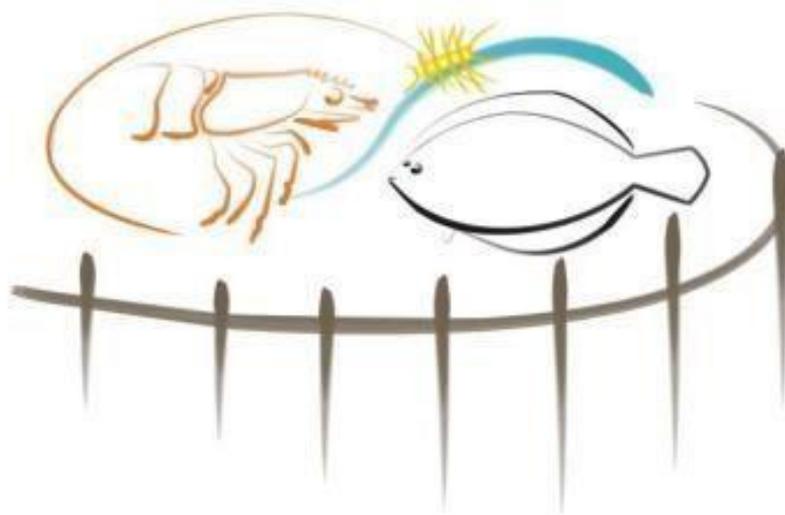


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA



**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCEDENTE DE BIOFLÓCOS
GERADOS NO CULTIVO DE CAMARÕES MARINHOS EM SISTEMA BFT**

SANDRO LUIS DA SILVA MIRANDA

Rio Grande, RS
Fevereiro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AQUICULTURA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCEDENTE DE BIOFLÓCOS
GERADOS NO CULTIVO DE CAMARÕES MARINHOS EM SISTEMA BFT**

SANDRO LUIS DA SILVA MIRANDA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Aquicultura no Programa de Pós-Graduação em Aquicultura da Universidade Federal do Rio Grande-FURG.

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique S. Poersch
Co-orientadora: Profa. Dra. Michele Souza

Rio Grande, RS
Fevereiro de 2024

Ficha Catalográfica

M672p Miranda, Sandro Luis da Silva.
Produção de biogás a partir de excedente de bioflócos gerados
no cultivo de camarões marinhos em sistema BFT / Sandro Luis da
Silva Miranda. – 2024.
69 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Aquicultura, Rio Grande/RS,
2024.

Orientador: Dr. Luís Henrique da Silva Poersch.

Coorientadora: Dra. Michele Souza.

1. Carcinicultura 2. Efluente 3. Bioflócos 4. Biodigestor 5. Biogás
I. Poersch, Luís Henrique da Silva II. Souza, Michele III. Título.

CDU 639.512

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



ATA 05/2024
DE DEFESA DA 234ª DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AQUICULTURA

No dia vinte e oito de fevereiro de dois mil e vinte e quatro, às quatorze horas e trinta minutos, reuniu-se a Banca Examinadora de Dissertação de Mestrado em Aquicultura, do SANDRO LUIS DA SILVA MIRANDA, orientado pelo PROF. DR. LUIS HENRIQUE DA SILVA POERSCH composta pelos seguintes membros: PROF. DR. WILSON WASIELESKY JR. (IO/FURG) e a PROFª. DRª. CAROLINE BORGES AGUSTINI (UFRGS). Título da dissertação: "PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCEDENTE DE BIOFLOCOS GERADOS NO CULTIVO DE CAMARÕES MARINHOS EM SISTEMA BFT". Dando início à defesa, o Coordenador Adjunto do PPGAq, Prof. Dr. Luciano de Oliveira Garcia, passou a presidência da sessão ao Prof. Dr. Luis Henrique da Silva Poersch, que na qualidade de orientador, passou a palavra para o candidato apresentar a Dissertação. Após ampla discussão entre os membros da Banca e o candidato, a Banca se reuniu sob a presidência do Coordenador. Durante esse encontro ficou estabelecido que as sugestões dos membros da Banca Examinadora devem ser incorporadas na versão final da dissertação, ficando a cargo do Orientador o cumprimento desta decisão. O candidato SANDRO LUIS DA SILVA MIRANDA foi considerado APROVADO, devendo a versão definitiva da Dissertação ser entregue a Secretaria do PPGAq, no prazo estabelecido nas Normas Complementares do Programa. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, será assinada pela Banca Examinadora, pelo candidato e pelo Coordenador em exercício do PPGAq.

Documento assinado digitalmente
gouvbr LUIS HENRIQUE DA SILVA POERSCH
Data: 12/03/2024 15:49:58 -0300
Verifique em <https://validar.furg.br>

- PROF. DR. LUIS HENRIQUE DA SILVA POERSCH (ORIENTADOR – IO/FURG)

Documento assinado digitalmente
gouvbr WILSON FIMIOSCO NETTO WASIELESKY JUN
Data: 12/03/2024 18:11:21 -0300
Verifique em <https://validar.furg.br>

- PROF. DR. WILSON WASIELESKY JR. (IO/FURG)

Documento assinado digitalmente
- PROFª DRª CAROLINE BORGES AGUSTINI (UFRGS) **gouvbr** CAROLINE BORGES AGUSTINI
Data: 12/03/2024 08:29:04 -0300
Verifique em <https://validar.furg.br>

