UPL e terminação, biodigestor circular (Figura 9).

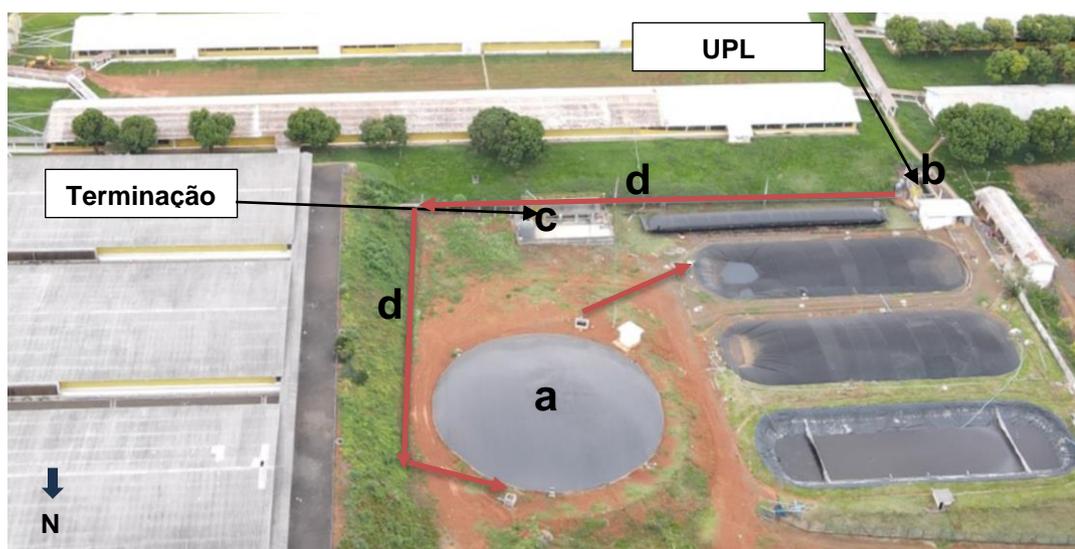


Figura 9 - Equipamentos do projeto: a - Biodigestor circular, b - Caixa de 80 m³, c - Tanque de 120 m³, d - Tubulações Terminação e UPL.

Posteriormente a quantificação de volume, direcionou-se os dejetos para o biodigestor lagoa coberta com formato circular e capacidade de armazenamento de 2.835 m³, revestido com geomembrana PEBDL de 1,25 mm na cúpula e 1,00 mm no solo, isolamento térmico com poliestireno expandido (EPS) espessura 5 cm instalado no fundo e na lateral do solo, com válvula de segurança que controlou a pressão interna do biodigestor (Figura 10).

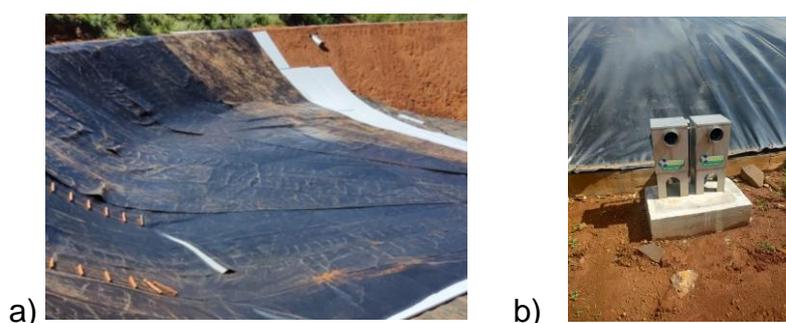


Figura 10 - a) Isolamento térmico do reator e b) válvula de segurança pressão.

O aquecimento da água ocorreu através da cogeração, sendo instalado um trocador de calor no prolongamento do cano de escapamento dos gases do motogerador de energia elétrica, onde realizou o aquecimento da água circulante no sistema recebendo a energia térmica presente nos gases, a água quente foi armazenada em 1 boiler com 20 m³ de capacidade, distante 300 m do biodigestor de lagoa coberta circular (Figura 11).



Figura 11 – Gerador de energia elétrica a Biogás e cogeração de calor água. a) Grupo motogerador, b) Sistema de cogeração e c) Boiler de armazenamento água.

O transporte da água quente no sistema foi com 1 (uma) bomba de 1 cv e 1 (um) painel de automação, a rede principal teve isolamento térmico em poliuretano na tubulação, também fixado na parte interna da geomembrana de revestimento do biodigestor mangueira PEX (Polietileno Reticulado) de 20 mm, operando em circuito fechado. O volume de água quente que circulou no biodigestor foi de 5,5 m³ com a demanda de 137.500 kcal (Figura 12).



Figura 12 - Equipamentos: a) Painel de automação da temperatura, b) Sistema de controle (T °C) entrada e saída da água quente, c) Aquecimento dentro biodigestor.

O sistema de revolvimento da massa ocorreu através de agitadores mecânicos 10 cv, com programação de acionamento durante 15 minutos das (06:00 às 06:15 h) e (12:00 às 12:15 h) e durante 30 minutos das (18:00 às 18:30 h) e (00:00 às 00:30 h). Por ser um biodigestor novo, as agitações foram programadas de modo a constituir uma manta de lodo e devido ao dejetos estudado não ter alto percentual de sólidos ou materiais flotantes, não demandou a agitação contínua da massa (Figura 13).



Figura 13 - Sistema de revolvimento da massa com os agitadores.

O digestato da saída do biodigestor lagoa coberta circular seguiu em fluxo contínuo com 3 (três) biodigestor modelo fluxo pistão. Para fins de monitoramento da produção diária de biogás, instalou-se 1 (um) ponto na tubulação que transporta o biogás entre o bio circular e os 3 bios fluxo pistão (Figura 14).



Figura 14 - Ponto de medição da produção do biogás.

O biogás produzido é direcionado para o sistema de filtragem com processos físicos, químicos e biológicos de dessulfurização.

Na Figura 15 (a), o processo físico do secador retirou por gravidade a umidade, fazendo com que vapor fosse condensado e resfria-se o gás. No processo químico o filtro de carvão ativado absorveu o sulfeto de hidrogênio, e a saturação dependeu dos níveis de H_2S no biogás.

O sistema biológico (Figura 15 b) ocorreu com a inserção de ar em volume de 3.000 litros/hora instalados em 4 pontos e posterior ação das bactérias *Sulfobacter Oxydans*, convertendo o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar (INSTITUT FÜR WÄRMETECHNIK IWT, 2006).

Em seguida o biogás filtrado foi usado como combustível para o motogerador, onde consumiu $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ entregando 17.457 kWh mensal operando 20 horas por dia em geração de energia elétrica *off grid*.

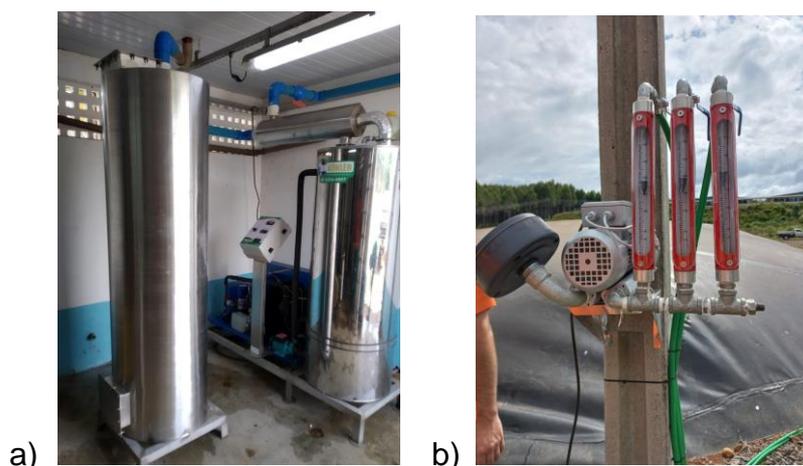


Figura 15 - Sistema de filtragem e redução do H_2S . a) Filtragem do biogás b) Inserção de oxigênio nos biodigestores.

3.3 Manejo dos efluentes

O manejo dos efluentes (dejetos de suínos) retidos nas calhas (fosso com dejetos) das construções na gestação, maternidade, creche e terminação, seguiram a programação e operacionalidade que a granja realiza no seu cotidiano. Tendo assim uma operação descontinua de volumes e concentrações direcionados para a caixa de homogeneização e tanque e, posterior bombeamento para o biodigestor circular.

As edificações foram manejadas de segunda a sexta-feira, seguindo a escala de liberação das calhas conforme programação de manejo dos dejetos apresentados

na Tabela 6. O volume dos dejetos gerados aos sábados e domingos foram remanejados para a segunda-feira.

Tabela 6 - Cronograma de manejo dejetos das calhas nas edificações.

| PROGRAMAÇÃO MANEJO DEJETOS | | | | | | | |
|----------------------------|---------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|
| Edificações | Segunda | Terça | Quarta | Quinta | Sexta | Sábado | Domingo |
| Gestação | X | X | X | X | | S/M | S/M |
| Maternidade | | X | | X | | S/M | S/M |
| Creche | X | X | | | | S/M | S/M |
| Terminação | X | | X | | X | S/M | S/M |

* S/M – Sem manejo dos dejetos.

Na unidade de produção de leitões (UPL) que compreendem as edificações da gestação, maternidade e creche, o tempo de retenção hidráulica dos dejetos nas calhas ocorreu de 7 a 15 dias.

Já, o manejo da terminação teve o tempo de retenção hidráulica variável entre 25 a 30 dias, devido as características do projeto construtivo com o piso da calha plano sem inclinação em formato de grelha, característica que apresentou ser dependente da altura da lâmina dos dejetos para o escoamento total dos efluentes. Nas edificações da terminação realiza-se o controle de ambiência.

3.4 Características da terminação com ambiente controlado

As edificações da terminação apresentam tecnologia que possibilitou controlar o ambiente. Na Figura 16, apresenta-se de forma esquemática as divisões das baias (salas) de idade de alojamento dos suínos, bem como o manejo das calhas (fosso), que precisou da altura da lâmina para seu escoamento dos dejetos.

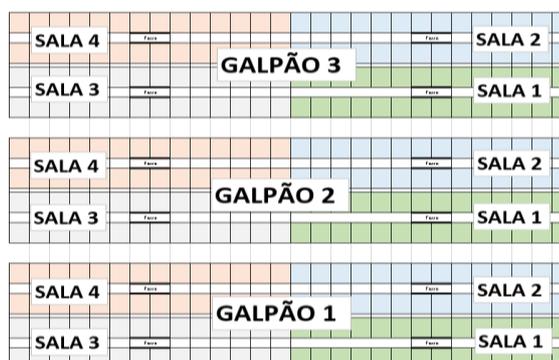


Figura 16 - Galpões 1, 2 e 3 da Terminação, suas divisões em salas e as calhas/fosso de manejo.

Na Tabela 7, encontram-se as programações das temperaturas contendo a idade de alojamento dos suínos e sua necessidade de calor. Na, Tabela 8 localizam-se os indicadores das temperaturas desejada, externa, sensor, umidade, dejetos e a concentração CO₂.

Tabela 7 - Ajustes da temperatura e idade dos suínos.

| Ajustes Temperatura | | |
|----------------------------|-------------------|-------------|
| Ponto | Idade Dias | T °C |
| P00 | 0 | 22,0 |
| P01 | 8 | 21,5 |
| P02 | 15 | 21,0 |
| P03 | 22 | 20,0 |
| P04 | 29 | 19,5 |
| P05 | 36 | 19,0 |
| P06 | 43 | 18,0 |
| P07 | 50 | 17,5 |
| P08 | 57 | 17,0 |
| P09 | 90 | 16,5 |

Tabela 8 - Parâmetros (T °C) e suas medições nos galpões e salas da terminação.

| Parâmetros | GALPÃO 1 | | | | GALPÃO 2 | | | | GALPÃO 3 | | | |
|-----------------------------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| | Sala 1 | Sala 2 | Sala 3 | Sala 4 | Sala 1 | Sala 2 | Sala 3 | Sala 4 | Sala 1 | Sala 2 | Sala 3 | Sala 4 |
| Idade (dias na terminação) | 75 | 47 | 80 | 63 | 40 | 19 | 33 | 26 | 9 | 83 | 0 | 89 |
| Temperatura desejada (°C) | 17,8 | 19,2 | 17,7 | 18 | 19,7 | 21,2 | 20,2 | 20,7 | 21,7 | 19,8 | 22 | 16,6 |
| Temperatura Externa (°C) | 18,6 | 19,3 | 19,2 | 19,9 | 20,8 | 22,1 | 20,8 | 21,9 | 21,4 | 21,2 | 18 | 18,2 |
| Temperatura Sensor T (°C) | 18,0 | 17,6 | 17,8 | 19,1 | 19,8 | 21,4 | 19,6 | 20,6 | 20,2 | 20,1 | 16,8 | 17,2 |
| Temperatura Sensor TU (°C) | 19,3 | 21,0 | 20,6 | 20,7 | 22 | 22,9 | 22,2 | 23,2 | 22,5 | 22,3 | 19,3 | 19,2 |
| Temperatura do dejetos (°C) | 17,2 | 17,1 | 20,2 | 16,9 | 18 | 19,7 | 18,9 | 21,4 | 18,7 | 20,6 | 16,1 | 16,9 |
| Umidade Sensor TU (%) | 60 | 56 | 55 | 57 | 61 | 63 | 66 | 54 | 62 | 55 | 77 | 64 |
| CO ₂ (ppm) | 658 | 690 | 656 | 690 | 676 | 1090 | 1052 | 1166 | 1338 | 1118 | 1764 | 538 |
| Abertura de cortina (%) | 40 | 30 | 17 | 21 | 28 | 19 | 7 | 36 | 29 | 45 | 29 | 70 |

As leituras registradas na Tabela 8 no dia 19/04/23 às 14:15 h, seguem apresentadas por galpões 1, 2 e 3, bem como as divisões de suas salas. Ao serem manejadas as calhas, observou-se que ocorreu pouca variação nas temperaturas do dejetos reduziu para faixa média de 18,47 °C e com mínima de 16,1 °C. A observação das temperaturas da ambiência é relevante para o estudo uma vez que influenciam na temperatura dos dejetos.

3.5 Coleta dos dados

Para os registros diários da produção de biogás utilizou-se o Medidor de Vazão Tipo Thermal para gás série FT2A devidamente calibrado (Figura 17).



Figura 17 - Medidor de vazão tipo thermal para gás série FT2A.

As informações quantificadas nas leituras da produção correlacionaram-se com as análises físico químicas: pH, DQO, ST (sólidos totais), SV (sólidos voláteis totais), Alcalinidade, Sólidos Sedimentáveis e Temperaturas na entrada dos dejetos da UPL, entrada da terminação e saída do biodigestor de lagoa coberta circular.

Uma vez que estas variáveis estão interligadas com a quantidade de biogás produzida, ou seja, quanto maior a remoção da carga orgânica, maior a produção do biogás, ainda, quanto maior a DQO removível, disponível para os microrganismos, maior a conversão bioquímica da carga orgânica em biogás (SPRENGER, 2009; LOPES *et al.*, 2011; MEYER *et al.*, 2017).

O potencial bioquímico de metano – BMP, foi realizado na entrada do biodigestor em amostra composta dos efluentes gerados na granja e na saída do biodigestor, com o objetivo precípua de quantificar o potencial da biomassa aplicada no biodigestor de lagoa coberta circular (efluente bruto) e ainda, quanto ao residual a ser direcionado para os reatores de fluxo pistão que compõem a estação de tratamento da unidade.

A densidade das cargas foi quantificada com densímetro Incoterm para massa específica 1,000/1, modelo 5582 (Figura 18).



Figura 18 - Densímetro para massa específica 001 5582.

Os sólidos sedimentáveis foram quantificados com o intuito de avaliar o comportamento das massas injetadas, pois junto a eles estão os materiais recalcitrantes, que são compostos orgânicos de difícil degradação. Para esta medição usou-se o Cone Imhoff graduado (Figura 19).



Figura 19 - Cone Imhoff graduado para análise sólidos sedimentáveis.

A temperatura do sistema de aquecimento do biodigestor de lagoa coberta circular foi aferida no boiler de armazenamento da água quente com termômetro instalado no tanque (Figura 11 c), nos dejetos brutos direcionados ao biodigestor e nos efluentes da saída do biodigestor, utilizando o termômetro infravermelho laser digital TC 0380 com leituras de -50 a 380°C (Figura 20).

Verificou-se a temperatura da água na entrada e saída do biodigestor, a temperatura do dejetos interno no bio, usando o painel de automação de temperatura

(Figura 12 a). As leituras foram realizadas as 8:30 h e as 13:30 h. Todos os equipamentos estavam calibrados.



Figura 20 - Termômetro infravermelho laser digital modelo TC 0380.

Com o monitor de extração de gases GEM5000 (Figura 21) foi possível conhecer a concentração dos gases que compõem o biogás gerado, ou seja, CH₄, CO₂, O₂, H₂S e Bal (balanço dos demais gases). Sendo a análise realizada in loco em ponto de avaliação posicionado após o sistema de filtragem do gás, visando avaliar o biogás utilizado para as fontes de energia térmica e elétrica.

Para a investigação do potencial bioquímico de metano (BMP) analisou-se com laboratório externo, em condições controladas de estudo com o intuito de definir as máximas produções que a biomassa poderia entregar ao sistema, comparando com aquelas obtidas em escala real do estudo.



Figura 21 - Monitor GEM5000 de extração de gases.

Nesta pesquisa avaliou-se 14 parâmetros quantitativos e físico-químicos sendo, volume dejetos (m³/dia), densidade dejetos bruto (kg/m³), massa injetada (Ton)

foi obtida da multiplicação do volume dejetos pela sua densidade, pH dejetos bruto, temperatura dejetos ambiente (°C), temperatura ambiente média (°C), sólidos sedimentáveis entrada reator (mL/L), sólidos voláteis totais (mg/L), demanda química oxigênio - DQO (mgO₂/L), produção de biogás (m³_N.d⁻¹), temperatura do boiler (°C), temperatura da água na entrada do reator (°C), temperatura da água na saída do reator (°C), temperatura do dejetos interno reator (°C), e a temperatura do efluente na saída do reator (°C).

Parte dos dados foram obtidos em campo e, parte em ensaios laboratoriais, atentando-se para as coletas representativas, acondicionamento de amostras adequado e período de análise.

Para melhor conhecer o comportamento da temperatura da água na entrada e saída do sistema de aquecimento do reator, usou-se as informações da faixa considerada de melhor produção para o biogás, as quais foram aplicadas o tratamento estatístico do programa Sisvar versão 5.8, onde adotou-se o teste Tukey com 5% de significância, que possibilitou observar as diferenças nos valores de produção, tanto nas linhas onde estão as temperaturas da água de entrada como nas colunas as temperaturas da água de saída.

Também utilizou-se do programa Sisvar versão 5.8 aplicando o teste Tukey com 5% de significância para conhecer as produções de biogás nas diferentes faixas de pH.

Cabe salientar também que no dia 11/09/23, quando iniciou a pesquisa, os dados indicados na Tabela 9, para os parâmetros produção de biogás (m³_N.d⁻¹) e temperatura do efluente na saída do reator (°C), tem-se que não realizou-se leituras devido ser o primeiro dia da pesquisa.

Neste dia o medidor de vazão tipo thermal para gás série FT2A foi zerado iniciando o registro de produção de biogás a partir desta data, bem como a saída de dejetos do reator esteve diretamente condicionada ao abastecimento do mesmo, tendo assim compilação de dados a partir do dia 12/09/23 para estes parâmetros.