Documento assinado digitalmente
gouvbr SANDRO LUIS DA SILVA MIRANDA
Data: 12/03/2024 15:41:58 -0300
Verifique em <https://validar.furg.br>

- SANDRO LUIS DA SILVA MIRANDA

Documento assinado digitalmente
gouvbr LUCIANO DE OLIVEIRA GARCIA
Data: 08/03/2024 18:30:58 -0300
Verifique em <https://validar.furg.br>

- PROF. DR. LUCIANO DE OLIVEIRA GARCIA (Coordenador Adjunto do PPGAq)

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS	viii
LISTA DE TABELA	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE GRÁFICOS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO GERAL	xiii
ABSTRACT	xiii
1. Introdução	15
2. Objetivo	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. Material e métodos	18
3.1 Local de realização dos experimentos.....	19
3.2 Composição dos resíduos de cultivo de camarões.....	19
3.3 Coleta de efluentes e preparo dos substratos	19
3.4 Instalação e operação dos biodigestores anaeróbios.....	26
3.5 Delineamento experimental	28
3.6 Digestão anaeróbia de resíduos de cultivo de camarão com inóculo LGA.....	29
3.7 Potencial do lodo de cultivo para a produção de biogás	31
3.8 Composição e purificação do biogás: metano como fonte de energia.....	35
3.9 Cromatografia da composição do biogás e verificação do teor de metano	35
4. Resultados e discussão.....	36
4.1 Composição do lodo de cultivo de camarão em BFT	36
4.2 Contexto de reação	38
4.2.1 <i>Remoção e redução de parâmetros</i>	38
4.2.2 <i>Condutividade elétrica, pH e nutrientes</i>	41
4.2.3 <i>Produção diária e acumulada de Biogás</i>	44
4.2.4 <i>Produção de biogás no sistema contínuo de degradação anaeróbia</i>	48
4.2.5 <i>Potencial de produção de biogás</i>	51

<i>4.2.6 Confirmação da presença de metano no Biogás por queima controlada.....</i>	<i>55</i>
<i>4.2.7 Quantificação do Potencial metanogênico por cromatografia dos gases em resíduos de cultivo de camarões.....</i>	<i>56</i>
5. Conclusão	61
5.1 Conclusões e Considerações finais	61
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	64
6. Referências	66

*A Deus, sempre. À minha família, aos meus pais (em memória), Francisco Rosemiro e Maria de Nazaré.
Aos meus irmãos. Em especial aos meus amores Carolina, Luísa, Sávio e Sandro, minha fonte de
inspiração e razão de viver.*

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelos recursos e bolsa concedidos que possibilitaram a execução da ciência no Brasil, expresso minha sincera apreciação. Um especial agradecimento aos nossos apoiadores Refinaria de Petróleo Riograndense, Prêmio Guabi, Trevisan, AllAqua, Inve e Aquatec pelo suporte e apoio irrestrito em todas as etapas deste trabalho, essenciais para a realização de nossas pesquisas.

Ao programa de Pós-graduação em Aquicultura, em nome de todos os professores e pesquisadores da Estação Marinha de Aquicultura, e principalmente ao Projeto Camarão, agradeço pela oportunidade e pela enorme aprendizagem adquirida neste tempo de trabalho.

A meu orientador Luís Henrique S. Poersch, expresso minha gratidão pelo ensinamento, dedicação e profissionalismo em todas as etapas deste estudo. Aos professores Wilson Wasielesky, Geraldo Foes e Luciana Silva, agradeço pelo auxílio em minha pesquisa e pelo ensinamento recebido.

Aos colegas e amigos da EMA, que estiveram comigo em tantos momentos, ajudando-me em tudo que foi preciso, meu sincero agradecimento.

Acima de tudo, expresso minha gratidão a Deus e aos meus amigos espirituais por todas as oportunidades concedidas e pelo apoio constante que me permitiu aproveitá-las ao máximo. Aos meus amados pais (in memoriam), Francisco Rosemiro e Maria de Nazaré, agradeço pelo apoio incondicional e pela inspiração que sempre foram para mim. Suas lições de amor e dedicação deixaram marcas profundas em meu coração, impulsionando-me a alcançar meus sonhos com determinação. Seu legado perdurará em minha jornada, e sou eternamente grato por ter sido guiado por seus exemplos. A Ana e Madalena pela paciência e compreensão de sempre. Aos meus queridos filhos Sandro, Sávio, Luísa e Carolina, expresso minha profunda gratidão por serem o motivo mais valioso da minha vida. Seu amor incondicional preenche meu coração de alegria e gratidão.