Para os cálculos da eficiência do reator através da redução da DQO, foi utilizado a equação 1 a seguir.

$$Eficiência_{reator} = \left(\frac{DQO_{m\u00e9dia\ entrada\ reator} - DQO_{m\u00e9dia\ sa\u00edda\ reator}}{DQO_{m\u00e9dia\ entrada\ reator}} \right) \times 100 \quad Eq. 1$$

A composição do custo de 1 Nm³ de biogás, considerou-se dois fatores nas despesas, ou seja, Custo 1 composto por mão de obra e Custo 2 formado pelas manutenções, apresentadas nas equações 2 e 3 com seus indicadores.

$$Custo\ 1 = \left[\left(\frac{\text{custo mão de obra}}{n^{\circ} \text{ horas mês}} \right) \times \text{jornada diária} \right] \div \text{produção biogás}_{1\ e\ 2\ \text{dia}} \quad \text{Eq. 2}$$

Indicadores do custo 1:

- Custo da mão de obra (salário + encargos) = R\$ 7.000,00

- Nº horas trabalhado no mês = 220 horas

(Para operar todo o sistema que compreende os biodigestores e digestato, sistema de filtragem do biogás, geração de energia elétrica e gestão das campânulas para aquecimento)

- Jornada diária = 8 horas

- Produção biogás_{1 e 2} dia = 1.134,99 Nm³

Obs₁. Produção biogás₁ dia = 635,62 Nm³ (valor da produção diária obtida no estudo do biodigestor lagoa coberta circular)

Obs₂. Produção biogás₂ dia = 499,37 Nm³ (média de produção diária de 3 biodigestores fluxo pistão sem aquecimento estudado por Soares (2016), os mesmos encontram-se operando em série com o atual biodigestor de lagoa coberta circular, fazendo parte de todo o sistema operacional.

$$Custo\ 2 = \left(\frac{20\% \text{ do valor deixado pagar CELESC 2023} + 40\% \text{ receita bruta sobre do biogás convertido kg GLP ano}}{\text{produção biogás}_{1\ e\ 2\ \text{ano}}} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Indicadores do custo 2:

- 20% do valor deixado de pagar a CELESC no ano 2023 = R\$ 27.232,92

(Aplicou-se esta taxa sobre o valor deixado de pagar R\$ 136.164,60 (receita), para realizar as manutenções do sistema operacional da GEE)

- 40% da receita bruta sobre do biogás convertido kg GLP ano = R\$ 107.356,87

(Esta taxa aplicada sobre o valor de R\$ 268.392,17 (receita), foi para realizar as manutenções dos equipamentos e o sistema de produção do biogás)

- Produção biogás_{1 e 2} ano = 408.596,40 Nm³

Obs₁. Com a GEE *off grid*, não precisou consumir energia elétrica da rede, evitando pagar para a concessionária CELESC no ano = R\$ 124.817,55

(Gerou 192.027 kWh de energia elétrica ano x R\$ 0,65 valor médio do kWh ano 2023)

A seguir, as equações 4, 5 e 6 e seus indicadores para cálculo das receitas para as amortizações, onde, usou-se os valores da geração de energia elétrica *off grid* e o excedente do biogás, o qual não foi usado para a GEE no ano, e possibilitou receita na substituição do GLP para aquecimento dos leitões, aquecer água dos chuveiros e uso no fogão da cozinha.

$$\text{Receita 1} = (\text{valor deixado pagar CELESC ano}) - (\text{custo do biogás para gerar a EE}) \quad \text{Eq. 4}$$

Indicadores da receita 1:

- Valor deixado de pagar a concessionária CELESC ano = R\$ 136.164,60
- Custo do biogás para a geração da energia elétrica = R\$ 180.840,00
(330.000 Nm³ biogás usado ano na GEE x R\$ 0,548 por Nm³)

Logo, o cálculo e os indicadores para uso do excedente de biogás na substituição do GLP que compôs a receita 2, com as equações 5 e 6:

$$\text{Excedente biogás} = (\text{biogás produzido ano}) - (\text{consumo do biogás para GEE ano}) \quad \text{Eq. 5}$$

Indicadores para cálculo do excedente do biogás:

- Biogás produzido ano = 408.596,40 Nm³
- Consumo de biogás para geração da energia elétrica ano = 330.000 Nm³

O excedente do biogás foi de 78.596,40 Nm³, convertido em kg de GLP, usando o fator de conversão 2,7 obtido do (kcal_{GLP} ÷ kcal_{Biogás}), onde, 1 kg de GLP tem um poder calorífico entre 10.800 a 11.750 Kcal/kg, usou-se a média 11.275 Kcal/kg.

Os parâmetros do biogás médio medido na pesquisa foi 60,20% (CH₄), 31,46% (CO₂), 0,60% (O₂), 80,40 ppm (H₂S) e Bal 7,78% realizado com o Monitor GEM5000, sendo que, uma composição de biogás com 60% de CH₄ e 40% de CO₂ possui 4.229,98 Kcal/kg (MEYER *et al.*, 2017).

Com a conversão de 78.596,40 Nm³ excedente biogás ÷ 2,7 fator conversão, ficou o volume de 29.109,78 kg de GLP, usado para formar a receita 2, na equação 6.

Receita 2 = (excedente do biogás convertido kg GLP ano x valor médio kg GLP) – despesa produzir excedente biogás **Eq. 6**

Indicadores da receita 2:

- Excedente do biogás convertido kg GLP ano = 29.109,78 kg de GLP
- Valor médio do kg GLP ano 2023 = R\$ 9,22
- Despesa para produzir excedente do biogás = R\$ 43.078,83
(78.596,40 Nm³ excedente do biogás ano x R\$ 0,548 valor de 1 Nm³ de biogás)

4. Resultados e discussões

Os indicadores obtidos durante a pesquisa apresentam-se na Tabela 9, onde analisou-se os seus efeitos para a produção do biogás.

Tabela 9 - Indicadores da Produção do Biogás.

| Data | Dia da Semana | Dia da Pesquisa | Volume Dejetos (m ³ /dia) | Densidade Dejeito Bruto (kg/m ³) | Massa Injetada (Ton) | pH Dejeito Bruto | T Dejetos Ambiente (°C) | T Ambiente Média (°C) | SS Entrada Reator (mL/L) | SV Totais (mg/L) | DQO (mgO ₂ /L) | Produção Biogás (m ³ _N .d ⁻¹) | T Boiler 20 m ³ (°C) | T Água Entrada Reator (°C) | T Água Saída Reator (°C) | T Dejeito Interno Reator (°C) | T Efluente Saída Reator (°C) |
|----------|---------------|-----------------|--------------------------------------|--|----------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|---------------------------|---|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 11.09.23 | Segunda | 1 | 151,92 | 1.013 | 153,89 | 8,61 | 23,9 | 26,5 | 1.000 | 33.262,00 | 89.400,00 | * | 32 | 34,0 | 23,0 | 24,0 | ** |
| 12.09.23 | Terça | 2 | 117,33 | 1.014 | 118,91 | 7,34 | 22,9 | 25,0 | 1000 | 38.373,43 | 77.700,00 | 442,31 | 34 | 34,0 | 24,0 | 24,5 | 26,0 |
| 13.09.23 | Quarta | 3 | 125,92 | 1.016 | 127,87 | 7,93 | 20,5 | 21,3 | 1000 | 47.044,00 | 90.000,00 | 656,70 | 30 | 30,0 | 23,0 | 24,6 | 25,0 |
| 14.09.23 | Quinta | 4 | 166,60 | 1.015 | 169,10 | 7,76 | 17,8 | 12,8 | 1000 | 28.032,00 | 56.825,00 | 498,07 | 32 | 31,0 | 23,0 | 24,3 | 23,2 |
| 15.09.23 | Sexta | 5 | 124,40 | 1.024 | 127,39 | 7,90 | 16,7 | 14,3 | 1000 | 46.744,00 | 76.000,00 | 731,04 | 33 | 33,0 | 22,5 | 24,3 | 22,9 |
| 18.09.23 | Segunda | 6 | 109,30 | 1.003 | 109,63 | 6,94 | 22,1 | 27,5 | 290 | 9.625,33 | 26.400,00 | 715,88 | 33 | 34,0 | 24,0 | 25,1 | 24,0 |
| 19.09.23 | Terça | 7 | 138,90 | 1.014 | 140,84 | 7,68 | 21,7 | 24,3 | 950 | 26.298,00 | 51.650,00 | 635,07 | 34 | 33,0 | 24,0 | 25,4 | 23,2 |
| 20.09.23 | Quarta | 8 | 174,12 | 1.011 | 176,04 | 7,35 | 21,6 | 26,5 | 850 | 21.604,00 | 60.075,00 | 562,55 | 33 | 34,0 | 24,0 | 25,4 | 24,4 |
| 21.09.23 | Quinta | 9 | 153,52 | 1.012 | 155,36 | 7,32 | 22,5 | 27,2 | 725 | 22.434,00 | 62.650,00 | 762,37 | 33 | 33,0 | 25,0 | 25,7 | 24,9 |
| 22.09.23 | Sexta | 10 | 143,23 | 1.015 | 145,38 | 7,60 | 22,3 | 26,4 | 900 | 28.944,00 | 76.600,00 | 750,07 | 34 | 34,0 | 25,0 | 25,9 | 22,2 |
| 25.09.23 | Segunda | 11 | 201,61 | 1.011 | 203,83 | 7,45 | 25,4 | 29,5 | 910 | 21.922,00 | 60.600,00 | 735,34 | 34 | 33,0 | 25,5 | 26,9 | 27,1 |
| 26.09.23 | Terça | 12 | 138,39 | 1.006 | 139,22 | 7,60 | 24,4 | 29,6 | 300 | 15.164,00 | 51.000,00 | 670,65 | 31 | 32,0 | 26,0 | 27,1 | 24,9 |
| 27.09.23 | Quarta | 13 | 88,45 | 1.007 | 89,07 | 6,85 | 19,7 | 16,5 | 350 | 13.712,00 | 30.300,00 | 596,20 | 30 | 20,0 | 21,0 | 27,2 | 24,6 |
| 28.09.23 | Quinta | 14 | 114,56 | 1.005 | 115,13 | 7,42 | 18,2 | 19,4 | 150 | 7.845,33 | 19.700,00 | 577,30 | 32 | 32,0 | 26,0 | 27,0 | 26,4 |
| 29.09.23 | Sexta | 15 | 116,52 | 1.005 | 117,10 | 7,31 | 20,0 | 22,6 | 175 | 8.711,00 | 19.650,00 | 864,10 | 34 | 33,0 | 26,0 | 26,9 | 27,5 |
| 02.10.23 | Segunda | 16 | 122,71 | 1.003 | 123,08 | 6,70 | 22,1 | 28,1 | 350 | 11.256,00 | 27.400,00 | 525,30 | 31 | 32,0 | 25,5 | 27,3 | 27,2 |
| 03.10.23 | Terça | 17 | 127,20 | 1.006 | 127,96 | 7,80 | 21,5 | 26,8 | 200 | 7.736,00 | 17.800,00 | 654,90 | 31 | 31,5 | 26,0 | 27,2 | 27,1 |
| 04.10.23 | Quarta | 18 | 145,40 | 1.018 | 148,02 | 7,51 | 20,7 | 21,8 | 900 | 31.504,00 | 59.250,00 | 745,20 | 29 | 25,0 | 22,0 | 27,1 | 26,1 |
| 05.10.23 | Quinta | 19 | 166,82 | 1.012 | 168,82 | 7,76 | 19,6 | 21,8 | 600 | 17.008,00 | 40.100,00 | 366,40 | 29 | 30,0 | 25,0 | 26,8 | 24,8 |
| 06.10.23 | Sexta | 20 | 208,54 | 1.016 | 211,88 | 7,80 | 20,9 | 24,2 | 900 | 25.202,00 | 54.900,00 | 587,30 | 29 | 27,0 | 24,0 | 26,6 | 25,7 |

* Instalação do medidor de biogás FT2A, sendo zerado para iniciar as leituras de produção. ** Ausência de saída de dejetos.

Na Tabela 9, encontram-se vários indicadores, bem como os parâmetros do estudo da produção de biogás que obteve-se no biodigestor de lagoa coberta circular com mistura completa, isolamento térmico e controle de temperatura, o qual realizou-se durante vinte dias de segunda a sexta-feira, obedecendo a rotina da operacionalidade conforme o cronograma de manejo dos dejetos das calhas nas edificações, onde as cargas de dejetos não manejadas aos sábados e domingos impactam nas cargas de volume nas segundas-feiras.

A implantação de biodigestores é uma alternativa para minimizar ou compensar características físico-químicas de cargas orgânicas, bem como impactos ambientais, apresentando maior eficiência quando comparado com as lagoas convencionais (FEIDEN, 2010).

Os sistemas de agitação mecânica, permitem um maior contato entre os micro-organismos e a matéria orgânica, evitando formação das chamadas “zonas mortas”, as quais são resultado da sedimentação do lodo e podem causar perda da capacidade útil do reator (BOHRZ, 2010).

Os trabalhos da pesquisa iniciaram a campo em 11/09/23 e terminaram em 06/10/23, onde contemplou o final da estação de inverno e início da estação de primavera, o que possibilitou uma avaliação em relação a interferência da temperatura ambiente no estudo em escala real.

4.1 Análise do manejo, carga orgânica dos dejetos e cálculos de produção

Apresenta-se na Figura 22, o comportamento dos indicadores, sólidos voláteis totais (mg/L), DQO (mgO₂/L) e massa injetada (Ton) na produção de biogás (m³N.d⁻¹).

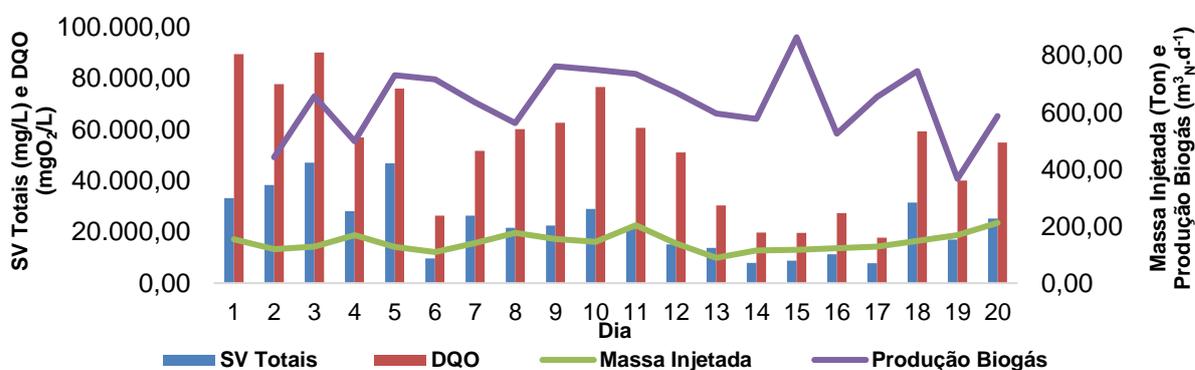


Figura 22 - Comportamento SV Totais, DQO e Massa injetada na Produção de Biogás.

Observa-se que no dia 15 da pesquisa onde correspondeu a data de 29.09.23, obteve-se a maior produção de biogás, de 864,10 m³N.d⁻¹, com uma massa injetada de 117,10 toneladas no referido dia de estudo e, 115,13 Ton no manejo que antecedeu a leitura data de 28.09.23, sendo que a média geral de abastecimento do biodigestor até o dia 15 foi de 139,25 Ton de massa injetada.

Pode-se assim apontar uma resposta para a faixa ideal de massa a ser injetada no reator, onde o volume de abastecimento deve ficar entre 117,10 até 155,36 Ton/dia, uma vez que durante os primeiros quinze dias de estudo a produção média de biogás apresentou valores de 641,04 m³N.d⁻¹.

Na Figura 22, percebe-se ainda que a menor produção de biogás registrada foi no dia 19 da pesquisa, com 366,40 m³N.d⁻¹ devido ao abastecimento do biodigestor ocorrer em batelada, pois como o manejo ocorreu de forma descontínua, verificou-se a variação de volume e concentração nos diferentes dias da semana.

Com isso, observou-se uma diferença entre a maior produção de biogás e a menor produção de 497,70 m³N.d⁻¹, sendo que a média diária da produção de biogás até a menor leitura registrou em 654,30 m³N.d⁻¹ e a média geral dos 19 dias do estudo ficando em 635,62 m³N.d⁻¹, mostrando a interferência das produções registradas nos dias 2 e 19 na média geral da produção de biogás.

Outro ponto, além da análise em relação a carga mássica injetada foi o comportamento da DQO e dos sólidos voláteis, onde na primeira semana do estudo, que correspondeu aos dias 1 a 5 da pesquisa, teve-se o período com os maiores valores registrados, em decorrência do manejo dos dejetos da terminação.

Também na Figura 22, quantificou-se no primeiro dia a carga da DQO em 89.400,00 mgO₂/L, os sólidos voláteis totais 33.262,00 mg/L e a massa injetada de 153,89 Ton, entretanto a produção não teve repetibilidade, pois, se tratou do primeiro dia do abastecimento do reator e o equipamento medidor de vazão tipo thermal para gás série FT2A foi inicializado.

Para os dados do dejetado bruto, tem-se no dia 2, a DQO de 77.700,00 mgO₂/L, os sólidos voláteis totais 38.373,43 mg/L, massa injetada 118,91 Ton e produção de biogás de 442,31 m³N.d⁻¹. O dia 3 foi onde ocorreu a maior DQO do estudo com 90.000,00 mgO₂/L, os sólidos voláteis totais 47.044,00 mg/L, a massa injetada de 127,87 Ton, e a produção de biogás de 656,70 m³N.d⁻¹. Estando esses resultados atrelados aos ciclos produtivos direcionados para o biodigestor.

Já, a DQO no dia 4 registrou 56.825,00 mgO₂/L, os sólidos voláteis 28.032,00 mg/L, a massa injetada de 169,10 Ton, bem como uma produção de biogás de 498,07 m³N.d⁻¹. Na sexta-feira, o dia 5 da pesquisa a DQO foi 76.000,00 mgO₂/L, os sólidos voláteis 46.744,00 mg/L, a massa injetada de 127,39 Ton assim como a produção de biogás de 731,04 m³N.d⁻¹.

Cabe salientar que, os altos valores de DQO observados durante a pesquisa, estiveram atrelados ao volume oriundo do manejo dos dejetos da terminação que ocorreu nas segundas, quartas e sexta feiras, os quais estão registrados na Tabela 6 em materiais e métodos.

No ciclo produtivo da terminação com maior densidade e, por consequência, maior teor de sólidos sedimentáveis, pode ter ocorrido que parte da carga orgânica não esteve disponível para as bactérias. Em contrapartida, em outros dias do estudo ocorreu menores cargas de abastecimento em virtude do manejo estar direcionado para a UPL, onde a densidade e os sólidos sedimentáveis são menores.

Soares *et al.*, (2024), encontrou variações que mostraram diferenças nos valores obtidos na densidade e DQO da terminação, os quais foram superiores a capacidade de operação do reator modelo fluxo pistão e acarretou problemas, como o assoreamento do sistema, dificuldade de separação de fases e redução do TRH. Estas cargas são absorvidas pelo biodigestor do estudo, visto que possui formato circular e agitação, reduzindo assim a taxa de assoreamento e por consequência perda de TRH.

A homogeneização do substrato no biodigestor é fator importante, porque mantém um contato total e permanente das bactérias com o substrato (ALMEIDA, 2016).

Com as informações da Tabela 9, permitiu conhecer a produção específica do biogás, além do rendimento da produção do biogás dos SV Totais (mg/L) e DQO (mgO₂/L), cálculos dispostos no Anexo I.

A Produção específica do biogás por dia calculada no presente estudo foi de 0,2242 m³/dia com TRH de 26 dias.

Conforme Kunz *et al.* (2019), os valores da produtividade de biogás em atividade de suinocultura, usando biodigestor BLC, com TRH de 35 e 40 dias, produz entre 0,03 a 0,15 m³Nbiogás m⁻³reator d⁻¹ e, para reator CSTR a produtividade de biogás 0,4 a 0,8 (m³Nbiogás m⁻³reator d⁻¹) em TRH ≥ 15 dias.

Comparando a produção específica do estudo de 0,2242 m³/dia de biogás, com os valores encontrados por Kunz *et al.* (2019), ficou a produção da pesquisa 49,5% superior aos preconizados para o biodigestor BLC e 78,4% abaixo do menor valor descrito para a faixa do reator CSTR.

Cândido (2021), em TRH de 35 dias, abastecendo um reator CSTR com dejetos de suínos, obteve produção de biogás de $0,41 \pm 0,19 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}} \text{ m}^{-3}_{\text{reator}} \text{ d}^{-1}$ e, para os biodigestores de lagoa coberta (BLC) com TRH de 20 dias obteve produtividade de $0,26 \pm 0,14 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}} \text{ m}^{-3}_{\text{reator}} \text{ d}^{-1}$. Comparando, os dados da pesquisa ficaram abaixo 82,9% da produção do CSTR e 14% abaixo da produção do bio lagoa coberta.

Entretanto, o maior percentual obtido para reatores CSTR estão ligado a tecnologia aplicada ao equipamento, entretanto, deve-se avaliar a viabilidade de aplicação quanto ao investimento e demanda do local de implantação, sendo estes equipamentos direcionadas para efluentes com maior carga orgânica e com características de maior percentual de sólidos.

Os valores calculados na pesquisa para o rendimento de sólido volátiladicionado, foi de 0,193 m³ de biogás, por kg SV por m³ de biodigestor ou rendimento de 193 L (litros) de biogás, por kg de sólido volátiladicionado, por m³ de biodigestor, com TRH de 26 dias.

Júnior *et al.* (2009), estudou com biodigestor tubular em laboratório, os potenciais de produção de biogás e de metano comparando os sólidos totais e voláteis adicionados no dejetos de suíno crescimento, com e sem separação da fração sólida, nos TRHs de 15, 22, 29 e 36 dias. Obtendo em 22 dias de TRH 0,693 m³ de biogás kg⁻¹ SV e com 29 dias 0,757 m³ de biogás kg⁻¹ SV.

Comparando, os valores da pesquisa ficaram 3,6 vezes menor que os valores estudados em laboratório por Júnior *et al.* (2009) com TRH de 22 dias e, 3,9 vezes menor para o TRH de 29 dias.

No entanto, deve-se atentar que as condições do estudo de laboratório direcionam para condições ótimas de temperatura, pH e alimentação do reator, distinta da escala real em que há variações de manejo, aplicações de surfactantes e ainda instabilidades de temperatura, podendo ocorrer variações significativas como aquelas observadas no estudo (Tabela 9).

Cândido (2021), encontrou valores de rendimento dos sólidos voláteis adicionados em $0,39 \pm 0,21 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}} \text{ kg}_{\text{SVadic}}^{-1}$ para o reator CSTR com TRH de 35

dias e rendimento de $0,7 \pm 0,57 \text{ Nm}^3\text{biogás kg}_{\text{SVadic}}^{-1}$ para os 2 (dois) reatores BLC sendo os valores de produção divididos igualitários com TRH de 20 dias.

Os valores da pesquisa de $0,193 \text{ m}^3$ de biogás, por kg SV por m^3 de biodigestor ficaram, 2 vezes menor comparando com os valores pesquisados por Cândido (2021) em reator CSTR e, 1,5 vezes menor do que produziu cada bio lagoa coberta.

O rendimento da $\text{DQO}_{\text{adicionado}}$ pesquisada, teve o valor calculado em $0,086 \text{ m}^3$ de biogás, por kg DQO por m^3 de reator. Ou, rendimento de 86 L (litros) de biogás, por kg de $\text{DQO}_{\text{adicionado}}$, por m^3 de reator em TRH de 26 dias.

Os valores encontrados por Junior (2007), para o tempo de retenção hidráulica de 29 dias foram de $0,053 \text{ m}^3/\text{kg DQO}_{\text{adicionado}}$, ao comparar com o valor obtido neste estudo ficou 62% a mais que aqueles identificados pelo autor.

Desta forma, com a produção média diária de biogás que registrou a pesquisa de $635,62 \text{ m}^3_{\text{N.d}}^{-1}$, considerando o alojamento de 3.500 fêmea suínas em ciclo completo durante os 19 dias, obteve-se a produção de $0,182 \text{ m}^3_{\text{N.d}}^{-1}$ de biogás por animal.

Comparando esta produção de biogás da pesquisa ($0,182 \text{ m}^3_{\text{N.d}}^{-1}$) com os dados obtidos por Mello (2017) nas propriedades rurais em diferentes países, tem-se que o biogás por animal ficou 0,6% menor que a produção média encontrada nas propriedades nacionais e, 11,7% maior que a média das propriedades americanas.

Porém, comparando, de forma específica, com a média das produções de biogás alemãs obtidas pelo autor, o valor encontrado no estudo ficou igual a média da produção do ciclo completo, 70% menor que a média da produção da UPL e produziu 65,5% a mais que a terminação (MELLO, 2017).

Entretanto, deve-se atentar que os valores obtidos existem diferença no manejo dos dejetos nas edificações, no tempo de retenção hidráulica, na alimentação dos animais, no abastecimento dos biodigestores, os quais tem suas distintas características construtivas e operacionais.

Além dos pontos já elencados, observou-se também o comportamento do reator em se tratando da quantidade de $\text{DQO}_{\text{disponível}}$ para as bactérias, bem como a correlação com a quantidade de sólidos voláteis presentes na massa injetada (Volume dejetos m^3/dia x Densidade dejetos bruto kg/m^3).

Sendo assim, na Figura 23, apresenta-se o comportamento dos SV Totais, DQO, Massa Injetada, na Faixa de Melhor Produção do Biogás.

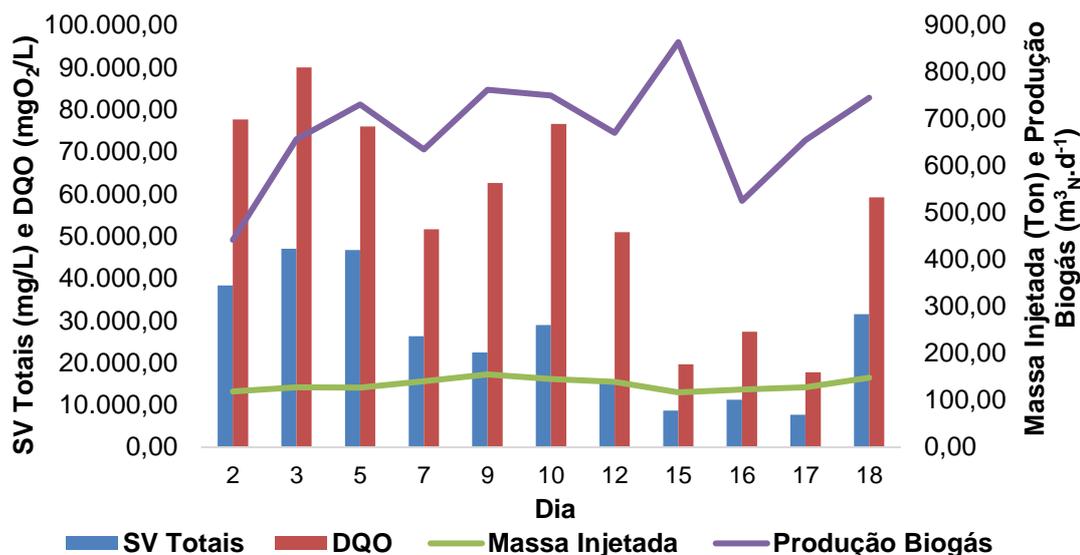


Figura 23 - Comportamento dos SV Totais, DQO, Massa Injetada, na Faixa de Melhor Produção do Biogás.

Ao analisar a Figura 23, atentou-se para o comportamento do reator em se tratando da quantidade de DQO_{disponível} para as bactérias, também estar correlacionada com a quantidade de sólidos voláteis presentes na massa injetada.

A maior produção de biogás registrada nos dias 12 até o dia 15 de 864,10 m³.N.d⁻¹, foi obtida para a DQO e os sólidos voláteis de 19.650,00 mgO₂/L e 8.711,00 mg/L, ou seja, a DQO teve uma redução de 61,47% e os SV com 42,55% as massas injetadas deu-se 139,22 Ton (dia 12) e 117,10 Ton (dia 15).

Já, a menor produção que registrou-se dentro desta faixa aconteceu no dia 2 com 77.700,00 mgO₂/L para a DQO e 38.373,43 mg/L no SV_{totais}, ocorrendo uma redução de 13,09% na DQO em relação ao dia 1, já os sólidos voláteis apresentaram um acréscimo de 15,37%, sendo as massas injetadas de 157,89 Ton (dia 1) e 118,91 Ton (dia 2) ambos expostos na Tabela 9, entendendo-se as diferenças entre as produções.

Segundo estudos de Aires (2014), a partir da análise da entrada e saída do biodigestor, obteve a caracterização do efluente de suinocultura tratado, tendo um percentual de redução nos sólidos voláteis (SV) totais em 56,9% e na Demanda química de oxigênio (DQO) 72,8%.

Já Lima (2007), argumentou que os sólidos voláteis (SV), são responsáveis diretos pela produção de biogás e, devem corresponder aproximadamente a 77% dos sólidos totais que compõem os dejetos suínos. Pois, quanto maior a concentração de

SV na alimentação diária do biodigestor (kg/m^3), maior será a capacidade de produção de biogás.

Na Figura 24, observou-se que durante os 20 dias da pesquisa, houve a oscilação do parâmetro sólidos sedimentáveis do efluente bruto, tendo como menor leitura 150 mL/L e maior leitura 1000 mL/L, a média ficou em 678 mL/L. Esta variação está atrelada à variação da composição dos efluentes por ciclo produtivo sendo variável conforme o manejo diário.

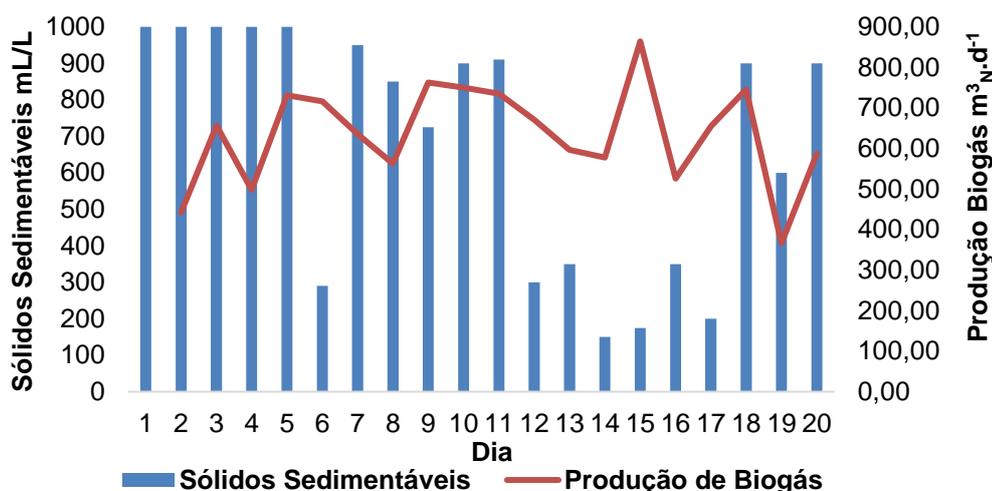


Figura 24 - Comportamento dos Sólidos Sedimentáveis na Produção do Biogás.

Verificou-se ainda na Figura 24, a tendência de que quanto menor o volume de sólidos sedimentáveis (SS) maior foi a produção do biogás, conforme ocorreu nos dias 12 a 17 da pesquisa sendo a média dos SS deste período de 254 mL/L, a $\text{DQO}_{\text{média}}$ 27.641,67 mgO_2/L , os sólidos voláteis médios de 10.737,39 mg/L e a produção de biogás média de 648,08 $\text{m}^3 \text{N.d}^{-1}$.

De acordo com Kunz *et al.* (2006), em estudo na estação de tratamento de dejetos de suínos, a média de SS do dejetos bruto no ano de 2005 foi de $(132,67 \pm 54,14)$ mL/L e para o ano de 2006 a média de $(171,89 \pm 54,73)$ mL/L.

Comparando os valores com a média do estudo de 678 mL/L ficou 5 (cinco) vezes maior em relação ao ano de 2005 e 4 (quatro) vezes maior que o ano 2006. Também, para o período de menor volume dos sólidos sedimentáveis (254 mL/L), a média ficou 2 (duas) vezes maior que 2005 e 1,5 (uma vez e meia) maior que 2006.

Sendo que os sólidos sedimentáveis fazem parte das massas injetadas e junto a eles estão os materiais recalcitrantes, que são compostos orgânicos de difícil degradação, hidrofóbicos e bioacumulativos.

Observou Júnior *et al.* (2009), em sua pesquisa com TRH de 29 dias uma redução nos sólidos totais de 66,77% no dejetos bruto sem separação de fases e, 64,68% no dejetos com separação de fases. Já, Soares (2016), constatou valores médios dos sólidos sedimentáveis do efluente bruto na UPL de 200 mL/L e na Terminação 1.000 mL/L.

A partir da análise crítica dos dados de produção e massa injetada tem-se as possíveis interferências destas baixas produções de biogás que destoaram das demais leituras, com cenários e discussões em faixas de operacionalidade expostos na Figura 25.

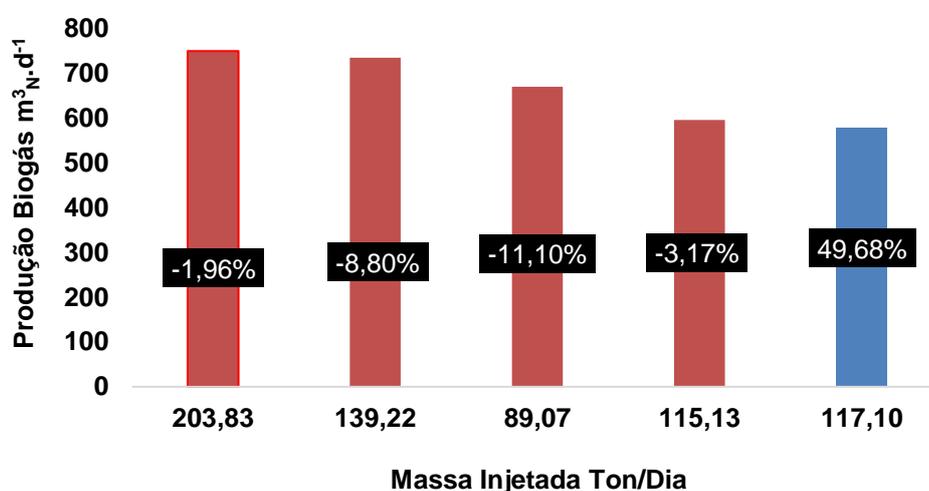


Figura 25 - Comportamento em Percentual da Queda na Produção de Biogás com a Massa Injetada nos - Dias 11, 12, 13, 14 e 15.

Percebeu-se que a produção de biogás reduziu em dias de manejo com altas concentrações de massa injetada (volume dejetos x densidade dejetos). Quando ocorreu a produção de biogás em 750,07 m³_N.d⁻¹ e a massa injetada de 145,38 Ton (equivalente ao dia 10 da pesquisa), permitiu observar o início da queda da produção em -1,96% em relação ao dia anterior pois, existem diferenças de manejo para o volume dos dejetos, bem como das instalações dos ciclos de produção.

Quando a massa injetada de 203,83 Ton que correspondeu ao dia 11, mostrou o início da queda gradativa da produção de biogás. Registrou -8,80% para o dia 12 com produção de 670,65 m³_N.d⁻¹, já no dia 13 com 596,20 m³_N.d⁻¹ teve-se o maior percentual de queda da produção do biogás com -11,10%, no entanto o reator foi abastecido com 89,07 Ton. Novamente observou-se uma queda de produção no dia 14 em -3,17% com massa injetada de 115,13 Ton. Estes resultados reportam a

importância do manejo contínuo da carga de modo a promover uma atividade biológica máxima, ou seja, sem promover saturação do reator e/ou baixa carga de alimentação para as bactérias.

Este comportamento se confirma, com o abastecimento de menores cargas nos dias 12, 13 e 14, inserindo um volume médio de 114,47 Ton/dia, sendo que, no dia 15 houve a retomada da produção com aumento de 49,68% em relação a produção do dia anterior de 577,30 m³N.d⁻¹, a leitura registrada no dia 15 foi de 864,10 m³N.d⁻¹, sendo este o maior valor de produção obtido no estudo.

Com isso, tendo por base os parâmetros massa injetada versus produção de biogás, pode-se observar que o abastecimento do reator com diferentes massas injetadas demonstrou operar melhor na faixa entre 117,10 até 155,36 Ton/dia, conforme apresentado na Figura 26, onde definiu-se como melhor faixa de produção de biogás.

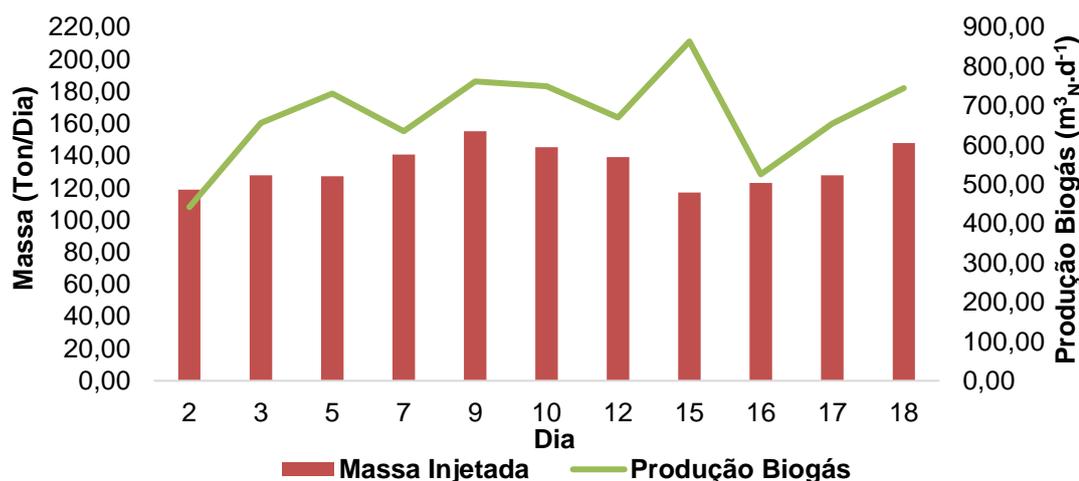


Figura 26 - Faixa de Melhor Produção de Biogás.

Vale salientar que, nesta faixa o volume de dejetos teve a densidade média de 1.012 kg/m³, a produção de biogás entre 525,30 m³N.d⁻¹ que foi o menor valor considerado e 864,10 m³N.d⁻¹ o maior valor registrado.

Ainda, deve-se atentar que para tal análise crítica, a produção de 442,31 m³N.d⁻¹, correspondente ao primeiro dia de abastecimento do reator, foi desconsiderada uma vez que tem comportamento anômalo aos demais, em virtude de se tratar do *start* do sistema de manejo e, por consequência, adaptação da microbiota responsável pela conversão da matéria orgânica em biogás.

Além disso, avaliando apenas a faixa de melhor produção de biogás, no Gráfico 5, a massa média injetada foi de 133,74 Ton/dia, gerando a média de 699,54 m³N.d⁻¹ de biogás por dia, estando essa oscilação atrelada à variação da massa injetada no sistema e adaptação das bactérias ao substrato.

Este comportamento ocorre em virtude da saturação do sistema, bem como a adaptação da microbiota a alimentação contínua de substrato com características similares em termos de demanda química de oxigênio, e sólidos voláteis totais, ou seja, compostos disponíveis para bioconversão da carga orgânica no biogás.

Conforme estudou Broetto (2019), sobre a produção de biogás a partir de dejetos de suínos em propriedade rural de grande escala, observou que a produção real de biogás esteve cerca de 35% menor do que a produção estimada. Os principais fatores identificados pelo autor foram temperatura ambiente, manejo da água e idade dos animais, ou seja, ciclo produtivo.

O estudo contemplou três sistemas de produção de suínos: “*Wean to finish*” (leitões com 28 dias, são encaminhados para um galpão onde permanecem até o abate); Unidade de produção de leitões (UPL) e Terminação. O potencial médio de produção de biogás medidos por Broetto (2019), foram de 933 m³/dia⁻¹ para *Wean to finish*, 292 m³/dia⁻¹ para UPL e 835 m³/dia⁻¹ para Terminação.

Com isso, comparou-se a produção de biogás de 699,54 m³N.d⁻¹ obtida na faixa de melhor produção com a média geral do estudo 635,62 m³N.d⁻¹, onde, percebeu uma diferença de produção diária de 63,92 Nm³ e no ano de 23.330,80 Nm³.

Desta forma, analisou-se a utilização deste excedente de biogás, o qual equivaleu a 467 horas trabalhado na geração de energia elétrica *off grid*, sendo o consumo do motogerador de 50 Nm³ de biogás por hora com capacidade de gerar 65 kW/h e, produção anual de 30.355 kWh. Como o valor cobrado pelo kWh da concessionária Celesc foi R\$ 0,65, mostrou uma possível economia/receita de R\$ 19.730,75 por ano.

Então, atentou-se para a necessidade de ajustar o abastecimento das cargas orgânicas no biodigestor de lagoa coberta circular, conforme apresentado nas análises da melhor faixa da produção de biogás, visando obter assim maior volume de biogás e, por consequência, maior rentabilidade para a unidade produtiva.

4.2 Análise do aquecimento do reator

Na sequência, para melhor elucidar a importância do aquecimento e isolamento térmico em sistemas de mistura completa, evidenciou-se na Tabela 10, os tratamentos estatísticos para as temperaturas da água na entrada e saída do reator operando na faixa de melhor produção do biogás, onde ocorreu a troca de calor da água quente com o dejetto, promovendo assim a transferência de calor na massa e, por consequência, mantendo a temperatura em faixas que permitiu ser observado a produção de gás, uma vez que o parâmetro temperatura é de suma importância para os microrganismos.

Observou-se que a temperatura média interna do reator durante os 20 dias ficou em 26 °C, semelhante à temperatura média na melhor faixa de produção, ficando as mesmas superiores as estudadas por Utech (2013), que observou temperatura de 20 °C limitante para as bactérias mesofílicas. Com isso as temperaturas estudadas, permaneceram dentro da faixa de processos de produção de biogás das bactérias mesofílica, porém longe ao desejado de 37 °C (JUNIOR, 2019).