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Quantitativos de Lodo <i>In natura</i> (LIN), Lodo Dessalinizado (LD), Lodo <i>In natura</i> + Inóculo (LINI) e Lodo Dessalinizado + Inóculo (LDI) e sólidos totais (ST) nos biodigestores por tratamento.....	21
Tabela 2. Proporções (%) de efluentes do cultivo de camarões e inóculo utilizados nesta pesquisa.....	28
Tabela 3. Rendimento de metano de resíduos orgânicos reportados na literatura.	30
Tabela 4. Dados de correção do volume de biogás.....	34
Tabela 5. Referenciais do potencial de produção de biogás nos tratamentos.	35
Tabela 6. Características do lodo gerado pelo cultivo de camarões (<i>L. vannamei</i>) em sistemas de BFT.....	37
Tabela 7. Características físico-químicas do lodo gerado pelo cultivo de camarões (<i>Litopenaeus vannamei</i>) em sistemas de BFT. Os parâmetros analisados incluíram: sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (SV), potencial de hidrogênio (pH), nitrogênio total (N total), fósforo total (P total) e potássio (K). Essas características referem-se ao lodo coletado por esta pesquisa.	37
Tabela 8. Características físico-químicas do efluente do cultivo de camarão em triplicas, sob diferentes tratamentos. pH = potencial de hidrogênio; N total= nitrogênio total; P total = fósforo total; K = potássio.	38
Tabela 9. Eficiência de remoção de ST, SVT nos quatro tratamentos.	39
Tabela 10. Concentrações médias de ST e SVT afluente e reduções e porcentagem de reduções de ST e SVT nos 4 tratamentos após 60 dias.	40
Tabela 11. Condutividade elétrica, pH, concentração de NO ₂ -N e NO ₃ -N, PO ₄ afluente e efluente nos 4 tratamentos.	43
Tabela 12. Produção média total de biogás, produção de biogás em relação aos substratos adicionados e em relação aos ST e STV adicionados e reduzidos nos 4 tratamentos. ...	51
Tabela 13. Análises Cromatográficas dos gases gerados em diferentes tratamentos. ...	59

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** (a) Tanque/Estufa - GH4. Cultivo de camarão marinho *L. vannamei* em sistema BFT. (b) Efluentes adensados em clarificadores acoplados aos tanques de cultivo..... 19
- Figura 2.** (a) Frontal da planta de produção de biogás (escala laboratorial): 1 - Biorreator anaeróbio, 2 - Lavagem de biogás (retenção de CO₂ e H₂S), 3 - Gasômetro, 4 - Proveta/ Vol. De CH₄ e 5 - Reservatório de Biometano. (b) Perfil do sistema. 22
- Figura 3.** (a) Aparato de retenção e controle de biomassa e gases na Câmara de digestão. (b) Biodigestores em banho-maria. 23
- Figura 4.** (a) Biodigestores e manômetros. (b) Câmara de acúmulo de CH₄ e transferência da água para manômetro de coluna d'água. 25
- Figura 5.** Biorreator abastecido de substrato para biodigestão em batelada (a). Mostra de Lodo decantado para biodigestão (b). 26
- Figura 6.** (a) Lodo Granular Anaeróbio (LGA) resultante do tratamento de efluentes da parboilização de arroz. (b) Estrutura dos grânulos e produtos das interações físico-químicas e microbiológicas. 29
- Figura 7.** Proveta de coleta de água para a medição indireta do volume de metano produzido. 32
- Figura 8.** Teste de queima do biogás. (a) Transferência de biogás para a câmara pneumática. (b) Queima de metano com uso de um similar de bico de Bunsen. 56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Produção média acumulada de biogás (m ³) e desvio padrão da produção média acumulada de biogás nos quatro tratamentos. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas pelo teste de Tuckey ($p < 0,05$).....	45
Gráfico 2. Evolução da produção média semanal acumulada de biogás (m ³) ao longo de oito semanas.....	48
Gráfico 3. Produção média semanal de biogás e desvio padrão da produção média semanal, nos tratamentos: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4.....	50
Gráfico 4. Análise da primeira amostra: teor percentual e desvio padrão de metano no biogás por tratamento na pesquisa.	57
Gráfico 5. Análise da segunda amostra: teor percentual e desvio padrão de metano no biogás por tratamento na pesquisa.	57
Gráfico 6. Análise da terceira amostra: teor percentual e desvio padrão de metano no biogás por tratamento na pesquisa.	58

LISTA DE ABREVIATURAS

CH ₄	Metano
AVG	Ácidos graxos voláteis
APHA	American Public Health Association
C/N	Razão entre Carbono e Nitrogênio
CNPT	Condições Normais de Temperatura e Pressão (273,15 K; 1 atm)
CO ₂	Dióxido de carbono
COT	Carbono Orgânico Total (gCOT.g ⁻¹)
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio (gO ₂ .L ⁻¹)
g	Gramas
K	Potássio
Kg	Quilograma
l	Litro
N	Nitrogênio
NH ₃	Amônia
NT	Nitrogênio total
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PT	Fósforo total
R.ST	Redução de sólidos totais
R.SV	Redução de sólidos voláteis
R.SVa	Sólidos voláteis afluentes
S	Enxofre
ST	Sólidos totais (gST.g ⁻¹)
STa	Sólidos totais afluentes;
Ef. R. ST	Eficiência de remoção de ST
Ef. R. SV	Eficiência remoção de SV
SV	Sólidos voláteis (gSV.g ⁻¹)
TRH	Tempo de retenção hidráulica.
FAO	Food and Agriculture Organization;
GEE	Gases do efeito estufa;