Apresenta-se na Tabela 10, o efeito das temperaturas da água de entrada comparando com as temperaturas da água de saída, e suas diferenças estatísticas significativas para as distintas produções.

Tabela 10 - Comportamento das Temperaturas da Água na Entrada e Saída do Reator na Faixa de Melhor Produção de Biogás.

| Temperatura água entrada (T °C) | Temperatura água saída (T °C) | | | | | | | Média m ³ _N .d ⁻¹ |
|---|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|
| | 22 | 22,5 | 23 | 24 | 25 | 25,5 | 26 | |
| 25 | 745,20 Aa | | | | | | | 745,20 |
| 30 | | | 656,70 Aa | | | | | 656,70 |
| 31,5 | | | | | | | 654,90 Aa | 654,90 |
| 32 | | | | | | 525,30 Aa | 670,65 Aa | 597,97 |
| 33 | | 731,04 Aa | | 635,07 Aa | 762,37 Aa | | 864,10 Aa | 748,14 |
| 34 | | | | 442,31 Aa | 750,07 Aa | | | 596,19 |
| Média m ³ _N .d ⁻¹ | 745,20 | 731,04 | 656,70 | 538,69 | 756,22 | 525,30 | 729,88 | |
| Coefficiente de variação (%) | 16,78 | | | | | | | |

Médias seguidas de letras distintas, maiúsculas na linha (refere-se a T °C água de entrada) e minúscula na coluna (refere-se a T °C água de saída), diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância, (p<0,05).

Verificou-se na Tabela 10, que a maior produção de biogás $864,10 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$ foi obtida na temperatura da água de entrada em $33 \text{ }^\circ\text{C}$ e na temperatura da água de saída em $26 \text{ }^\circ\text{C}$, com isso, a troca de calor da água quente com o dejetos aconteceu em $7 \text{ }^\circ\text{C}$. Já, para a produção de $525,30 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$ valor este que deu início a faixa da melhor produção de biogás, a temperatura da água registrou na entrada $32 \text{ }^\circ\text{C}$ e na saída $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ com uma troca de calor da água quente com o dejetos em $6,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Considerando a média da temperatura de operação da água quente do boiler $32 \text{ }^\circ\text{C}$ e, não sendo possível elevar esta temperatura, devido estar dependente da cogeração, que ocorreu em regime normal da GEE que foi de 20 horas por dia gerando média de 572 kWh, ainda, sendo que a troca de calor média nos 20 dias do estudo da água quente da entrada e água da saída do reator foi de $7,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

A média da temperatura da água de entrada no reator ficou em $31,3 \text{ }^\circ\text{C}$, a perda de calor no trajeto de 300 metros foi de $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente de $0,0023 \text{ }^\circ\text{C}$ por metro linear.

Diante disso, o sistema de aquecimento apresentou baixa perda de calor, considerando a distância do boiler da entrada e saída da água do reator, apontando que o material utilizado em isolamento de calor apresentou ser adequado para esta aplicação não promovendo perdas consideráveis no sistema de aquecimento, bem como, o local ser de clima temperado com oscilações na temperatura ambiente.

A temperatura ambiente é um dos fatores determinantes na produção de biogás. Em pesquisas realizadas em granjas de suínos localizadas na região de clima quente, Mato Grosso do Sul, registrou-se temperatura ambiente mínima de $23,3 \text{ }^\circ\text{C}$, máxima de $24,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e média de $24,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (BROETTO, 2019).

Ainda, observou-se na Tabela 10, na faixa de temperatura da água de entrada em 25, 33 e $34 \text{ }^\circ\text{C}$ obteve-se médias da produção de biogás, sendo $745,20$, $731,04$, $762,37$ e $750,07 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$. Já, as melhores médias de produção nas temperaturas da água de saída ocorreram em $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ($745,20 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$), $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($731,04 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$), $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($756,22 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$) e $26 \text{ }^\circ\text{C}$ ($729,88 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$).

Quando a temperatura da água de entrada registrou $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a saída $22 \text{ }^\circ\text{C}$ obteve-se também uma boa produção do biogás de $745,20 \text{ m}^3_{\text{N.d}^{-1}}$, valor este justificado pela temperatura do dia anterior, a qual esteve em $35 \text{ }^\circ\text{C}$ água da entrada, $26 \text{ }^\circ\text{C}$ a água de saída e a temperatura interna do dejetos no reator em $27,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Quando as temperaturas apresentam-se menores que 15°C, a taxa de crescimento dos microrganismos fica negativa e conseqüentemente inicia a cessão da produção de biogás (GONÇALVES, 2018).

Com isso, visualizou-se a necessidade de evitar variações bruscas nas temperaturas, e, frente a isto, buscar alternativas para incrementar a temperatura de operação do biodigestor em 35°C, que garantem a maior estabilidade na atividade microbiana e conseqüentemente aumento na produção do biogás.

4.3 Monitoramento do pH

Outro fator avaliado durante o estudo foi o comportamento do pH em relação a produção do biogás os quais estão apresentados na Tabela 11, onde registrou um valor médio do pH em 7,53, sendo o menor valor 6,70 e o maior 8,61, valores estes obtidos no primeiro dia da pesquisa.

Para melhor entendimento da produção com diferentes variações do parâmetro, fez-se a interpolação dos valores o que permitiu observar que os valores do pH se diferenciaram entre si nos resultados da produção do biogás possibilitando a criação de duas faixas.

Tabela 11 - Comportamento do pH na Produção do Biogás.

| Produção m ³ _N .d ⁻¹ | pH | Faixas pH |
|--|---------|--------------|
| 864,10 | 7,31 A | |
| 762,37 | 7,32 A | |
| 745,20 | 7,51 A | |
| 735,34 | 7,45 A | 1 |
| 731,04 | 7,90 A | |
| 715,88 | 6,94 A | |
| 710,36 | 7,60 A | |
| 656,70 | 7,93 Aa | |
| 635,07 | 7,68 Aa | |
| 621,10 | 7,80 Aa | |
| 596,20 | 6,85 Aa | |
| 577,30 | 7,42 Aa | 2 |
| 562,55 | 7,35 Aa | |
| 525,30 | 6,70 Aa | |
| 442,31 | 7,34 Aa | |
| 432,24 | 7,76 Aa | |
| Coefficiente de variação (%) | 11,36 | |

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância, (p<0,05).

Esta análise fez-se coerente uma vez que o pH é um parâmetro determinante para a produção do biogás. Autores como Cortez *et al.* (2008), definem a faixa de 7,0 a 7,2 como sendo faixa ótima para a atividade dos microrganismos.

Na Tabela 11, observou-se ainda o comportamento da produção de biogás com seus respectivos pH, onde apresentou na faixa 1, quando o pH em 7,31 ocorreu a maior produção de biogás, ou seja, de 864,10 m³N.d⁻¹.

Nesta faixa 1 também registrou-se as maiores produção de biogás entre 710,36 e 864,10 m³N.d⁻¹ com os pH entre 6,94 a 7,90. Também pode-se visualizar que os pH presentes na faixa 2 estão entre 6,70 a 7,93 muito semelhantes aos pH da faixa 1, porém, a produção do biogás da faixa 2 apresentaram valores menores entre 432,24 a 656,70 m³N.d⁻¹.

Os microrganismos anaeróbios são sensíveis às condições ácidas e podem ser inibidos se não estiverem em sua faixa ideal, que situam-se entre os pH 6,5 e 7,5 (LIU *et al.*, 2008). Este controle é realizado através do poder tampão do biodigestor, que são a presença de ácidos fracos dos seus sais e de bicarbonatos no meio. Em casos que ocorram acidificação do sistema, recomenda-se adicionar uma base, de modo que o pH se mantenha dentro da faixa operacional para a microbiota (ESPINOZA *et al.*, 2009).

Na Figura 27, visualiza-se o comportamento da faixa 1 e 2 dos pH com relação as diferentes produções do biogás entre 432,24 a 864,10 m³N.d⁻¹, bem como a sua dispersão, sendo que a média dos pH para estas duas faixas foi de 7,43. Já, para a produção do biogás, a média geral para as duas faixas ficou em 644,57 m³N.d⁻¹, e a média nas faixas 1 e 2 registraram 752,04 e 560,94 m³N.d⁻¹.

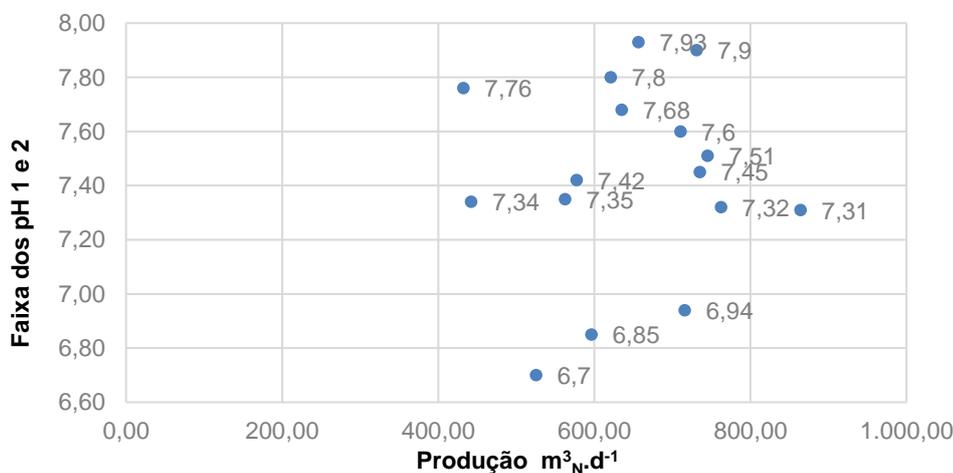


Figura 27 - Comportamento do pH nas Faixas 1 e 2 com a Produção do Biogás.

Ainda, observou-se que no período estudado não teve influências significativas de aplicações de produtos de higiene, uma vez que em sua maioria são ácidos ou alcalinos e, promoveriam alterações significativas do parâmetro pH.

O biodigestor por se tratar de um equipamento biológico, demanda que sua operação ocorra em pH entre 6,5 e 8,2. No entanto, em determinadas condições, também é possível trabalhar de forma satisfatória em pH próximo a 6 (SPEECE, 1996).

Buscar manter uma faixa adequada é fundamental, a qual possibilite o desenvolvimento da maior parte dos microrganismos desejados, uma vez que o pH está diretamente correlacionado com às concentrações de ácidos orgânicos voláteis (PEREIRA *et al.*, 2009).

Analisando resultados de pH da massa injetada diariamente no biodigestor desta pesquisa, obteve valores diferentes de produção nas faixas entre 6,70 e 8,61, porém oscilando na faixa considerada boa para a operacionalidade dos microrganismos mesófilicos, não promovendo assim a inibição da atividade microbiana e, ainda, apresentou valores similares aos observados em outros estudos.

4.4 Eficiência do Biodigestor Lagoa Coberta Circular

Para conhecer a eficiência da operacionalização do biodigestor, realizou-se três cálculos e obteve-se a média. O primeiro cálculo usou-se das informações da $DQO_{\text{média/entrada}}$ e a $DQO_{\text{média/saída}}$ da faixa denominada de melhor produção de biogás.

No segundo cálculo, buscou-se a $DQO_{\text{média/entrada}}$ e $DQO_{\text{média/saída}}$ das 4 (quatro) semanas estudadas e, o terceiro cálculo foi construído com as informações dos valores médios obtidos da $DQO_{\text{média/entrada}}$ durante os períodos avaliados (20 dias), e a $DQO_{\text{média/saída}}$, obtida do resultado da análise do dejetos bruto composto por amostras dos efluentes do estudo coletados no primeiro dia da pesquisa e enviados ao laboratório da Genética – Chapecó SC (Anexo II e III), que realizou o processamento do dejetos para conhecer o Potencial Bioquímico de Metano (BMP).

Na Tabela 12, encontram-se os indicadores: Dia da coleta 2 a 10 e 12 a 18 e as $DQO_{\text{média/entrada}}$ e $DQO_{\text{média/saída}}$ obtidos da faixa de melhor produção de biogás valores entre $525,30 \text{ m}^3\text{N.d}^{-1}$ e $864,10 \text{ m}^3\text{N.d}^{-1}$ visto na Figura 26.

Sendo a $DQO_{\text{média}}$ na entrada $53.726,67 \text{ mgO}_2/\text{L}$ e a $DQO_{\text{média}}$ de saída $18.633,50 \text{ mgO}_2/\text{L}$ a eficiência do reator em ficou em 65,32%.

Tabela 12 - DQO_{média} de entrada e DQO_{média} de saída na faixa de melhor produção de biogás.

| Dia coleta | DQO_{média} (mgO₂/L) Entrada | DQO_{média} (mgO₂/L) saída |
|-------------------|--|--|
| 2 a 10 | 72.433,33 | 14.300,00 |
| 12 a 18 | 35.020,00 | 22.967,00 |
| Média | 53.726,67 | 18.633,50 |

Na Tabela 13, estão os valores médios obtidos nas quatro semanas, onde, a DQO_{máxima} para o dejetos bruto chegou a 90.000,00 mgO₂/L e a DQO_{mínima} 17.800,00 mgO₂/L.

Tabela 13 - DQO_{média} de entrada e DQO_{média} de saída nas 4 semanas.

| Semana | DQO_{média} (mgO₂/L) Entrada | DQO_{média} (mgO₂/L) Saída |
|---------------|--|--|
| 1 | 77.985 | 14.300 |
| 2 | 55.475 | 22.967 |
| 3 | 36.250 | 32.800 |
| 4 | 39.890 | 20.075 |
| Média | 52.400,00 | 22.535,50 |

A DQO_{média} de entrada para as quatro semanas registrou 52.400,00 mgO₂/L e a DQO_{média} de saída do reator 22.535,50 mgO₂/L, sendo calculado uma eficiência média de 56,99%.

Para o terceiro cálculo, utilizou-se os dados da DQO_{média} de entrada do estudo que foi de 52.400,00 mgO₂/L e os dados da DQO_{saída} obtida pelo laboratório da Genética no ano de 2023, em coleta realizada na saída do reator ao final do estudo, sendo o valor 20.100,00 mgO₂/L com isto, a eficiência foi de 61,64%.

Com os resultados da DQO média de entrada e saída, obteve-se os percentuais das eficiências (65,32% + 56,99% + 61,64%), pode-se entender assim que a eficiência

média deste modelo de reator operacionalizou em 61,32% para a remoção da carga de DQO, considerando-se a sua tecnologia construtiva, operacionalidade, manejo dos dejetos das instalações, massa injetada, bem como o tempo de retenção hidráulica.

Júnior (2007), pesquisou em laboratório dejetos de suínos em fase de crescimento, abastecendo biodigestores tubulares semi-contínuos, onde estudou as eficiências das DQOs com diferentes TRH, comparando com separação e sem separação da fração sólida. As eficiências encontradas sem separação da fração sólida foram: com TRH 15 dias (61,69%), 22 dias (72,74%), 29 dias (78,32%) e 36 dias (81,70%). Para as avaliações com separação da fração sólida ocorreu com TRH 15 dias (61,77%), 22 dias (61,75%), 29 dias (65,68%) e 36 dias (69,83%).

Também Vivan *et al.* (2010), encontrou a eficiência de remoção em biodigestor de lagoa coberta com aquecimento, isolamento térmico e sistema de homogeneização abastecendo com dejetos suínos, valores de 34,63% para os SV e, 84,1% para a DQO, justificando o alto percentual em função da boa biodegradabilidade no processo anaeróbio.

Soares *et al.* (2010), observou abastecendo biodigestor tubular com dejetos suínos uma eficiência de redução da DQO em 65%, e, para Aires *et al.* (2014), observou elevadas eficiências de remoção de 72,8% para a DQO e 56,9% nos SV. Já, Cândido (2021), que estudou reatores BLCs e CSTR abastecidos com dejetos de suínos ciclo completo, apresentou uma eficiência de 59 ± 24 para (SV) para os bio lagoa coberta e 55 ± 25 (SV) para o reator CSTR.

O valor médio da eficiência para o modelo de biodigestor deste estudo foi de 61,32% para remoção da DQO, valor este semelhante aos encontrados pelos autores citados e, portanto, dentro do esperado, considerando que o equipamento recebeu cargas distintas, sem pré-tratamento.

4.5 Amortização do Investimento

Além de dados físico-químicos e da produção do biogás, o estudo permitiu conhecer e avaliar os custos inerentes a implantação do biodigestor de lagoa coberta circular com sistema agitação, isolamento térmico e aquecimento, os quais encontram-se apresentados na Tabela 14. Considerando o valor do dólar médio nos meses de setembro e outubro de 2023 foi cotado em R\$ 5,0009 reais.

Tabela 14 - Investimentos Realizados no Estudo da Produção do Biogás.

| Atividade e Equipamentos | Empresas | Valor R\$ | Valor US\$ |
|--|--|-------------------|-------------------|
| Aquisição e instalação do Biodigestor de lagoa coberta circular, com sistema de agitação, aquecimento, isolamento térmico, incluindo obras civis, materiais, tubulações e bombeamento. | Biokohler, Biobras, Construsilfer, Queiroz. | 550.800,00 | 110.140,17 |
| Escavação do reator (com presença de laje) | Construsilfer | 201.000,00 | 40.192,77 |
| Execução da drenagem e brita | Construsilfer | 12.080,00 | 2.415,57 |
| Ajustes água quente no sistema de aquecimento | Engwm | 14.000,00 | 2.799,50 |
| Equipamento de monitoramento de vazão do Biogás | Cotench | 25.502,74 | 5.099,63 |
| Total | - | 803.382,74 | 160.647,63 |

Na Tabela 15, encontram-se as amortizações das análises econômica, onde, considerou juro (0%) zero para o dinheiro no tempo e (0%) zero para a taxa mínima de atratividade (TMA). Motivos estes, devido ao investimento ser necessário para atender as novas características operacionais da granja com o aumento do plantel de suínos e, por consequência o volume da carga orgânica.

Tabela 15 - Amortização do Investimento no Estudo da Produção do Biogás.

| Investimento R\$ 803.382,74 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Amortizado R\$ | 0,00 | 180.637,94 | 180.637,94 | 180.637,94 | 180.637,94 | 180.637,94 |
| Residual R\$ | - 803.382,74 | - 655.744,80 | - 442.106,86 | - 261.468,92 | - 80.830,98 | 99.806,96 |

Os investimentos foram de R\$ 803.382,74, equivalente a US\$ 160.647,63, valores estes dispendidos para ser implementado as atividades e aquisição dos equipamentos conforme descritos na Tabela 14.

A composição da receita nas amortizações da Tabela 15, levou em consideração o regime de trabalho na operação da geração de energia elétrica de 20 horas por dia, durante 335 dias no ano, ficando 30 dias distribuídos no ano para as manutenções de todo o sistema operacional.

Nos trabalhos da geração de energia elétrica (GEE) em 2023, obteve-se uma média mensal de 17.457 kWh e 192.027 kWh no ano. O motogerador apresentou

consumo de 50 Nm³ biogás por hora, 1.000 Nm³/dia, 30.000 Nm³/mês e 330.000 Nm³ no ano.

Para compor os valores dos custos e das receitas, levou-se em consideração a estrutura e a produção existente dos outros três biodigestores modelo fluxo pistão sem aquecimento estudados por (SOARES, 2016).

Os mesmos encontram-se operando em série com o atual biodigestor de lagoa coberta circular, fornecendo o biogás para a geração de energia elétrica e substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP).

O custo/valor encontrado para 1 Nm³ de biogás foi de R\$ 0,548, onde, usando as equações 2 e 3 descritas na metodologia, calculou-se os valores para compor o custo 1 de R\$ 0,224 que considerou a despesa operacional para a mão de obra, e o custo 2 de R\$ 0,324 para as despesas com as manutenções.

Para entendimento das receitas 1 e 2 da amortização usou-se as equações 4, 5 e 6, sendo que, a receita 1 contemplou a atividade de geração de energia elétrica *off grid*, apresentou valor negativo em (-) R\$ 44.675,40 no ano e (-) R\$ 4.061,40 ao mês.

Justificou-se, o resultado negativo, devido o valor do kWh de R\$ 0,65 estar muito baixo para pagar as despesas da GEE com biogás onde o motogerador operou *off grid* com cargas muito baixa não trazendo resultado para a operação.

As cargas geradas em 11 meses foram de 17.457 kWh ao mês, que é equivalente a 582 kWh por dia e 29 kWh por hora. Com isso, percebeu-se a necessidade de aumentar o tempo de operação do motogerador, bem como gerenciar e equalizar as operações internas da granja, com alto consumo de energia para que estejam operando simultâneas com a geração *off grid*.

Observou-se também outra alternativa para otimizar a GEE, substituir o motogerador atual por outro com maior potência para a geração de energia elétrica e trabalhar em geração distribuída (GD).

A receita 2, foi positiva com valor de R\$ 225.313,34 e, tratou do uso da sobra do biogás convertido em kg GLP e usado para o aquecimento dos leitões, aquecimento da água dos chuveiros e uso no fogão da cozinha. A soma das receitas 1 e 2 ficou R\$ 180.637,94 por ano.

A amortização do valor investido apresentado na Tabela 15, ocorreu em 5 anos e 5 meses, com uma taxa interna de retorno (TIR) de 4,03, valor presente líquido (VPL) de R\$ 99.806,96 e taxa mínima de atratividade (TMA) 0%.

Frente a experiência do estudo, tem-se que ocorreu uma demanda significativa de investimento para ajustes de projeto em função da presença de laje no local de implantação, devido ser a única área disponível, tendo como limitante as dimensões na matrícula do imóvel, bem como os distanciamentos para atender as legislações ambientais.

Para melhor elucidar a amortização do projeto, retirou-se os custos pertinentes para a escavação com presença de laje, que totalizaram um valor de R\$ 113.080,00. Diminuindo com o valor total investido de R\$ 803.382,74, passou a ser R\$ 690.302,74, apresentados na Tabela 16.

Para novo cenário a amortização ocorreu com prazo de 4 anos e 10 meses, com uma VPL de R\$ 32.249,02, TIR de 1,85% e TMA = 0%.

Tabela 16 - Amortização do Investimento sem Escavação de Laje.

| | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| Investimento R\$ 690.302,74 | | | | | |
| Amortizado R\$ | 0,00 | 180.637,94 | 180.637,94 | 180.637,94 | 180.637,94 |
| Residual R\$ | - 690.302,74 | - 509.664,80 | - 329.026,86 | - 148.388,92 | 32.249,02 |

Com isso percebeu-se que a gestão de implantação de um projeto é de fundamental importância pois os custos desconhecidos ao projeto podem acarretar no tempo de pagamento do investimento.

Salienta-se que a geração de energia elétrica *off grid* equivaleu a 20,31% da energia total utilizada pela granja, a qual foi fornecida pela concessionária CELESC.

Entende-se que quando os valores de energia elétrica estiverem superiores a R\$ 0,65 kWh e, o valor do kg de GLP acima de R\$ 9,22, a amortização poderá ocorrer em menor tempo.

O custo do investimento ficou em R\$ 283,38 por metro cúbico de planta do biodigestor circular para gerar média geral de 635,62 m³N.d⁻¹ de biogás (Tabela 9).

Soares (2013), calculou o custo de 1 Nm³ de biogás filtrado na atividade de suinocultura em R\$ 0,36, porém, quando considerou a operacionalidade de mão de obra e manutenção para a geração de energia elétrica, o custo aumentou mais R\$

0,28 por cada kWh, sendo que o custo total para geração de energia elétrica foi de R\$ 0,64 por kWh. A amortização do investimento de R\$ 204.950,00 ocorreu em 6 anos e 4 meses, com uma TIR de 12,84%, VPL de R\$ 111.071,00 e TMA 0%. Na época o valor médio do dólar estava em US\$ 2,35.

Segundo Jacobowski (2020), o custo evitado em razão da geração de energia elétrica com biogás da atividade de suinocultura foi de R\$ 154.969,42 por ano, sendo um valor de R\$ 0,76 kWh, o investimento R\$ 506.140,15, a TIR 22%, VPL R\$ 165.051,77 e TMA 16,4%, sendo a amortização em 9 anos.

Em relação a amortização do investimento, comparando as distintas tecnologias aplicadas nas unidades, com diferentes critérios para compor os custos e as receitas, tem-se um comportamento similar quando se trata da análise crítica de amortização com Soares (2013) e distinta aos valores de Jacobowski (2020).

Esta avaliação do estudo traz ponderações necessárias para unidades produtoras de suínos, sendo elas o correto dimensionamento do reator para não ocorrer desestabilização da operação e, ainda a definição de uma faixa de operação do reator, direcionando os efluentes para caixa de homogeneização e, definir uma alimentação contínua de dejetos, dentro dos volumes de dimensionamento e, sem manejo em batelada uma vez que isto acarreta em desestabilização e queda da atividade dos microrganismos.

Também devem ser observados a integridade da estrutura do biodigestor como rasgos, válvulas de segurança dos gases, danos nos equipamentos, bem como realizar as manutenções conforme cronograma estabelecido identificando padrões ou problemas recorrentes.

5. Conclusões

Os resultados obtidos no estudo são de extrema relevância para avaliação da aplicação de tecnologias na produção de biogás e, por consequência no tratamento de efluentes na área suinícola, com registros técnicos de manejo, composição de dejetos, eficiência de equipamentos e, ainda, análise crítica de investimentos.

As cargas orgânicas diárias da UPL e Terminação foram direcionadas ao biodigestor de lagoa coberta circular com capacidade para um volume de 2.835 m³ e TRH de 26 dias, obtendo maiores produções de biogás para volumes na faixa entre 117,10 até 155,36 Ton/dia.

Observou-se o rendimento de sólido volátil^{adicionado}, de 0,193 m³ de biogás, por kg SV por m³ de reator, bem como o rendimento de DQO^{adicionado}, de 0,086 m³ de biogás, por kg DQO por m³ de reator. Sendo, a produção média geral de biogás nos 19 dias estudados de 635,62 m³N.d⁻¹.

O Potencial Bioquímico de Metano – BMP para o dejetos bruto composto dos diferentes ciclos produtivos da suinocultura em análises laboratoriais da empresa Genética Biociencia, reportaram para o dejetos bruto coletado em 12/09/2023, valores de 1,0528 Nm³biogás/kgSVT e 0,7200 Nm³CH₄/kgSVT.

O sistema de aquecimento do biodigestor, teve a taxa de transferência de calor da água quente com os dejetos de até 7°C. A média da temperatura da água na entrada do biodigestor esteve em 31,3 °C e, a perda de calor no trajeto de 300 metros foi de 0,7 °C aproximadamente 0,0023 °C por metro.

O pH ficou dentro da faixa de operação, com valor médio de 7,53, sendo o menor valor 6,70 e o maior resultado obtido de 8,61 o que não possui tendência de influenciar a produção quando operou dentro dessas condições.

A eficiência do biodigestor, apresentou resultado de 61,32% para a remoção da carga de DQO neste modelo de reator.

Após o processamento da carga orgânica no biodigestor circular, o efluente passou por mais 3 (três) biodigestores fluxo pistão que compõem o sistema de produção de biogás, com a carga ainda passível de gerar biogás, o que promoveu a otimização da planta.

Para a análise econômica, considerou-se as receitas da geração de energia elétrica operando *off grid* representando 20,31% da energia elétrica utilizada pela granja, e o excedente de biogás na substituição do GPL.

O investimento do estudo foi de R\$ 803.382,74 e teve uma receita anual de R\$ 180.637,94, com um prazo para a amortização de 5 anos e 5 meses, sendo a taxa interna de retorno (TIR) 4,03%, o valor presente líquido (VPL) de R\$ 99.806,96 e a taxa mínima de atratividade (TMA) 0%.

6. Referências bibliográficas

ABIOGÁS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **Mapa regulatório do Biogás e Biometano**. 2024. Disponível em: <https://abiogas.org.br/mapeamento-regulatorio>
Acesso em: 14 ago. 2024.

AIRES, ALLAN W., SILVA, FABIANA M., CASTRO, VERÔNICA M. U., WENZEL, BRUNO M. Avaliação do desempenho de um biodigestor canadense modificado no tratamento de dejetos de suínos. **Engevista**, V. 16, n. 4, p.329-338, dezembro, 2014.

ALVES, R. G. C. M. **Tratamento e valorização de dejetos da suinocultura através de processos anaeróbios – operação e avaliação de diversos reatores em escala real**. Tese apresentada Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, título de Doutor. UFSC, 2007.

ALMEIDA, C. D. **Potencial de Produção de Biogás a Partir de Biomassa de Suinocultura com Culturas Energéticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Cascavel, 2016.

ARIAS, J. A. V. Remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S (g)) / ácido sulfídrico (H₂S (aq)) **En el biogás**. ECAG, n. 506, p. 16–21, 2010.

AZEVEDO, H. L. S. **Biodigestores Anaeróbios Como Alternativa Tecnológica Para Produtores e Cooperativas Rurais**. Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTGS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Goiânia, 2021.

BECKER, H. R. **Remoção de H₂S por meio de adsorção em óxido de ferro granular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BOLETIM ENFOQUE – **Biodigestor “PE”, fonte alternativa energética e de biofertilizantes** – Edição 03, Recife, 1999.

BOHRZ, G.I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia**: um estudo de caso em abatedouro de bovinos. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2010.

BRÁS, A. M; MIRANDA, F. HIPÓLITO, L; DIAS, L. S. Biomassa e Produção de Energia. **Instituto Politécnico de Viana do Castelo**, Portugal, 2008. 85 Disponível em: <<http://portal.ipvc.pt/images/ipvc/esa/pdf/biomassa.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2024.

BROETTO, TIAGO. **Produção de biogás a partir de dejetos de suínos em uma grande propriedade rural**. Monografia para obtenção do título de Especialista na Pós Graduação em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Campus Medianeira. 2019.

CÂNDIDO DANIELA. **Partida e operação de um sistema de tratamento de efluentes da suinocultura em escala plena**. Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), obtenção do grau de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, Erechim RS, 2021.

CASTANÓN, N. J. B. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. **Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 66 p. 2002.

CCE - CENTRO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Guia Técnico de Biogás**. Direcção Geral de Energia. Portugal. 2000.

CERVINSKI, BEATRIZ. **Elaboração do método PDCA para a gestão de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em uma unidade produtora de leitões**

(UPL). Relatório de estágio obrigatório (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, 2023.

CELESC. **Centrais Elétricas de Santa Catarina**. Disponível em: <https://www.celesc.com.br>. Acesso em: 29 jan. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – CIBIOGÁS, **Dados abertos**. Disponível em: <https://cibiogas.org/solucoes/>, 2023.

CHERNICHARO, C.A.L.; **Reatores Anaeróbios**. 2 ed. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5, 380 p. Belo Horizonte. UFMG, 2007.

CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. **Utilization of biomass for supply of energy carrier**. Applied microbiology and biotechnology, v.52, p.741-755, 1999.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A. DA; LUCAS JUNIOR, J.; CASTRO, L. R. **Biodigestão de Efluentes**. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa Para Energia**. Campinas: UNICAMP, p.493-530, 2008.

CREMONEZ, P. A. **Digestão Anaeróbia de Polímero Orgânico à Base de Fécula de Mandioca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, p.98, 2015.

COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18 kW. In: **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, 11., 2006, Rio de Janeiro. Anais. 12 f, Brasília DF, 2006.

EMBRAPA, **O Futuro da Agricultura Brasileira: 10 visões / Embrapa, Superintendência Estratégica**. – Brasília, DF: 2023. 114 p.: il. color.; 21,0 cm x 29,7 cm. ISBN: 978-65-89957-67-6, 1ª edição 1ª impressão, 2023.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; BARROS, T. D.. **Biogás**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia->

deinformacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas. Acesso em: 14 mai. 2024.

ESPINOZA, E. F.; PELAYO, O. C.; NAVARRO, C. J. Anaerobic digestion of the vinasses from the fermentation of Agave tequilana Weber to tequila: The effect of pH, temperature and hydraulic retention time on the production of hydrogen and methane. **Biomass and Bioenergy**, p 14 – 20. 2009.

FCTER – FUNDAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS – **Mapeamento de Energias Renováveis do município de Chapecó/SC**, Pollen: Parque Científico e Tecnológico. Chapecó/SC – Brasil, 2024. Disponível em: <https://fcter.org.br/mapeamento-de-energias-renovaveis-fcter/>. Acesso em: 08 jun. 2024.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e Biogás da Suinocultura**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Cascavel, 2012.

FEIDEN, ARMIN. **Tratamento de Águas Residuárias de Indústria de Fécula de Mandioca através de Biodigestor Anaeróbico com Separação de Fases em Escala Piloto**. Tese (Doutorado em Agronomia Área de Concentração em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas. UNESP, Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP. 2010.

GONÇALVES, M. N. **Os efeitos da temperatura na produção de biogás em biodigestores**. Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, título de Mestre em Engenharia Elétrica. Uberlândia MG, 2018.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento Energético do Biogás de Uma Indústria Cervejeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, São Paulo, 2008.

IMA - INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA. **Suinocultura - Instrução Normativa Número 11**: Disponível em: <<https://in.ima.sc.gov.br/>>. Acesso em: 08 julho 2022.

INOUE, K. R. A. **Produção de Biogás, Caracterização e Aproveitamento Agrícola do Biofertilizante Obtido na Digestão da Manipueira**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

IRENA. RENEWABLE ENERGY AND JOBS - **Annual Review 2022**. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-AnnualReview-2022>.

IWT - INSTITUT FÜR WÄRMETECHNIK. **Endbericht des Projektes Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk für anaerobes Biogas** . GRAZ, Österreich, 2006.

JACOBOWSKI M., PIACENTI C. A., JUNIOR W. F. DA R., SILVA C. L. DA S., RAMOS M. J. Viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica do biogás: um estudo de caso no aterro sanitário de toledo, paraná. **Revista Desafios**, v. 7, n. 3, DOI: <http://dx.doi.org/10.20873/uftv7-9391>. 2020.

JÚNIOR, MARCO A. P. O. *et al.*, Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.29, n.3, p.474-482, jul./set 2009.

JUNIOR, MARCO ANTONIO PREVIDELLI ORRICO. **Biodigestão anaeróbia e compostagem de dejetos de suínos, com e sem separação de sólidos**. Programa de Pós-Graduação Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal - Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Zootecnia. São Paulo, 2007.

JUNIOR, J. C. A. **Estimativa da produção de biogás a partir de dejetos suínos avaliação e comparação entre metodologias, aplicadas a um estudo de caso**.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2019.

KUNZ, A.; PERDOMO, C. C.; OLIVEIRA, P. A. V. de Biodigestores: Avanços e Retrocessos. **Suinocultura Industrial**, v.26, n.4, p.14-16, 2004.

KUNZ, A.; SCHIERHOLT, G.; MENOZZO, G. F.; BORTOLI, M.; RAMME, M.; COSTA, R. Estação de Tratamento de Dejetos de Suínos (ETDS) como Alternativa na Redução do Impacto Ambiental da Suinocultura. **Comunicado Técnico 452**; Embrapa, ISSN 0100-8862. Concórdia, SC dez. 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/443855>

KUNZ, A.; AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; **Padronização de uso das unidades de medida em processos de produção de biogás**. Comunicado Técnico 537, ISSN 0100-8862 Versão Eletrônica outubro, Concórdia SC, 2016.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R. Cuidados com os biodigestores para estabilidade e qualidade na geração de biogás. **Suinocultura Industrial.com.br**. Ano 41, ed. 287, n. 02, p. 12, Medianeira, 2019. <https://www.suinoculturaindustrial.com.br/edicao/287>.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. Cuidados com os biodigestores para estabilidade e qualidade na geração de biogás. **Suinocultura Industrial.com.br**. Ano 41, ed. 287, n. 02, p. 12, Medianeira, 2019. <https://www.suinoculturaindustrial.com.br/edicao/287>

KUNZ, A.; FONGARO, G. **Tecnologias para tratamento de efluente da produção animal visando o reuso de água**. In: Júlio Palhares. (Org.). Produção animal e recursos hídricos: Tecnologias para manejo de resíduos e uso eficiente dos insumos. Ied. Brasília; Embrapa, v. 1, p. 147-163, 2019.

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, p. 43, 2022. DOI - https://dx.doi.org/10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01_1.

LIMA, PAULO CÉSAR RIBEIRO. Biogás da Suinocultura: Uma importante fonte de geração de energia. **Consultoria Legislativa**, Brasília, v. 3, n. 1, p.1-26, out. 2007.

LIU, C.; YUAN, X.; ZENG, G. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 882 – 888, 2008.

LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. **IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, Rio de Janeiro – RJ, 2015.

LINS, M. A.; STEINMETZ, R. L. R.; PEREIRA NETO, S.; DIAS, J. R.; GASPARETO, T. C.; KUNZ, A. Efeito da carga orgânica volumétrica sobre a produção de biogás a partir de dejetos de suínos em reator uasb. **SIGERA, V Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**. Foz do Iguaçu PR, p. 443 – 446. 2017.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico**. Tese (Doutorado Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

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.

MARCHAIM, U. Biogas process for sustainable development. FAO Agricultural Services Bulletin 95. **Food and Agriculture organization of the United Nations**. 1992.

MEYER, E. R.; RIBEIRO, J. E.; POMBO, V. **Análise de viabilidade técnica de um sistema de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos.**

Conclusão curso em Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa (UTFPR - PG). Ponta Grossa, 2017.

MELLO, PEDRO P. D. **Biogás na suinocultura: comparação de tecnologias de geração de gás em três diferentes países.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia de Energia - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, 2017.

NETO, F. C.; JUNIOR, E. G.; GUESSER F. Biodigestores e Biogás na Suinocultura Catarinense. **Revista Texto de Economia**. Florianópolis, v. 22 n. 1, p. 204 – 229, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-8085.2019v22n1p204>. Acesso em: 08 jul. 2024.

NOGUEIRA, L.A.H. Biodigestão, a alternativa energética. **Editora Nobel**, p.1-93. São Paulo, 1986.

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. 42 p. 1ed. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 115).

OLIVEIRA, PAULO ARMANDO. **Produção e Manejo de Dejetos de Suínos.** Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 1993.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso.** Dissertação (Mestre em Energia) – Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Energia, São Paulo, 2006.

PEREIRA, E.L.; CAMPOS, C.M.M.; MONTERANI, F. Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura. **Revista Ambiente & Água - An interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 157-168, 2009.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, 2010.

SANTA CATARINA. **Lei Nº 19.032, de 2 de agosto de 2024**. Santa Catarina: – Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina – ALESC, 2024. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/sc>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SBERA EMBRAPA SUÍNOS E AVES. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato** / Airton Kunz, et al. - Concórdia: 2019. 209 p. ISBN 978-85-93823-01-5.

SILVA, H. W., A. Tecnologia da Biodigestão Anaeróbica na Produção de Biogás Gerado por Dejetos de Suínos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v.3, n.01, p.56-60, 2013.

SILVA, F. P., **Plano de Monitoramento para Condomínios de Agroenergia para Aproveitamento do Biogás a partir dos Dejetos da Suinocultura**. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) – Universidade Tecnológica do Paraná. Medianeira, 2014.

SINGH R.; ANAND R.C. Comparative performances of Indian small solid-state and conventional anaerobic digesters. **Bioresource Technology**, V.47, p.235–238. 1994.

SOARES M. T. S.; GALVANII F.; ANA H B MAROZZI FERNANDES A. H. B. M.; FERNANDO ANTONIO FERNANDES F. A.; FREDERICO LISITA OLIVIERI F. L. O.; IVAN BERGIER T. DE LIMA I. B. T. L.; CRISPIM S. M. A.; EDSON FRANCO E.; LIMA RIEGER K. R. Caracterização Físico-Química de Efluentes Líquidos de Granjas Suínas Tratados em Biodigestor. **5º Simpósio Sobre Recursos Naturais e Socioeconômicos do Pantanal**. Corumbá MS, 2010.

SOARES, C. A., **Análise da Viabilidade para Geração de Energia Elétrica com Excedente do Biogás Após o seu Uso de Forma Direta em Aquecimento**. Estudo de Caso (Pós-Graduação em Energias Renováveis com Ênfase em Biogás) – Fundação Getúlio Vargas e Itaipu Binacional, 2013.

SOARES, CLENOIR ANTONIO. **Estudo da Produção de Biogás em Escala Real a partir de Dejetos Suínos**. Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Ciência Tecnologia Ambiental - Dissertação de Mestrado. Erechim RS – 2016.

SOARES, C. A., *et al.* Biogas yield prospection from swine manure and placenta in real-scale systems on circular economy approach. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. 25. 2020.

SOARES, C. A. *et al.* Avaliação da carga orgânica de dejetos suínos em diferentes fases de produção: estudo em escala real. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, 17 (7), 2024. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.7-383>

SOUZA, C.F. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos**: obtenção de dados e aplicação no desenvolvimento de um modelo dinâmico de simulação da produção de biogás. 2001. 140 f. Tese (Doutorado em Zootecnia - Produção Animal) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

SPEECE, R. E., **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters**. Nashville, TN: Archae Press 1996.

SUZUKI, A. B. P.; FERNANDES, D. M.; FARIA, R. A. P.; VIDAL, T. C. M. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.4, n.1, p.221–237, jan/abr. 2011.

UTECH, CLAUS. **Avaliação de Variações Térmicas em Biodigestores Modelo Biokohler no Período de Transição Outono-Inverno**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, curso de Zootecnia, para a obtenção do título de Zootecnista. Marechal Cândido Rondon PR – 2013.