RESUMO GERAL

No contexto do desenvolvimento sustentável da Aquicultura, a busca por novas abordagens de gerenciamento e tratamento dos efluentes assume papel de extrema relevância. O objetivo é minimizar impactos ambientais e aprimorar insumos usados na atividade, por meio de reutilização ou reciclagem. O Brasil, reconhecido por sua produção agropecuária e aquícola, tem considerável potencial em matérias-primas convertíveis em bioenergia. Este estudo concentrou-se na avaliação da viabilidade de empregar o efluente resultante da carcinicultura, focando no cultivo superintensivo de camarões marinhos (*Litopenaeus vannamei*) via Tecnologia de Bioflócos (BFT), para gerar biogás por biodigestão anaeróbia. Experimentos detalhados investigaram o impacto da salinidade do lodo de cultivo de camarão na composição do biogás e os efeitos da adição de inóculo microbiológico durante o processo de biodigestão. Biorreatores em sistema de batelada, com delineamento experimental completamente casualizado, foram utilizados. Foram realizadas duas experiências separadas com dois tratamentos e cada tratamento foi replicado em triplicata. Os dados foram submetidos a análises estatísticas para detectar diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Os resultados demonstraram que a produção de biogás foi fortemente influenciada pelas diversas condições de tratamento. Os tratamentos utilizando lodo de camarão *in natura* e lodo dessalinizado apresentaram os maiores potenciais de produção (1,686 m³/l, 1,851 m³/l) e volume diário (0,84 L CH₄/kgSV⁻¹d⁻¹, 0,90 L CH₄/kgSV⁻¹d⁻¹) de metano. No entanto, a adição de inóculo microbiológico teve impacto negativo, possivelmente devido à competição microbiana e ao desequilíbrio entre carbono e nitrogênio. Análise cromatográfica confirmou a predominância de metano (CH₄) entre 37,05% e 42,40%, validada por teste de combustão que indicou, no mínimo, 50% de metano no biogás. Essas constatações reforçam a viabilidade da conversão dos resíduos da carcinicultura em gás metano. Além disso, o estudo ressalta o potencial do lodo de camarão gerado pela Tecnologia de Bioflócos (BFT) na produção de biogás. Essa abordagem ajuda a produzir energia limpa, a manter a sustentabilidade na produção e a controlar resíduos, reduzindo o impacto no meio ambiente. Essas descobertas são importantes para avanços na carcinicultura sustentável, em linha com a proteção ambiental global.

Palavras-chaves: Carcinicultura; Efluente; Bioflócos; Biodigestor; Biogás.

ABSTRACT

In the context of sustainable Aquaculture development, the search for new approaches to manage and treat effluents assumes a role of extreme relevance. The goal is to minimize environmental impacts and improve inputs used in the activity, through reuse or recycling. Brazil, recognized for its agricultural and aquaculture production, has considerable potential in raw materials convertible to bioenergy. This study focused on evaluating the feasibility of using effluents resulting from shrimp farming, focusing on the super-intensive cultivation of marine shrimp (*Litopenaeus vannamei*) through Biofloc Technology (BFT), to generate biogas through anaerobic digestion. Detailed experiments investigated the impact of shrimp farming sludge salinity on biogas composition and the effects of adding microbiological inoculum during the digestion process. Batch reactors, with completely randomized experimental design, were used. Two separate experiments were conducted with two treatments, and each treatment was replicated in triplicate. Data were subjected to statistical analyses to detect statistically significant differences between treatments. Results showed that biogas production was strongly influenced by various treatment conditions. Treatments using raw and desalinated shrimp sludge showed the highest production potentials (1.686 m³/l, 1.851 m³/l) and daily volume (0.84 L CH₄/kgSV-1d-1, 0.90 L CH₄/kgSV-1d-1) of methane. However, the addition of microbiological inoculum had a negative impact, possibly due to microbial competition and imbalance between carbon and nitrogen. Chromatographic analysis confirmed the predominance of methane (CH₄) between 37.05% and 42.40%, validated by combustion testing indicating a minimum of 50% methane in the biogas. These findings reinforce the feasibility of converting shrimp farming waste into methane gas. Additionally, the study highlights the potential of shrimp sludge generated by Biofloc Technology (BFT) in biogas production. This approach helps produce clean energy, maintain production sustainability, and control waste, reducing environmental impact. These discoveries are significant for advancements in sustainable shrimp farming, in line with global environmental protection.

Keywords: Shrimp Farming; Effluent; Biofloc; Biodigestor; Biogas.

1. Introdução

No contexto da produção de energia por fontes renováveis, a geração de biogás no país atingiu 1,4% em 2021 (EPE, 2022). Com 755 plantas de Biogás em operação no território nacional, o setor produziu 2,3 bilhões Nm³ de biogás em 2021, com uma estimativa de crescimento de 22% na produção para o ano de 2022. Desse volume produzido, o setor agropecuário foi responsável por 80% das plantas de biogás em operação. Os setores industrial e de saneamento contribuíram com 11% e 9%, respectivamente. Quanto ao volume de biogás, o setor de saneamento foi responsável por 74% do total produzido, seguido pela indústria (16%) e agropecuária (10%). Em termos de aplicação do volume de biogás gerado, 71% foi destinado à geração de energia elétrica, e 7% à geração de energia térmica. Quanto à operação das plantas, 87% das plantas foram destinadas à produção de biogás para geração de energia elétrica e 11% para o aproveitamento térmico do biogás.

Em termos de aplicação, as unidades que utilizam o biogás para produzir energia mecânica somam seis plantas, e as unidades que possuem sistema de purificação de biogás com geração de biometano para autoconsumo ou comercialização chegam a dez plantas, o equivalente a 1% do total de plantas do país. Entretanto, em termos de volume, elas correspondem a 23% do biogás produzido em 2021. Apesar da efetiva participação das energias renováveis na matriz energética, a diversificação da matriz elétrica ainda precisa ocorrer com a participação de fontes alternativas renováveis. A baixa participação pode ser explicada pelo baixo custo da energia gerada nas hidroelétricas em comparação com outras fontes de energia. A transição energética passa pelo reconhecimento do potencial das fontes disponíveis para aproveitamento.

Embora o Brasil seja um dos maiores produtores agrícolas do mundo, com uma produção anual de 394 Mt de resíduos agropecuários, essa fonte não é bem explorada (EPE, 2019). Sua priorização facilitaria a transição energética e traria vantagens para o setor produtor, sociedade e meio ambiente. Dados gerados em pesquisa do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2018) mostraram que a geração de energia através de biomassa dedicada da agropecuária evitaria a emissão de 8,3 MtCO₂e em 2030, equivalentes a 20,2% das emissões no sistema interligado nacional (SIN) esperadas para o ano de 2016. Entre 2022 e 2030, seriam mitigadas as emissões de 40 MtCO₂e, equivalentes a 73% das emissões totais do setor elétrico naquele ano. O setor

agropecuário está entre as principais fontes de emissão de metano para o meio ambiente, contribuindo substancialmente para o aumento das concentrações de gases de efeito estufa dispersos na atmosfera. A adoção da biodigestão desses resíduos e efluentes certamente garante a redução da carga orgânica dispersa no ambiente, contribuindo para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a produção de bioenergia.

Em contrassenso ao potencial de produção e às estimativas futuras para o biogás brasileiro, grande parte da biomassa produzida pelas agroindústrias ainda é tratada como rejeito, e a destinação final representa um problema a ser superado em praticamente todas as regiões do país. Comumente, esses subprodutos são submetidos a queima ou descartados no ambiente sem o adequado tratamento, ocasionando danos ao meio ambiente (Sater et al., 2011; Brand et al., 2002). No meio agropecuário, a carcinicultura é uma atividade de expressiva relevância econômica mundial, estabelecida em diversos países. Entre os anos de 2015 e 2019, o cultivo de camarões teve um incremento de 36%, produzindo 6.549 mi/ton. (FAO, 2022). A Ásia concentra a maioria dos empreendimentos de cultivos, sendo responsável por 59% da produção mundial de camarão (FAO 2022). Na América Latina, o Equador é o quarto maior produtor mundial de camarão cultivado e o maior produtor das Américas (Vidal, 2024). O Brasil pode vir a competir pela liderança na produção mundial desse setor, pois dispõe de 600.000 ha de áreas apropriadas para desenvolver o cultivo de camarões, além de outras excelentes condições para viabilizar essa exploração (Vidal, 2016). Em conformidade com isso, a carcinicultura brasileira produziu em 2020, 112.000 toneladas de camarão, com taxa de crescimento de 16,9% a.a. (ABCC, 2020), ratificando assim o elevado potencial do Brasil para o fornecimento de proteína animal e, conseqüentemente, matéria-prima que pode resultar em bioenergia. Entretanto, deve-se ressaltar que a carcinicultura, assim como outras áreas da indústria aquícola, enfrenta desafios em relação aos passivos ambientais, buscando solidez, competitividade e lucro.

A produção de camarões ocorre a partir de sistemas de cultivo, categorizados como extensivos, semi-intensivos e intensivos, em viveiros naturais, tanques escavados ou tanques suspensos. Esses sistemas aquícolas levam em conta a quantidade de nutrientes, densidade de estocagem (quantidade de animais por metro quadrado), nível tecnológico e manejo utilizado. Nesse cenário, novas tecnologias vêm sendo aplicadas com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema, impulsionando a produtividade e

reduzindo os custos de produção. Para isso, a otimização do consumo de água e a diminuição do descarte de resíduos e efluentes no ambiente são premissas fundamentais.

O sistema de tecnologia de Bioflócos (BFT) é uma alternativa promissora para a geração de energia limpa e redução de impactos ambientais, pois opera com base no reuso total de água ao longo do cultivo e no maior controle dos resíduos produzidos (Wasiolesky et al., 2006; Krummenauer et al., 2014). O lodo gerado nesse processo apresenta os parâmetros necessários para a produção de bioenergia (biogás), que é aproveitada principalmente de três formas: produção de biometano, energia elétrica e geração de energia térmica (Milanez et al., 2021). Este estudo destaca a produção de energia renovável pelo setor da carcinicultura brasileira como uma potencial fonte provedora de matéria-prima bioenergética. Para isso, analisa de forma geral os efluentes e resíduos gerados no cultivo superintensivo de camarões marinhos (*Litopenaeus vannamei*) em Sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) com o objetivo de determinar seu potencial de produção bioenergética.

Melhorar os conhecimentos e desenvolver tecnologias para a geração desse tipo de energia limpa em fazendas de carcinicultura será de grande relevância para aumentar o rendimento da atividade produtiva e mitigar os impactos ambientais desses empreendimentos. Vale ressaltar que um número significativo dessas fazendas não conta com suporte tecnológico ou financeiro para o tratamento dos resíduos sólidos e líquidos gerados na atividade (ABCC, 2017). O crescimento populacional e a expansão das cidades têm aumentado a necessidade de aumento da eficiência na produção agropecuária, devido à crescente demanda por alimentos.