VIVAN M., KUNZ A.; STOLBERG J.; PERDOMO C.; VÂNIA H 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.14, n.3, p.320-325. UAEEA/UFCG, Campina Grande PB, 2010.

ZAGO, S. **Potencialidade da produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do meio-oeste catarinense.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. FURB, 2003.

WBA. GLOBAL POTENTIAL OF BIOGAS. **World Biogas Association**, p. 1–56, 2019. Disponível em: <https://worldbiogasassociation.org>. Acesso em: 09 jul. 2024.

7. Anexos

Anexo I - Cálculo do rendimento da produção do biogás com base nos parâmetros SV Totais (mg/L) e DQO (mg/L).

Anexo II - Determinação de BMP (Potencial Bioquímico de Metano) ANÁLISE EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS BMP | Nº 1424-23-3, Palma Sola/SC, 12/09/2023.

Anexo III - Determinação de BMP (Potencial Bioquímico de Metano) ANÁLISE EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS, Palma Sola/SC, 12/10/2023.

Anexo I

Cálculo do rendimento da produção do biogás com base nos parâmetros SV Totais (mg/L) e DQO (mgO₂/L):

Passo 1 - Para os SV (Sólidos Voláteis Totais), converteu-se os resultados de mg/L para g/L. Sendo que a média dos valores registrou 23.121,05 mg/L, então:

$$\begin{array}{rcl} 1,00 \text{ g/L} & \text{-----} & 1.000,00 \text{ mg/L} \\ X \text{ g/L} & \text{-----} & 23.121,05 \text{ mg/L} \end{array}$$
$$X \text{ g/L} = [(1,00 \text{ g/L} \times 23.121,05 \text{ mg/L}) \div 1.000,00 \text{ mg/L}]$$
$$X \text{ g/L} = 23,12105 \text{ g/L}$$

Passo 2 - Para a DQO (Demanda Química de Oxigênio), a média dos valores foram de 52.400,00 mg/L, onde:

$$\begin{array}{rcl} 1,00 \text{ g/L} & \text{-----} & 1.000,00 \text{ mg/L} \\ X \text{ g/L} & \text{-----} & 52.400,00 \text{ mg/L} \end{array}$$
$$X \text{ g/L} = [(1,00 \text{ g/L} \times 52.400,00 \text{ mg/L}) \div 1.000,00 \text{ mg/L}]$$
$$X \text{ g/L} = 52,40000 \text{ g/L}$$

Passo 3 – Para a conversão de g/L em kg/m³, logo:

kg/m³ = g*1000/L*1000, cortando os dois 1000, temos g/L, então para:
SV Totais: 23,12105 g/L é igual a 23,12105 kg/m³ e,
DQO: 52,40000 g/L igual a 52,40000 kg/m³, ou seja, 52,40 kg/m³.

Passo 4 – Rendimento da produção de Biogás por SV_{adicionados} e DQO_{adicionados}.

a) Determinou-se a produção_{específica} de biogás (média m³ de biogás por dia ÷ total m³ do biodigestor).

Sendo que a produção média total de biogás diária registrou 635,62 m³/dia, onde o biodigestor de lagoa coberta circular com agitação, aquecimento e isolamento térmico com volume de 2.835 m³. Então,

$$2.835 \text{ m}^3 \text{ ----- } 635,62 \text{ m}^3/\text{dia de biogás}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ ----- } X \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$X \text{ m}^3/\text{dia} = [(1 \text{ m}^3 \times 635,62 \text{ m}^3/\text{dia}) \div 2.835 \text{ m}^3] = 0,2242 \text{ m}^3/\text{dia de biogás.}$$

Logo,

$$\text{Produção}_{\text{específica/biogás/dia}} = \text{média m}^3 \text{ de biogás} \div \text{m}^3 \text{ do biodigestor}$$

$$\text{Produção}_{\text{específica/biogás/dia}} = 635,62 \text{ m}^3/\text{dia} \div 2.835 \text{ m}^3$$

$$\text{Produção}_{\text{específica/biogás/dia}} = 0,2242 \text{ m}^3/\text{dia de biogás.}$$

a) Cálculo para o rendimento de biogás por $SV_{\text{adicionados}}$.

b.1) Calculou-se a carga diária específica (kg sólidos voláteis por m^3 de biodigestor).

Portanto, a carga diária média total dos dejetos no biodigestor circular registrou em $141,772 \text{ m}^3/\text{dia}$ e considerando-se que obteve $23,12105 \text{ kg de SV/m}^3$, com isso:

$$\text{Carga diária total de SV} = 141,772 \text{ m}^3/\text{dia} \times 23,12105 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Carga diária total de SV} = 3.277,92 \text{ kg/dia.}$$

Essa carga foi aplicada em um biodigestor de lagoa coberta circular com agitação, aquecimento e isolamento térmico, com volume de 2.835 m^3 , logo:

$$2.835 \text{ m}^3 \text{ reator} \text{ ----- } 3.277,92 \text{ kg/dia de SV}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ reator} \text{ ----- } X \text{ kg/m}^3/\text{dia}$$

$$X \text{ kg/m}^3/\text{dia} = [(1 \text{ m}^3 \times 3.277,92 \text{ kg/dia}) \div 2.835 \text{ m}^3]$$

$$X \text{ kg/m}^3/\text{dia} = 1,15623, \text{ arredondando: } 1,16 \text{ kg/m}^3/\text{dia}$$

b.2) Para o cálculo do rendimento de biogás por $SV_{\text{adicionados}}$, usou-se as informações:

- Produção específica de biogás = $0,2242 \text{ m}^3$ de biogás/ m^3 de biodigestor/dia;

- Carga diária específica de $1,16 \text{ kg SV/m}^3$ de biodigestor/dia, então:

$$1,16 \text{ kg/dia de SV} \text{ ----- } 0,2242 \text{ m}^3 \text{ de biogás;}$$

$$1,00 \text{ kg/dia de SV} \text{ ----- } X \text{ m}^3$$

$$X \text{ m}^3 = [(1 \text{ kg/dia} \times 0,2242 \text{ m}^3) \div 1,16 \text{ kg/dia}]$$

$$X \text{ m}^3 = 0,193 \text{ m}^3/\text{kg SV/m}^3 \text{ de biodigestor.}$$

b) Cálculo do rendimento de biogás por DQO_{adicionada}.

c.1) Cálculo da carga diária específica (kg DQO por m³ de biodigestor por dia).

Sendo, que a carga diária média total dos dejetos no reator esteve em 141,772 m³/dia e considerando que obteve-se 52,40 kg de DQO/m³, dessa forma:

$$\text{Carga diária total de DQO} = 141,772 \text{ m}^3/\text{dia} \times 52,40 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Carga diária total de DQO} = 7.428,8528 \text{ kg/dia.}$$

Esta mesma carga esteve aplicada no biodigestor com volume de 2.835 m³, assim sendo:

$$2.835 \text{ m}^3 \text{ reator} \text{ ----- } 7.428,8528 \text{ kg/dia}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ reator} \text{ ----- } X \text{ kg/m}^3/\text{dia}$$

$$X \text{ kg/m}^3/\text{dia} = [(1 \text{ m}^3 \times 7.428,8528 \text{ kg/dia}) \div 2.835 \text{ m}^3]$$

$$X \text{ kg/m}^3/\text{dia} = 2,62040, \text{ arredondou-se o valor para } 2,62 \text{ kg DQO/m}^3/\text{dia.}$$

Diante disso, a carga diária específica foi de 2,62 kg DQO por m³ de biodigestor por dia.

c.2) Rendimento de Biogás por DQO_{adicionados}. Dados:

- Produção específica de biogás = 0,2242 m³ de biogás/m³ biodigestor/dia,

- Carga diária específica de 2,62 kg DQO/m³ de biodigestor/dia.

$$2,62 \text{ kg/dia de DQO} \text{ ----- } 0,2242 \text{ m}^3 \text{ de biogás}$$

$$1,00 \text{ kg/dia de DQO} \text{ ----- } X \text{ m}^3$$

$$X \text{ m}^3 = [(1 \text{ kg/dia/DQO} \times 0,2242 \text{ m}^3 \text{ biogás}) \div 2,62 \text{ kg/dia/DQO}]$$

$$X \text{ m}^3 = 0,085572 \text{ aproximou-se para } 0,086 \text{ m}^3/\text{kg DQO/m}^3 \text{ de biodigestor.}$$



GENETICA
BIOSCIENCE

Determinação de BMP (Potencial Bioquímico de Metano)

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE
BIOGÁS E DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS**

COOPERALFA

Palma Sola-SC

12/09/2023



Sumário

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. Justificativa | 3 |
| 2. Objetivo do estudo | 3 |
| 3. Normas utilizadas | 3 |
| 4. Procedimento experimental | 4 |
| 4.1. Dados físico-químicos | 4 |
| 4.2. Gravimetria | 5 |
| 4.3. Condições do estudo | 5 |
| 4.4. Procedimento | 5 |
| 5. Resultados | 7 |
| 4. Conclusão | 10 |
| 5. Revisão bibliográfica | 11 |
| 6. Documento controle | 13 |
| 7. Referências | 14 |





1. Justificativa

Os conhecimentos sobre a digestão anaeróbia, com a produção de gás combustível a partir da estabilização de resíduos orgânicos, datam do ano de 1976, quando Alessandro Volta observou a produção de metano no gás dos pântanos como resultado da fermentação de vegetais em condições de anaerobiose (NOGUEIRA, 1986).

No Brasil, o interesse em aplicar a tecnologia da biodigestão anaeróbia foi despertado pela crise energética na década de 70, aumentando a procura por energias alternativas (HOBSON e WHEATLEY, 1993).

Os processos anaeróbios produzem energia com baixa produção de lodo comparado à outras formas de tratamento. Por isso propomos este estudo, que é uma importante ferramenta para diagnosticar viabilidades em gerar metano (energia) através de efluentes e demais resíduos.



Laboratório de Biogás – Genetica Group

2. Objetivo do estudo

O presente estudo busca fornecer informações sobre o processo de fermentação do resíduo, investigando o potencial bioquímico de metano (BMP), expresso $\text{Nm}^3_{\text{biogás}} \cdot \text{kgSVT}^{-1}$ e $\text{Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kgSVT}^{-1}$.

3. Normas utilizadas

O estudo em questão está de acordo com a norma VDI 4630 – *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*, juntamente com outras duas normas complementares: DIN 38414 – 8 *Sludge and sediments (group S): Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)*; DIN EN ISO 11734 – *Evaluation of the 'ultimate' anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge*.

4. Procedimento experimental

Identificação: Dejeto suíno

Data de coleta: 12/09/2023



Figura 1 – Amostra do dejeto suíno (creche, gestação, maternidade e terminação).

4.1. Dados físico-químicos

| Parâmetro | Resultado | Unidade |
|-----------------------------|-----------|---------------------|
| DQO _{dejeto suíno} | 52.950 | mg·L ⁻¹ |
| pH | 7,30 | - |
| Condutividade elétrica | >20 | mS·cm ⁻¹ |
| Potencial redox | -348 | mV |
| Salinidade | 12,6 | ppt |
| Densidade | 1,007849 | g/mL |

Vale ressaltar, que a condutividade e a salinidade do efluente, estão elevadas para degradação anaeróbia. Sendo que, o ideal para reações anaeróbias é a condutividade elétrica de no máximo 9.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e salinidade no máximo de 5 ppt, valores dos parâmetros acima citados diminuem a atividade biológica e, conseqüentemente, baixa remoção da matéria orgânica. Diante disso, deve ser verificado à campo se possui alguma interferência, sabendo-se que o presente ensaio apresenta a geração máxima de biogás que o resíduo tem capacidade, nas condições ideais em que o ensaio é realizado.

O potencial redox, é determinado por um equipamento portátil específico. Reações que mudam o estado de oxidação das espécies reagentes, devido a um intercâmbio de elétrons entre os reativos, alteram o potencial redox. A melhor condição para geração do metano é em redox menores que -200 mV (meio fortemente reduzido), preferencialmente abaixo de -300 mV (GERARDI, 2003; METCALF e EDDY, 2003). Segundo Miqueleto (2003), valores obtidos abaixo de -370 mV indicam que as moléculas que contém o átomo de oxigênio em sua estrutura, tais como sulfatos e nitratos, foram completamente removidos do sistema.



4.2. Gravimetria

| Parâmetro | Resultado | Unidade |
|---|-----------|--------------------|
| Sólidos Totais (ST) | 44.320 | mg·L ⁻¹ |
| Sólidos Fixos Totais (SFT) | 10.725 | mg·L ⁻¹ |
| Sólidos Voláteis Totais (SVT) | 33.595 | mg·L ⁻¹ |
| Relação entre sólidos voláteis por sólidos totais | 0,76 | - |

4.3. Condições do estudo

- ✓ Temperatura das reações: 37 ± 2 °C (VDI 4630, 2016).
- ✓ Tempo de reação máximo de 60 dias, ou até que a produção diária de biogás seja equivalente a apenas 0,5% do volume total produzido, por três dias consecutivos (VDI 4630, 2016).
- ✓ Reator composto por água, lodo anaeróbio de alta atividade metanogênica e 65 mL da amostra de dejetos suíno.

4.4. Procedimento

Foram preparados reatores de acordo com a norma internacional alemã para digestão anaeróbia, com *headspace* (espaço vazio) de 30% referente ao volume total, sendo que cada reator foi preenchido com lodo anaeróbio granular de alta atividade metanogênica (mínimo de 0,45 gDQO_{CH₄}·gSVT⁻¹·d⁻¹), e o resíduo na seguinte proporção (DIN EN ISO 11734, 1998; VDI 4630, 2016):

$$\frac{\text{Substrato}_{SVT}}{\text{Lodo anaeróbio}_{SVT}} \leq 0,5$$

Para cada reator, foram realizadas leituras de pH para garantir a máxima conversão anaeróbia (DIN EN ISO 11734, 1998). Os reatores foram incubados sob condições mesofílicas, 37 ± 2 °C e conectados em tubos de eudiômetros (DIN 38414-8, 1985; VDI 4630, 2016).

Foram realizadas leituras sequenciais do volume e composição do biogás gerado nos reatores. Para a composição do biogás as leituras foram realizadas através de célula infravermelha de comprimento de onda duplo com canal de referência e célula eletroquímica interna. Os resultados foram expressos em *steps* da composição do biogás, de acordo com os dados estatísticos.

Os volumes gerados foram corrigidos para condições normais de temperatura e pressão (CNTP), conforme a fórmula abaixo (DIN 38414 – 8, 1985).

$$V_{CNTP} = V \cdot \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$$



V_{CNP} = Volume normal de gás (NmL)

V = Volume de gás lido (mL)

p = pressão do gás no momento da leitura (hPa)

p_w = pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente (hPa)

T_0 = temperatura padrão (K) = 273,15 K

p_0 = pressão padrão (hPa) = 1013 hPa

T = temperatura do ensaio ou ambiente (K)





5. Resultados

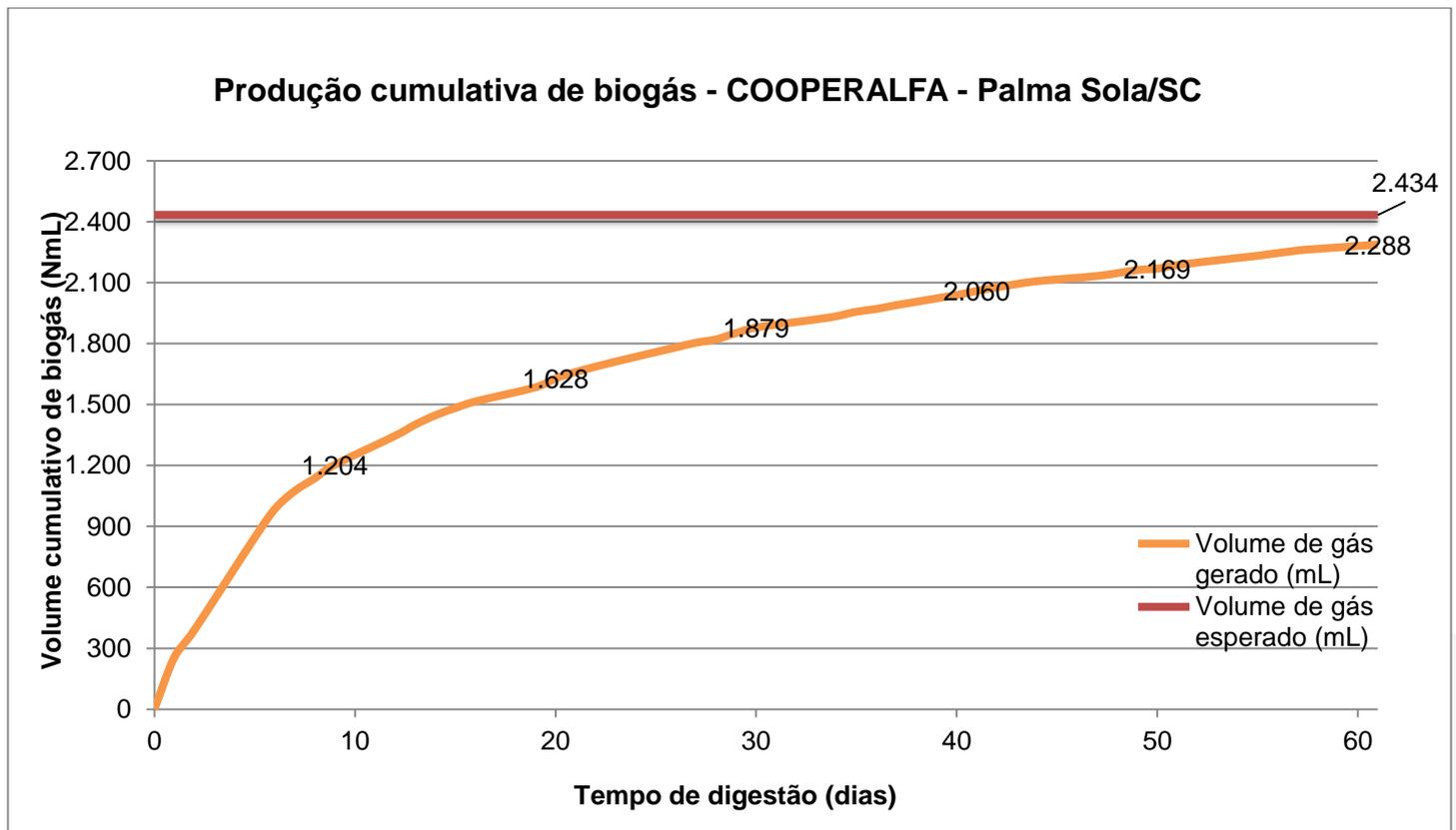
Segundo a norma internacional alemã, DIN 38414 – 8 (1985), o pH da reação deve estar entre 7 e 8. Neste estudo, as reações iniciaram-se e terminaram-se dentro da faixa de pH preconizado, garantindo assim, máxima conversão do substrato em biogás.

Tabela 1 – Parâmetros da reação anaeróbia.

| | Inicial | Final | Biodegradabilidade anaeróbia em relação a DQO |
|----------------------|---------|-------|---|
| pH na reação | 7,19 | 7,37 | - |
| DQO na reação (mg/L) | 5.825 | 1.215 | 79,14% |

No gráfico abaixo, é apresentado o volume normal cumulativo de biogás para o resíduo, durante o período de digestão anaeróbia:

Figura 2 – Geração cumulativa de biogás para o resíduo.



Considerando que o volume total de biogás gerado ao longo dos 60 dias da análise foi de 2.288 mL com 65 mL de amostra, a produção de biogás foi de $35,2 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{m}^3_{\text{efluente}}$.

Na tabela abaixo, a qualificação do biogás no período do ensaio do resíduo:

Tabela 2 – Steps das leituras do biogás gerados pelo resíduo.

| | [] CH ₄ (%) | [] CO ₂ (%) | [] O ₂ (%) | [] Bal. (%) | [] H ₂ S (ppm) | [] H ₂ (ppm) |
|--------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------|
| Step 1 | 73,5 | 16,2 | 0,7 | 9,6 | 1.394 | 58 |
| Step 2 | 71,8 | 27,1 | 0,2 | 0,9 | 2.456 | 157 |
| Step 3 | 66,3 | 33,5 | 0,2 | 0,0 | 2.529 | 69 |
| Step 4 | 66,9 | 32,8 | 0,3 | 0,0 | 1.905 | 54 |
| Step 5 | 64,3 | 35,5 | 0,2 | 0,0 | 1.785 | >2.000 |
| Step 6 | 67,2 | 32,3 | 0,5 | 0,0 | 1.250 | 2 |

Nota 1: O item *Bal.* é um conjunto de outros gases (por exemplo N₂ e NH₃) detectados pelo equipamento que não são lidos separadamente.