2. Objetivo

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial do efluente gerado na carcinicultura, especificamente no cultivo superintensivo de camarões marinhos (*Litopenaeus vannamei*) em um sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT), para a produção de biogás.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar as influências da salinidade do lodo de cultivo de camarão marinho na composição do biogás;
- Analisar o efeito da incorporação de inóculo (Lodo Granular Anaeróbio - aglomerado de microrganismos), proveniente de um reator UASB utilizado para o tratamento da água de parboilização de arroz, no processo de biodigestão anaeróbia do lodo gerado pelo cultivo de camarão marinho.

3. Material e métodos

Aqui são descritos os materiais e métodos empregados neste estudo relacionado à produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos provenientes do cultivo de camarões marinhos, utilizando a tecnologia de Bioflócos (BFT). O processo de montagem dos biorreatores foi minuciosamente delineado, assim como a origem do substrato e do inóculo empregados. Adicionalmente, são apresentadas as condições operacionais adotadas ao longo da pesquisa, incluindo detalhes sobre temperatura, pH, salinidade e demais parâmetros pertinentes.

Dois aspectos cruciais foram abordados com o intuito de alcançar os objetivos estabelecidos por esta investigação. Em primeiro lugar, examinaram-se os efeitos da salinidade presente no lodo do referido cultivo de camarões sobre a composição do biogás produzido. Além disso, procedeu-se à análise das repercussões da adição de inóculo microbiológico no processo de biodigestão anaeróbia do mencionado lodo. Ao concluir este estudo, são apresentados os resultados primordiais alcançados, acompanhados de uma avaliação crítica dos métodos empregados.

3.1 Local de realização dos experimentos

Os estudos foram realizados na Estação Marinha de Aquacultura (EMA) pertencente ao Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, localizado na cidade do Rio Grande, Cassino - RS, Brasil (32° 12'14" S, 52° 10'40" W).

3.2 Composição dos resíduos de cultivo de camarões

As amostras dos resíduos de cultivo foram submetidas a análises físico-químicas no Laboratório EMA FURG. Foram determinados os teores de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), pH, condutividade elétrica (CE), nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Todas as análises foram realizadas de acordo com os métodos, padrões e normas descritos no livro Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

3.3 Coleta de efluentes e preparo dos substratos

Para coletar o lodo gerado pelo cultivo de camarões, utilizou-se o decantador de bioflócos do tanque número 3 da estufa GH4 (Figura 1) na Estação Marinha de Aquicultura (EMA/FURG). Dois volumes de lodo (efluente adensado) foram coletados: um para uso *in natura* e outro para o processamento físico-químico de dessalinização.

Figura 1. (a) Tanque/Estufa - GH4. Cultivo de camarão marinho *L. vannamei* em sistema BFT. (b) Efluentes adensados em clarificadores acoplados aos tanques de cultivo.



Fonte: Autor (2023)

Após a coleta, realizou-se a análise de determinação de sólidos totais (ST), seguindo a metodologia descrita pela APHA (2017) conforme recomendado pela Legislação do CONAMA 357/06 para a preparação do substrato.

A coleta do lodo foi realizada utilizando dois baldes plásticos com capacidade de 20 litros cada, e uma caixa d'água com volume de 500 litros, garantindo assim uma adequada amostragem dos resíduos em termos de volume. Para o experimento de análise da adição de inóculo (microrganismos) no processo de biodigestão anaeróbia do lodo de cultivo de camarão marinho, utilizou-se o Lodo Granular Anaeróbio – LGA, proveniente de um reator de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) para tratamento de água de parboilização de arroz, cedido pela empresa Sanitec – Pelotas/RS.

Os procedimentos de preparo e divisão dos substratos (lodo de camarão e inóculo LGA) para o confinamento nos biodigestores foram realizados imediatamente após a coleta nos decantadores. Essa etapa foi conduzida durante um período de 3 horas para evitar uma fermentação excessiva e possíveis perdas na produção de biogás durante o tempo de retenção hidráulica.

A dessalinização do lodo foi realizada através da lavagem com água doce. Neste processo, a água doce foi empregada para enxaguar o lodo salino, resultando na remoção dos sais dissolvidos e na produção de um lodo dessalinizado. A proporção de água doce utilizada foi de 2 partes para cada parte de lodo, determinada com base na capacidade de solubilização dos sais pelo volume de água adicionado e na necessidade de uma remoção eficiente dos sais para alcançar os padrões desejados de qualidade do lodo tratado.

Com o propósito de otimizar a interação entre os microrganismos e o substrato, o lodo de cultivo de camarão foi homogeneizado mecanicamente utilizando um balde de 20 litros e um bastão. A concentração de Sólidos Totais (ST) no lodo de cultivo foi determinada pelo método proposto pela American Public Health Association (APHA) em 2005, resultando em valores de 25,19%, 25,20%, 26,62% e 23,46% para os tratamentos Lodo *natura* (LIN), Lodo Dessalinizado (LD), Lodo *in natura* + Inóculo (Lodo LGA) (LINI) e Lodo Dessalinizado + Inóculo (Lodo LGA) (LDI), respectivamente. Posteriormente, realizaram-se cálculos para determinar as quantidades ideais de substratos, ou seja, lodo e inóculo (LGA), que seriam adicionadas a cada biodigestor. Essa abordagem levou em consideração as características individuais de volume e composição (I/S) predefinidas para cada tratamento empregado nos experimentos. Como

resultado, obteve-se uma concentração de matéria orgânica com teores de sólidos totais em torno de 26%. Essa metodologia segue a mesma abordagem descrita e empregada com sucesso em estudos anteriores de referência (Otaraku e Ogedengbe, 2013; Salam et al., 2015).

Estudos indicam que maiores proporções de inóculo podem melhorar a eficiência da digestão anaeróbia, conforme mencionado por Li et al. (2011). Esses procedimentos garantiram um adequado preparo dos biorreatores para a realização do processo de biodigestão de maneira controlada e precisa. A razão entre o inóculo (lodo anaeróbio) e o substrato em termos de sólidos voláteis foi calculada com base na Equação 4:

(Eq.4)

$$Razão = \frac{\text{Quant. Inoc (kgSV)}}{\text{Quant. Inoc (kgSV)}}$$

Portanto, a razão entre inóculo e substrato em termos de sólidos voláteis é de 2, indicando a proporção precisa de 2 gramas de inóculo de lodo anaeróbio adicionados ao reator para cada grama de substrato. Essa estratégia de dosagem assegura a presença adequada de microrganismos essenciais para o processo. A Tabela 1 fornece detalhes sobre as quantidades específicas de lodo de camarão e inóculo empregadas para alimentar os biodigestores, reforçando o controle rigoroso das quantidades para alcançar os objetivos experimentais. Adicionalmente, a origem da água utilizada, proveniente da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento - CORSAN, é essencial para manter a consistência e o equilíbrio do processo de digestão anaeróbia.

Tabela 1. Quantitativos de Lodo *In natura* (LIN), Lodo Dessalinizado (LD), Lodo *In natura* + Inóculo (LINI) e Lodo Dessalinizado + Inóculo (LDI) e sólidos totais (ST) nos biodigestores por tratamento.

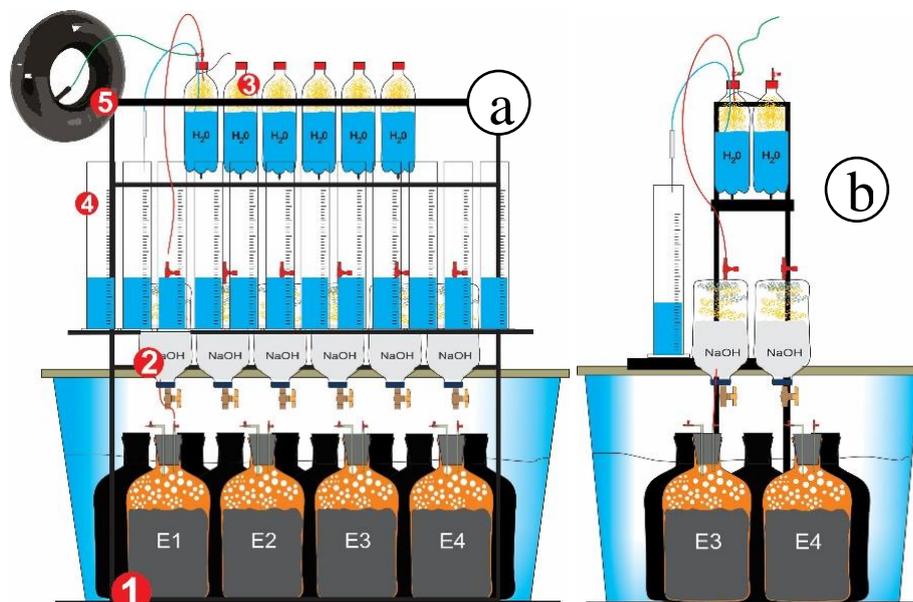
Tratamento	LIN (ml)	LD (ml)	LINI (ml)	LDI (ml)	Vol. Total (ml)	ST (mg/L)
T1 (control)	12.276				12.276	7.461,11
T2		12.276			12.276	7.672,22
T3			8.184 + 4,092		12.276	7.861,11
T4				8.184 + 4.092	12.276	7.022,22

Fonte: Autor (2023)

Foram realizados experimentos com 12 módulos biorreatores, conforme mostrado na Figura 2. Cada unidade era composta por quatro elementos principais:

1. Biorreator (Câmara de fermentação): Um garrafão de vidro com capacidade máxima de 20 litros, onde 12,3 litros eram destinados ao volume reacional e 7,7 litros ao headspace.
2. Câmara de Lavagem: Um galão de PET de 5 litros utilizado para remover impurezas do biogás gerado, purificando-o.
3. Gasômetro de Metano: Uma garrafa PET de 2 litros, acompanhada de uma proveta plástica de 1000 ml, empregada para medir indiretamente o volume de metano produzido através da transferência de água por pressão de gás, seguindo a Lei de Boyle-Mariott. Isso possibilitava a avaliação do volume de metano gerado.

Figura 2. (a) Frontal da planta de produção de biogás (escala laboratorial): 1 - Biorreator anaeróbico, 2 - Lavagem de biogás (retenção de CO₂ e H₂S), 3 - Gasômetro, 4 - Proveta/ Vol. De CH₄ e 5 - Reservatório de Biometano. (b) Perfil do sistema.