O volume esperado médio de biogás em relação aos Sólidos Voláteis Totais (SVT) é dado por METCALF & EDDY (2003) como sendo de 1,12 Nm³_{biogás}/kg_{SVT}, portanto tem-se que:

Tabela 3 – Comparação medições do ensaio e literatura.

| | |
|--|----------------------------|
| Volume de Biogás Teórico – Em relação aos SVT | 2.434 mL _{biogás} |
| Volume de Biogás Medido na Reação | 2.288 mL _{biogás} |

De acordo com os dados experimentais, foram calculados os valores médios de BMP do resíduo:

Tabela 4 – Comparação medições do ensaio e literatura em relação aos SVT.

| | Nm ³ _{biogás} ·kgSVT ⁻¹ | Nm ³ _{CH₄} ·kgSVT ⁻¹ |
|-----------------------------|--|--|
| BMP Teórico | 1,12 ⁽¹⁾ | 0,766 |
| BMP Medido na reação | 1,0528 | 0,7200 |
| Eficiência | 94,00% | |

(1) METCALF & EDDY (2003)

Tabela 5 – Comparação medições do ensaio e literatura em relação a DQO.

| | Nm ³ _{biogás} ·kgDQO ⁻¹ | Nm ³ _{CH₄} ·kgDQO ⁻¹ |
|-----------------------------|--|--|
| BMP Teórico | 0,503 ⁽²⁾ | 0,35 |
| BMP Medido na reação | 0,5514 | 0,3840 |

(2) CHERNICHARO (2007)



Tabela 6 – Resultados experimentais.

| | BIOGÁS | METANO |
|---------------------|---|---|
| Dejeto suíno | 1,0528 Nm ³ _{biogás} ·kgSVT ⁻¹ | 0,7200 Nm ³ _{CH₄} ·kgSVT ⁻¹ |

- Os resultados estão apresentados em “Normal” volume do biogás e metano conforme a norma DIN 38414 – 8 (1985), na **temperatura de 273,15 K (0 °C) e pressão de 1 atm.**
- Os resultados expressados neste estudo, estão de acordo com a amostra recebida. Caso houver variação da carga orgânica no efluente ou resíduo em situação real, a geração de biogás poderá variar (para mais ou para menos).



4. Conclusão

| Item | Descrição | Situação |
|---|--|---|
| BMP (Nm³biogás/kgSVT) | 1,0528 Nm ³ biogás/kgSVT 0,7200 Nm ³ CH ₄ /kgSVT | O valor médio para a geração de biogás de acordo com METCALF & EDDY (2003) é de 1,12 Nm ³ biogás/kgSVT. |
| Volume de biogás total gerado (mL) | 2.288 mL 94,00% | O volume de biogás é determinado pelos valores medidos descontados do branco. O valor médio para geração de biogás em relação aos Sólidos voláteis totais (SVT) de acordo com METCALF & EDDY (2003) é de 2.434 mL. |



Laboratório de Biogás – Genetica Group



5. Revisão bibliográfica

A seguir, é apresentado o potencial de geração de biogás e composição teórica do gás metano de acordo com o tipo de substrato (VDI 4630, 2016) e a equivalência de 1Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis:

Tabela 7 – Potencial de geração de acordo com o tipo de substrato.

| Substrate type | Theoretical biogas yield in ℓ _N /kgoTM | Volume fraction of the theoretical CH ₄ /CO ₂ composition in % | |
|----------------|--|---|----------------------|
| | | | |
| carbohydrate | 750 | 50 % CH ₄ | 50 % CO ₂ |
| fats | 1390 | 72 % CH ₄ | 28 % CO ₂ |
| proteins | 793 | 50 % CH ₄ | 50 % CO ₂ |

Fonte: VDI 4630, 2016.

Tabela 8 – Equivalência de 1 Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis.

| Combustível | Quantidade equivalente a 1 Nm ³ de biogás |
|----------------------------------|--|
| Carvão vegetal | 0,8 kg |
| Lenha | 1,5 kg |
| Óleo Diesel | 0,55 l |
| Querosene | 0,58 l |
| Gasolina Amarela | 0,61 l |
| GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) | 0,45 l |
| kWh | 1,43 |
| Álcool Carburante | 0,80 l |
| Carvão Mineral | 0,74 kg |

Fonte: Cardoso Filho, 2001.



Figura 3 – Potencial calorífico dos substratos.

| CARVÃO E RESÍDUOS | | | |
|------------------------------|---|---------------------|-----------------------------------|
| TIPO | DENSIDADE APARENTE (kg/m ³) | UNIDADE NOMINAL (%) | PODER CALÓRICO INFERIOR (kcal/kg) |
| Casca Arroz - IN NATURA | 140 | 12 | 3.300 |
| Casca Arroz - PELLET/BRIQUET | 500 - 600 | 8 | 3.500 |
| Bagaco Cana - IN NATURA | 140 | 50 | 1.820 |
| Bagaco Cana - PELLET/BRIQUET | 500 - 600 | 15 | 3.480 |
| Bagaco Cana - Enfardado | 350 | 20 | 3.250 |
| Casca de Castanha | - | - | 5.500 |
| Casca de Bagaço | - | - | 4.300 |
| Casca de Girassol | - | - | 4.300 |
| Casca de Cacau | - | - | 2.000 - 3.900 |
| Casca de Café | - | - | 3.000 |
| Casca de Algodão | - | - | 3.000 |
| Casca de Amendoim | - | - | 3.000 |
| Fibra de Palmeira | - | - | 2.200 |
| Fibra de Juta | - | - | 3.800 |
| Palhas | - | - | 3.400 |
| Aparas de Borracha | - | - | 3.200 |
| Aparas de Papelão | - | - | 3.700 |
| Aparas de Polietileno | - | - | 10.000 |
| Aparas de Polipropileno | - | - | 11.000 |
| Recortes de Couro | - | - | 4.400 |
| Carvão Vegetal | - | 3 - 7 | 6.700 - 6.400 |
| Carvão Mineral RS | - | 17 - 10 | 3.750 - 3.420 |
| Carvão Mineral SC | - | 17 - 10 | 4.900 - 4.550 |

| LIQUIDOS E GASOSOS | | |
|-------------------------|---|-----------------------------------|
| TIPO | DENSIDADE APARENTE (kg/m ³) | PODER CALÓRICO INFERIOR (kcal/kg) |
| Óleo Diesel | 825 | 10.200 |
| Óleo BPF Tipo A | 970 | 9.600 |
| Óleo BTE Tipo D | 940 | 10.000 |
| Querosene | 785 | 10.400 |
| Alcatrão Mineral | 1.150 | 8.600 |
| Alcatrão Vegetal | 1.130 | 5.500 |
| Xisto | 2.100 | 1.500 |
| Condens. de Gás Natural | 675 | 11.300 |
| Metanol Anidro | 796 | 4.600 |
| Etanol Anidro | 794 | 6.400 |
| Gasolina Automotiva | 734 | 11.100 |
| Gasolina de Aviação | 710 | 11.150 |
| Nafta | 740 | 11.100 |
| GLP | 544 | 11.400 |
| | | (kcal/m ³) |
| Gás Natural | - | 8.600 |
| Gás Nafta | - | 4.250 |
| Gás de Coque | - | 4.500 |
| Gás de rua / cidade | - | 4.250 |
| Gás Metano | - | 13.000 |
| Biogás | - | 8.450 |

| MADEIRAS | | | |
|---------------------------|---|---------------------|-----------------------------------|
| TIPO | DENSIDADE APARENTE (kg/m ³) | UMIDADE NOMINAL (%) | PODER CALÓRICO INFERIOR (kcal/kg) |
| Madeira Nativa - Lenha | 400 - 500 | 20 - 60 | 3.290 - 1.370 |
| Madeira Nativa - Serragem | 240 - 380 | 20 - 60 | 3.290 - 1.370 |
| Madeira - Cavaco | 180 | 10 | 4.100 |
| Eucalipto - Lenha | 450 - 550 | 20 - 60 | 3.380 - 1.400 |
| Eucalipto - Picado | 550 - 700 | 20 - 60 | 3.380 - 1.400 |
| Eucalipto - Casca | - | 20 - 60 | 3.000 - 1.200 |
| Acácia - Lenha | 380 - 480 | 20 - 60 | 3.500 - 1.600 |
| Pinnus - Lenha | 380 - 480 | 20 - 60 | 3.570 - 1.500 |
| Pinnus - Serragem | 160 - 380 | 20 - 60 | 3.570 - 1.500 |
| Pinnus - Casca | - | 20 - 60 | 3.720 - 1.560 |
| Pinnus - Cavacos | 360 | 30 | 2.700 |

PODER CALORÍFICO
1 kcal/kg = 4,19 kJ/kg = 1,80 Btu/lb
1 Btu/lb = 2,32 kJ/kg = 0,55 kcal/kg
1 kJ/kg = 0,42 Btu/kg = 0,24 kcal/kg

PODER CALORÍFICO
1 kcal/kg = 4,19 kJ/kg = 1,80 Btu/lb
1 Btu/lb = 2,32 kJ/kg = 0,55 kcal/kg
1 kJ/kg = 0,42 Btu/kg = 0,24 kcal/kg

PODER CALORÍFICO
1 kcal/kg = 4,19 kJ/kg = 1,80 Btu/lb
1 Btu/lb = 2,32 kJ/kg = 0,55 kcal/kg
1 kJ/kg = 0,42 Btu/kg = 0,24 kcal/kg

Fonte: ADETEC (2010)

Figura 4 – Poder calorífico do metano.

| SUBSTÂNCIA | FÓRMULA | MASSA MOLECULAR | PODER CALORÍFICO | | | |
|---------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|---------------|--------------|--------------|
| | | | SUPERIOR | INFERIOR | SUPERIOR | INFERIOR |
| | | | kcal/kg | kcal/kg | kWh/kg | kWh/kg |
| Carbono | C | 12,01 | 7.819 | 7.819 | 9,09 | 9,09 |
| Hidrogênio | H ₂ | 2,02 | 33.900 | 28.642 | 39,40 | 33,29 |
| Monóxido de Carbono | CO | 28,01 | 2.412 | 2.412 | 2,80 | 2,80 |
| Enxofre | S | 32,06 | 2.210 | 2.210 | 2,57 | 2,57 |
| Gás Sulfídrico | H ₂ S | 34,08 | 3.939 | 3.631 | 4,58 | 4,22 |
| Amônia | NH ₃ | 17,03 | 5.364 | 4.439 | 6,23 | 5,16 |
| Metano | CH₄ | 16,04 | 13.249 | 11.940 | 15,40 | 13,88 |
| Etano | C ₂ H ₆ | 30,07 | 12.384 | 11.336 | 14,39 | 13,17 |
| Propano | C ₃ H ₈ | 44,09 | 12.018 | 11.065 | 13,97 | 12,86 |
| n-Butano | C ₄ H ₁₀ | 58,12 | 11.822 | 10.919 | 13,74 | 12,69 |
| i-Butano | C ₄ H ₁₀ | 58,12 | 11.794 | 10.891 | 13,71 | 12,66 |
| n-Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72,14 | 11.702 | 10.829 | 13,60 | 12,59 |
| i-Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72,14 | 11.680 | 10.252 | 13,57 | 11,92 |
| neo-Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72,14 | 11.635 | 10.761 | 13,52 | 12,51 |
| Eteno | C ₂ H ₄ | 28,05 | 12.009 | 11.260 | 13,96 | 13,09 |
| Propeno | C ₃ H ₆ | 42,08 | 11.674 | 10.925 | 13,57 | 12,70 |
| n-Buteno | C ₄ H ₈ | 56,10 | 11.563 | 10.817 | 13,44 | 12,57 |
| i-Buteno | C ₄ H ₈ | 56,10 | 11.502 | 10.754 | 13,37 | 12,50 |
| Acetileno | C ₂ H ₂ | 26,04 | 11.929 | 11.527 | 13,86 | 13,40 |
| Etanol | C ₂ H ₅ OH | 46,07 | 7.302 | 6.619 | 8,49 | 7,69 |
| Metanol | CH ₃ OH | 32,04 | 5.692 | 5.037 | 6,62 | 5,85 |
| Benzeno | C ₆ H ₆ | 78,11 | 10.103 | 9.698 | 11,74 | 11,27 |
| Tolueno | C ₇ H ₈ | 92,13 | 10.231 | 9.776 | 11,89 | 11,36 |
| Xileno | C ₈ H ₁₀ | 106,16 | 10.347 | 9.854 | 12,03 | 11,45 |

Fonte: WYLEN (2009)



6. Documento controle

MÉTODO REFERÊNCIA:

VDI 4630
DIN EN ISO 11734
DIN 38414 – 8

DIRETOR DE ESTUDO/AUTOR:


Eng. Químico Ivan Bovi Sganderla
CRQ: 13301446

LABORATÓRIO CONTRATADO:

GENETICA TECNOLOGIAS AMBIENTAIS
Rua Alfredo Goelner, 471 D
Rodeio Chato – Distrito Industrial Flávio Baldissera
CEP: 89.813-828
Chapecó – SC

PATROCINADOR:

COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL ALFA
Rodovia SC 161, 0 - km 03. Interior.
CEP: 89.985-000
Palma Sola – SC





7. Referências

- ADATEC CALDEIRAS E AQUECEDORES. 2010. Disponível em: <http://adetec.ind.br/consumo.asp>. Acesso em: 26 out. 2021.
- CARDOSO FILHO, E. P. *Fatores que influenciam na digestão anaeróbia de efluentes líquidos*. Sem publicação. CETESB, 2001.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores Anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- DIN 38414 – 8. *Sludge and sediments: Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)*. DIN –Deutsches Institut für Normung. Berlin – Germany, 1985.
- DIN EN ISO 11734. *Evaluation of the 'ultimate' anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge. Method by measurement of the biogas production (ISO 11734: 1995)*. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin – Germany, 1998.
- HOBSON, R. N.; WHEATLEY, A. D. *Anaerobic digestion: Modern theory and practice*. Londres: Elsevier Applied Science, 1993.
- METCALF; EDDY; TCHOBANOGLIOUS, Georfe. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4. ed. New York: Mc Graw Hill, 2003.
- NOGUEIRA, L. A. H. *Biodigestão: A Alternativa Energética*. Editora Nobel, São Paulo, 1986.
- VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. 7 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1995.
- VDI 4630. *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. VDI – Verein Deutscher Ingenieure. Berlin – Germany, 2016.





GENETICA
BIOSCIENCE

Determinação de BMP (Potencial Bioquímico de Metano)

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE
BIOGÁS E DE METANO A PARTIR DE RESÍDUOS**

COOPERALFA

Palma Sola-SC

09/10/2023



Sumário

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. Justificativa | 3 |
| 2. Objetivo do estudo | 3 |
| 3. Normas utilizadas | 3 |
| 4. Procedimento experimental | 4 |
| 4.1. Dados físico-químicos | 4 |
| 4.2. Gravimetria | 5 |
| 4.1. Condições do estudo | 5 |
| 4.2. Procedimento | 5 |
| 5. Resultados | 7 |
| 6. Conclusão | 10 |
| 7. Revisão bibliográfica | 11 |
| 8. Documento controle | 13 |
| 9. Referências | 14 |



1. Justificativa

Os conhecimentos sobre a digestão anaeróbia, com a produção de gás combustível a partir da estabilização de resíduos orgânicos, datam do ano de 1976, quando Alessandro Volta observou a produção de metano no gás dos pântanos como resultado da fermentação de vegetais em condições de anaerobiose (NOGUEIRA, 1986).

No Brasil, o interesse em aplicar a tecnologia da biodigestão anaeróbia foi despertado pela crise energética na década de 70, aumentando a procura por energias alternativas (HOBSON e WHEATLEY, 1993).

Os processos anaeróbios produzem energia com baixa produção de lodo comparado à outras formas de tratamento. Por isso propomos este estudo, que é uma importante ferramenta para diagnosticar viabilidades em gerar metano (energia) através de efluentes e demais resíduos.



Laboratório de Biogás – Genetica Group

2. Objetivo do estudo

O presente estudo busca fornecer informações sobre o processo de fermentação do resíduo, investigando o potencial bioquímico de metano (BMP), expresso $\text{Nm}^3_{\text{biogás}} \cdot \text{kgSVT}^{-1}$ e $\text{Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kgSVT}^{-1}$; $\text{Nm}^3_{\text{biogás}} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$ e $\text{Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$.

3. Normas utilizadas

O estudo em questão está de acordo com a norma VDI 4630 – *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*, juntamente com outras duas normas complementares: DIN 38414 – *8 Sludge and sediments (group S): Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)*; DIN EN ISO 11734 – *Evaluation of the 'ultimate' anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge*.

4. Procedimento experimental

Identificação: Digestato Dejeito suíno

Data de coleta: 09/10/2023



Figura 1 – Amostra do digestato de dejeito suíno.



Figura 2 – Amostra após análise de BMP.

4.1. Dados físico-químicos

| Parâmetro | Resultado | Unidade |
|------------------------------|-----------|---------------------|
| DQO _{dejeito suíno} | 20.100 | mg·L ⁻¹ |
| pH | 7,79 | - |
| Condutividade elétrica | 18,88 | mS·cm ⁻¹ |
| Potencial redox | -338 | mV |
| Salinidade | 10,9 | ppt |
| Densidade | 1,010506 | g·mL ⁻¹ |

Vale ressaltar, que a condutividade e a salinidade do efluente, estão elevadas para degradação anaeróbia. Sendo que, o ideal para reações anaeróbias é a condutividade elétrica de no máximo 9.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e salinidade no máximo de 5 ppt, valores dos parâmetros acima citados diminuem a atividade biológica e, conseqüentemente, baixa remoção da matéria orgânica. Diante disso, deve ser verificado à campo se possui alguma interferência, sabendo-se que o ensaio apresenta a geração máxima de biogás que o resíduo tem capacidade, nas condições ideais em que o ensaio é realizado.

O potencial redox, é determinado por um equipamento portátil específico. Reações que mudam o estado de oxidação das espécies reagentes, devido a um intercâmbio de elétrons entre os reativos, alteram o potencial redox. A melhor condição para geração do metano é em redox menores que -200 mV (meio fortemente reduzido), preferencialmente abaixo de -300 mV (GERARDI, 2003; METCALF e EDDY, 2003). Segundo Miqueleto (2003), valores obtidos abaixo de -

370 mV indicam que as moléculas que contêm o átomo de oxigênio em sua estrutura, tais como sulfatos e nitratos, foram completamente removidos do sistema.

4.2. Gravimetria

| Parâmetro | Resultado | Unidade |
|---|-----------|--------------------|
| Sólidos Totais (ST) | 10.490 | mg·L ⁻¹ |
| Sólidos Fixos Totais (SFT) | 5.110 | mg·L ⁻¹ |
| Sólidos Voláteis Totais (SVT) | 5.380 | mg·L ⁻¹ |
| Relação entre sólidos voláteis por sólidos totais | 0,51 | - |

4.1. Condições do estudo

- ✓ Temperatura das reações: 37 ± 2 °C (VDI 4630, 2016).
- ✓ Tempo de reação máximo de 60 dias, ou até que a produção diária de biogás seja equivalente a apenas 0,5% do volume total produzido, por três dias consecutivos (VDI 4630, 2016).
- ✓ Reator composto por água, lodo anaeróbio de alta atividade metanogênica e 400 mL da amostra de digestato do dejetos suíno.

4.2. Procedimento

Foram preparados reatores de acordo com a norma internacional alemã para digestão anaeróbia, com *headspace* (espaço vazio) de 30% referente ao volume total, sendo que cada reator foi preenchido com lodo anaeróbio granular de alta atividade metanogênica (mínimo de 0,45 gDQO_{CH₄}·gSVT⁻¹·d⁻¹), e o resíduo na seguinte proporção (DIN EN ISO 11734, 1998; VDI 4630, 2016):

$$\frac{\text{Substrato}_{SVT}}{\text{Lodo anaeróbio}_{SVT}} \leq 0,5$$

Para cada reator, foram realizadas leituras de pH para garantir a máxima conversão anaeróbia (DIN EN ISO 11734, 1998). Os reatores foram incubados sob condições mesofílicas, 37 ± 2 °C e conectados em tubos de eudiômetros (DIN 38414-8, 1985; VDI 4630, 2016).

Foram realizadas leituras sequenciais do volume e composição do biogás gerado nos reatores. Para a composição do biogás as leituras foram realizadas através de célula infravermelha de comprimento de onda duplo com canal de referência e célula eletroquímica interna. Os resultados foram expressos em *steps* da composição do biogás, de acordo com os dados estatísticos.

Os volumes gerados foram corrigidos para condições normais de temperatura e pressão (CNTP), conforme a fórmula abaixo (DIN 38414 – 8, 1985).



$$V_{CNTP} = V \cdot \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$$

V_{CNTP} = Volume normal de gás (NmL)

V = Volume de gás lido (mL)

p = pressão do gás no momento da leitura (hPa)

p_w = pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente (hPa)

T_0 = temperatura padrão (K) = 273,15 K

p_0 = pressão padrão (hPa) = 1013 hPa

T = temperatura do ensaio ou ambiente (K)



5. Resultados

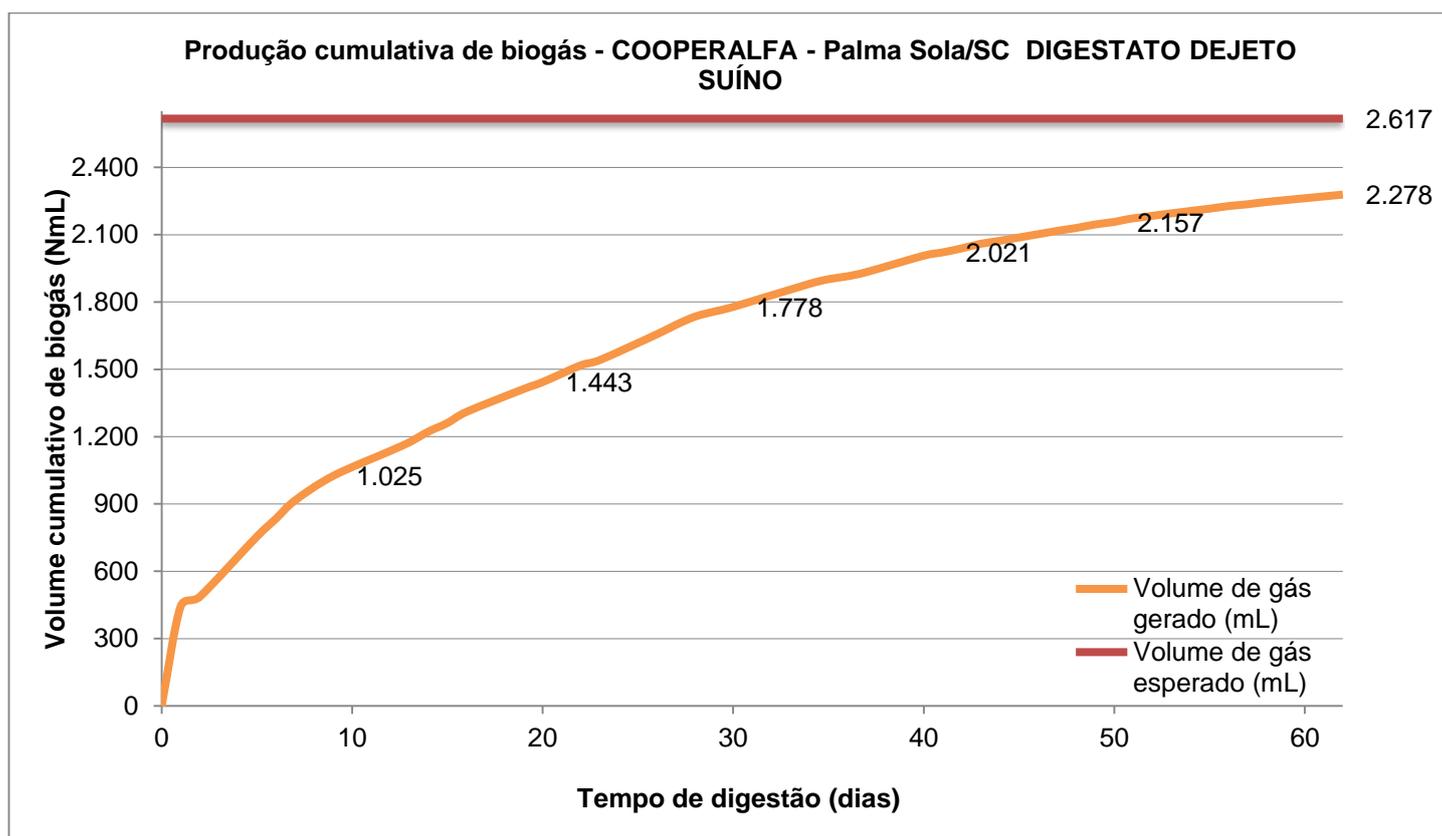
Segundo a norma internacional alemã, DIN 38414 – 8 (1985), o pH da reação deve estar entre 7 e 8. Neste estudo, as reações iniciaram-se e terminaram-se dentro da faixa de pH preconizado, garantindo assim, máxima conversão do substrato em biogás.

Tabela 1 – Parâmetros da reação anaeróbia.

| | Inicial | Final | Biodegradabilidade anaeróbia em relação a DQO |
|----------------------|---------|-------|---|
| pH na reação | 7,38 | 7,67 | - |
| DQO na reação (mg/L) | 8.933 | 3.200 | 64,18% |

No gráfico abaixo, é apresentado o volume normal cumulativo de biogás para o resíduo, durante o período de digestão anaeróbia:

Figura 3 – Geração cumulativa de biogás para o resíduo.



Considerando que o volume total de biogás gerado ao longo dos 60 dias da análise foi de 2.278 mL com 400 mL de amostra, a produção de biogás foi de 5,70 m³biogás/m³efluente.

Na tabela abaixo, a qualificação do biogás no período do ensaio do resíduo:

Tabela 2 – Steps das leituras do biogás gerados pelo resíduo.

| | [] CH ₄ (%) | [] CO ₂ (%) | [] O ₂ (%) | [] Bal. (%) | [] H ₂ S (ppm) | [] H ₂ (ppm) |
|--------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------|
| Step 1 | 54,7 | 28,8 | 0,4 | 16,1 | 1349 | 86 |
| Step 2 | 72,6 | 25,8 | 1,6 | 0,0 | 1413 | 51 |
| Step 3 | 72,5 | 22,5 | 0,5 | 4,5 | 1362 | 15 |
| Step 4 | 72,0 | 26,0 | 0,4 | 1,6 | 1972 | 18 |
| Step 5 | 67,0 | 32,6 | 0,3 | 0,1 | 1750 | 19 |
| Step 6 | 70,9 | 28,8 | 0,3 | 0,0 | 1604 | 3 |

O volume esperado médio de biogás em relação aos Sólidos Voláteis Totais (SVT) é dado por Metcalf & Eddy (2003) como sendo de 1,12 Nm³_{biogás}/kg_{SVT}, e em relação à DQO é apresentado por Chernicharo (2007) como sendo 0,35 Nm³_{CH₄}/kg_{DQOrem}, portanto tem-se que:

Tabela 3 – Comparação medições do ensaio e literatura.

| | |
|---|----------------------------|
| Volume de Biogás Teórico – Em relação ao DQO | 2.617 mL _{biogás} |
| Volume de Biogás Teórico – Em relação ao SVT | 2.410 mL _{biogás} |
| Volume de Biogás Medido na Reação | 2.278 mL _{biogás} |

De acordo com os dados experimentais, foram calculados os valores médios de BMP do resíduo:

Tabela 4 – Comparação medições do ensaio e literatura em relação aos SVT.

| | Nm ³ _{biogás} ·kgSVT ⁻¹ | Nm ³ _{CH₄} ·kgSVT ⁻¹ |
|-----------------------------|--|--|
| BMP Teórico | 1,12 ⁽¹⁾ | 0,773 |
| BMP Medido na reação | 1,0588 | 0,7306 |
| Eficiência | 94,53% | |

(1) METCALF & EDDY (2003)

Tabela 5 – Comparação medições do ensaio e literatura em relação a DQO.

| | Nm ³ _{biogás} ·kgDQO ⁻¹ | Nm ³ _{CH₄} ·kgDQO ⁻¹ |
|-----------------------------|--|--|
| BMP Teórico | 0,507 ⁽²⁾ | 0,35 |
| BMP Medido na reação | 0,4416 | 0,3048 |
| Eficiência | 87,10% | |

(2) CHERNICHARO (2007)



Tabela 6 – Resultados experimentais.

| | BIOGÁS | METANO |
|-----------------------------------|---|---|
| Digestato Dejeto suíno | 1,0588 Nm ³ _{biogás} ·kgSVT ⁻¹ | 0,7306 Nm ³ _{CH₄} ·kgSVT ⁻¹ |

- Os resultados estão apresentados em “Normal” volume do biogás e metano conforme a norma DIN 38414 – 8 (1985), na **temperatura de 273,15 K (0 °C) e pressão de 1 atm.**
- Os resultados expressados neste estudo, estão de acordo com a amostra recebida. Caso houver variação da carga orgânica no efluente ou resíduo em situação real, a geração de biogás poderá variar (para mais ou para menos).



6. Conclusão

| Item | Descrição | Situação |
|---|--|---|
| BMP (Nm³biogás/kgSVT) | 1,0588 Nm ³ biogás/kgSVT 0,7306 Nm ³ CH ₄ /kgSVT | O valor médio para a geração de biogás de acordo com METCALF & EDDY (2003) é de 1,12 Nm ³ biogás/kgSVT. |
| Volume de biogás total gerado (mL) | 2.278 mL 94,53% | O volume de biogás é determinado pelos valores medidos descontados do branco. O valor médio para geração de biogás em relação aos Sólidos voláteis totais (SVT) de acordo com METCALF & EDDY (2003) é de 2.410 mL. |



Laboratório de Biogás – Genetica Group



7. Revisão bibliográfica

A seguir, é apresentado o potencial de geração de biogás e composição teórica do gás metano de acordo com o tipo de substrato (VDI 4630, 2016) e a equivalência de 1Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis:

Tabela 7 – Potencial de geração de acordo com o tipo de substrato.

| Substrate type | Theoretical biogas yield in $\ell_N/\text{kg oTM}$ | Volume fraction of the theoretical CH ₄ /CO ₂ composition in % | |
|----------------|---|---|----------------------|
| | | | |
| carbohydrate | 750 | 50 % CH ₄ | 50 % CO ₂ |
| fats | 1390 | 72 % CH ₄ | 28 % CO ₂ |
| proteins | 793 | 50 % CH ₄ | 50 % CO ₂ |

Fonte: VDI 4630, 2016.

Tabela 8 – Equivalência de 1 Nm³ de biogás em relação a outros combustíveis.

| Combustível | Quantidade equivalente a 1 Nm ³ de biogás |
|----------------------------------|--|
| Carvão vegetal | 0,8 kg |
| Lenha | 1,5 kg |
| Óleo Diesel | 0,55 l |
| Querosene | 0,58 l |
| Gasolina Amarela | 0,61 l |
| GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) | 0,45 l |
| kWh | 1,43 |
| Álcool Carburante | 0,80 l |
| Carvão Mineral | 0,74 kg |

Fonte: Cardoso Filho, 2001.



Figura 4 – Potencial calorífico dos substratos.

| CARVÃO E RESÍDUOS | | | |
|------------------------------|---|---------------------|-----------------------------------|
| TIPO | DENSIDADE APARENTE (kg/m ³) | UNIDADE NOMINAL (%) | PODER CALÓRICO INFERIOR (kcal/kg) |
| Casca Arroz - IN NATURA | 140 | 12 | 3.300 |
| Casca Arroz - PELLET/BRIQUET | 500 - 600 | 8 | 3.500 |
| Bagaco Cana - IN NATURA | 140 | 50 | 1.820 |
| Bagaco Cana - PELLET/BRIQUET | 500 - 600 | 15 | 3.480 |
| Bagaco Cana - Enfardado | 350 | 20 | 3.250 |
| Casca de Castanha | - | - | 5.500 |
| Casca de Bagaço | - | - | 4.300 |
| Casca de Girassol | - | - | 4.300 |
| Casca de Cacau | - | - | 2.000 - 3.900 |
| Casca de Café | - | - | 3.000 |
| Casca de Algodão | - | - | 3.000 |
| Casca de Amendoim | - | - | 3.000 |
| Fibra de Palmeira | - | - | 2.200 |
| Fibra de Juta | - | - | 3.800 |
| Palhas | - | - | 3.400 |
| Aparas de Borracha | - | - | 3.200 |
| Aparas de Papelão | - | - | 3.700 |
| Aparas de Polistileno | - | - | 10.000 |
| Aparas de Polipropileno | - | - | 11.000 |
| Recortes de Couro | - | - | 4.400 |
| Carvão Vegetal | - | 3 - 7 | 6.700 - 6.400 |
| Carvão Mineral RS | - | 17 - 10 | 3.750 - 3420 |
| Carvão Mineral SC | - | 17 - 10 | 4.900 - 4550 |

| LIQUIDOS E GASOSOS | | |
|-------------------------|---|-----------------------------------|
| TIPO | DENSIDADE APARENTE (kg/m ³) | PODER CALÓRICO INFERIOR (kcal/kg) |
| Óleo Diesel | 825 | 10.200 |
| Óleo BPF Tipo A | 970 | 9.600 |
| Óleo BTE Tipo D | 940 | 10.000 |
| Querosene | 785 | 10.400 |
| Alcatrão Mineral | 1.150 | 8.600 |
| Alcatrão Vegetal | 1.130 | 5.500 |
| Xisto | 2.100 | 1.500 |
| Condens. de Gás Natural | 675 | 11.300 |
| Metanol Anidro | 796 | 4.600 |
| Etanol Anidro | 794 | 6.400 |
| Gasolina Automotiva | 734 | 11.100 |
| Gasolina de Aviação | 710 | 11.150 |
| Nafta | 740 | 11.100 |
| GLP | 544 | 11.400 |
| | | (kcal/m ³) |
| Gás Natural | - | 8.600 |
| Gás Nafta | - | 4.250 |
| Gás de Coque | - | 4.500 |
| Gás de rua / cidade | - | 4.250 |
| Gás Metano | - | 13.000 |
| Biogás | - | 8.450 |

| MADEIRAS | | | |
|---------------------------|---|---------------------|-----------------------------------|
| TIPO | DENSIDADE APARENTE (kg/m ³) | UMIDADE NOMINAL (%) | PODER CALÓRICO INFERIOR (kcal/kg) |
| Madeira Nativa - Lenha | 400 - 500 | 20 - 60 | 3.290 - 1.370 |
| Madeira Nativa - Serragem | 240 - 380 | 20 - 60 | 3.290 - 1.370 |
| Madeira - Cavaco | 180 | 10 | 4.100 |
| Eucalipto - Lenha | 450 - 550 | 20 - 60 | 3.380 - 1.400 |
| Eucalipto - Picado | 550 - 700 | 20 - 60 | 3.380 - 1.400 |
| Eucalipto - Casca | - | 20 - 60 | 3.000 - 1.200 |
| Acácia - Lenha | 380 - 480 | 20 - 60 | 3.500 - 1.600 |
| Pinnus - Lenha | 380 - 480 | 20 - 60 | 3.570 - 1.500 |
| Pinnus - Serragem | 160 - 380 | 20 - 60 | 3.570 - 1.500 |
| Pinnus - Casca | - | 20 - 60 | 3.720 - 1.560 |
| Pinnus - Cavacos | 360 | 30 | 2.700 |

PODER CALORÍFICO
1 kcal/kg = 4,19 kJ/kg = 1,80 Btu/lb
1 Btu/lb = 2,32 kJ/kg = 0,55 kcal/kg
1 kJ/kg = 0,42 Btu/kg = 0,24 kcal/kg

PODER CALORÍFICO
1 kcal/kg = 4,19 kJ/kg = 1,80 Btu/lb
1 Btu/lb = 2,32 kJ/kg = 0,55 kcal/kg
1 kJ/kg = 0,42 Btu/kg = 0,24 kcal/kg

PODER CALORÍFICO
1 kcal/kg = 4,19 kJ/kg = 1,80 Btu/lb
1 Btu/lb = 2,32 kJ/kg = 0,55 kcal/kg
1 kJ/kg = 0,42 Btu/kg = 0,24 kcal/kg

Fonte: ADETEC (2010)

Figura 5 – Poder calorífico do metano.

| SUBSTÂNCIA | FÓRMULA | MASSA MOLECULAR | PODER CALORÍFICO | | | |
|---------------------|----------------------------------|-----------------|------------------|---------------|--------------|--------------|
| | | | SUPERIOR | INFERIOR | SUPERIOR | INFERIOR |
| | | | kcal/kg | kcal/kg | kWh/kg | kWh/kg |
| Carbono | C | 12,01 | 7.819 | 7.819 | 9,09 | 9,09 |
| Hidrogênio | H ₂ | 2,02 | 33.900 | 28.642 | 39,40 | 33,29 |
| Monóxido de Carbono | CO | 28,01 | 2.412 | 2.412 | 2,80 | 2,80 |
| Enxofre | S | 32,06 | 2.210 | 2.210 | 2,57 | 2,57 |
| Gás Sulfídrico | H ₂ S | 34,08 | 3.939 | 3.631 | 4,58 | 4,22 |
| Amônia | NH ₃ | 17,03 | 5.364 | 4.439 | 6,23 | 5,16 |
| Metano | CH₄ | 16,04 | 13.249 | 11.940 | 15,40 | 13,88 |
| Etano | C ₂ H ₆ | 30,07 | 12.384 | 11.336 | 14,39 | 13,17 |
| Propano | C ₃ H ₈ | 44,09 | 12.018 | 11.065 | 13,97 | 12,86 |
| n-Butano | C ₄ H ₁₀ | 58,12 | 11.822 | 10.919 | 13,74 | 12,69 |
| i-Butano | C ₄ H ₁₀ | 58,12 | 11.794 | 10.891 | 13,71 | 12,66 |
| n-Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72,14 | 11.702 | 10.829 | 13,60 | 12,59 |
| i-Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72,14 | 11.680 | 10.252 | 13,57 | 11,92 |
| neo-Pentano | C ₅ H ₁₂ | 72,14 | 11.635 | 10.761 | 13,52 | 12,51 |
| Eteno | C ₂ H ₄ | 28,05 | 12.009 | 11.260 | 13,96 | 13,09 |
| Propeno | C ₃ H ₆ | 42,08 | 11.674 | 10.925 | 13,57 | 12,70 |
| n-Buteno | C ₄ H ₈ | 56,10 | 11.563 | 10.817 | 13,44 | 12,57 |
| i-Buteno | C ₄ H ₈ | 56,10 | 11.502 | 10.754 | 13,37 | 12,50 |
| Acetileno | C ₂ H ₂ | 26,04 | 11.929 | 11.527 | 13,86 | 13,40 |
| Etanol | C ₂ H ₅ OH | 46,07 | 7.302 | 6.619 | 8,49 | 7,69 |
| Metanol | CH ₃ OH | 32,04 | 5.692 | 5.037 | 6,62 | 5,85 |
| Benzeno | C ₆ H ₆ | 78,11 | 10.103 | 9.698 | 11,74 | 11,27 |
| Tolueno | C ₇ H ₈ | 92,13 | 10.231 | 9.776 | 11,89 | 11,36 |
| Xileno | C ₈ H ₁₀ | 106,16 | 10.347 | 9.854 | 12,03 | 11,45 |

Fonte: WYLEN (2009)



8. Documento controle

MÉTODO REFERÊNCIA:

VDI 4630
DIN EN ISO 11734
DIN 38414 – 8

DIRETOR DE ESTUDO/AUTOR:


Eng. Químico Ivan Bovi Sganderla
CRQ: 13301446

LABORATÓRIO CONTRATADO:

GENETICA TECNOLOGIAS AMBIENTAIS
Rua Alfredo Goelnner, 471 D
Rodeio Chato – Distrito Industrial Flávio Baldissera
CEP: 89.813-828
Chapecó – SC

PATROCINADOR:

COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL ALFA
Rodovia SC 161, 0 - km 03. Interior.
CEP: 89.985-000
Palma Sola – SC





9. Referências

ADATEC CALDEIRAS E AQUECEDORES. 2010. Disponível em: <http://adetec.ind.br/consumo.asp>. Acesso em: 26 out. 2021.

CARDOSO FILHO, E. P. *Fatores que influenciam na digestão anaeróbia de efluentes líquidos*. Sem publicação. CETESB, 2001.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reatores Anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

DIN 38414 – 8. *Sludge and sediments: Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)*. DIN –Deutsches Institut für Normung. Berlin – Germany, 1985.

DIN EN ISO 11734. *Evaluation of the 'ultimate' anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge. Method by measurement of the biogas production (ISO 11734: 1995)*. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin – Germany, 1998.

HOBSON, R. N.; WHEATLEY, A. D. *Anaerobic digestion: Modern theory and practice*. Londres: Elsevier Applied Science, 1993.

METCALF; EDDY; TCHOBANOGLIOUS, Georfe. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4. ed. New York: Mc Graw Hill, 2003.

NOGUEIRA, L. A. H. *Biodigestão: A Alternativa Energética*. Editora Nobel, São Paulo, 1986.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. 7 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1995.

VDI 4630. *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. VDI – Verein Deutscher Ingenieure. Berlin – Germany, 2016.