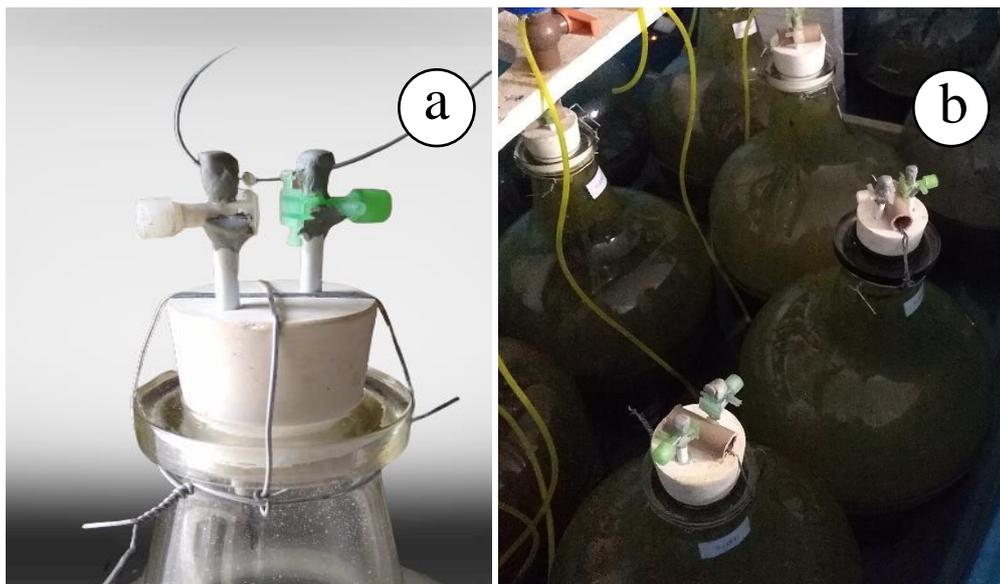


Fonte: Autor (2023)

Os biorreatores foram equipados com rolhas de borracha e duas válvulas, utilizadas para reter e controlar a vazão do biogás produzido, além de permitir a coleta de amostras de gases para análises cromatográficas, físico-químicas e microbiológicas, conforme ilustrado na Figura 3. Para monitoramento da temperatura diária nos experimentos, foi utilizada uma estrutura composta por uma caixa d'água de 1000 litros.

Os biorreatores foram colocados dentro dessa caixa d'água para serem submetidos ao banho-maria. O controle de temperatura foi realizado por meio de termostatos, mantendo-a variando entre 28,4 °C e 36,9 °C, com uma média de 34,1 °C ao longo do período experimental.

Figura 3. (a) Aparato de retenção e controle de biomassa e gases na Câmara de digestão. (b) Biodigestores em banho-maria.



Fonte: Autor (2023)

O sistema de biodigestor é composto por diversas etapas e componentes que desempenham papéis fundamentais para garantir o funcionamento eficiente do processo de biodigestão. Conforme destacado por Pordesimo et al. (2004), a câmara de fermentação é uma das partes mais cruciais do biodigestor, pois é nela que ocorre a decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos. Outro fator igualmente importante que afeta o rendimento final do biogás é a mistura do conteúdo (biomassa) no interior dos biodigestores (Kozłowski et al., 2018). Nesse sentido, a importância do sistema de agitação é enfatizada pelos autores, pois possibilita a mistura homogênea do material orgânico e uma aeração adequada para a fermentação.

Na maioria dos sistemas industriais, a agitação pneumática é utilizada, sendo estabelecida em função da recirculação de biogás, causando homogeneização no meio reacional por borbulhamento no líquido ou por um processo conhecido como gás lift. Neste método, o biogás é soprado pelo fundo do biodigestor para o seu interior, originando bolhas de gás que, em um movimento vertical de baixo para cima, promovem

a mistura do substrato. Esses sistemas têm a vantagem de terem as partes mecânicas necessárias para a mistura (bombas e compressores) localizadas fora do biodigestor, sofrendo, portanto, menos desgaste (PROBIOGÁS, 2010).

É crucial monitorar a integridade dos reatores e agir prontamente diante de qualquer vazamento durante a agitação pneumática, a fim de minimizar o impacto no sistema e garantir a continuidade das operações de tratamento. A ocorrência de vazamentos pode acarretar várias consequências negativas, afetando tanto a eficiência do processo de digestão anaeróbia quanto a qualidade do tratamento de resíduos. Se o vazamento resultar na entrada de oxigênio (O₂) no reator anaeróbio, isso pode inibir ou até mesmo interromper a atividade dos microrganismos anaeróbios responsáveis pela decomposição da matéria orgânica. Como consequência, a eficiência do processo de tratamento de resíduos pode ser significativamente reduzida. Por outro lado, uma agitação excessiva decorrente de um vazamento pode levar à desagregação ou desestabilização dos flocos microbianos presentes no reator anaeróbio. Isso pode resultar em uma diminuição na eficácia da remoção de sólidos.

O controle e monitoramento das variáveis do biodigestor também são essenciais para assegurar a eficiência do processo. Conforme apontado por Ariunbaatar et al. (2021), o controle do pH é crítico para manter a atividade microbiana e evitar a ocorrência de inibidores, enquanto o controle de temperatura é importante para garantir a atividade ideal dos microrganismos. Além disso, o permanente monitoramento da produção de biogás é de suma importância para avaliar o desempenho do sistema e detectar possíveis problemas. No que diz respeito ao tratamento do biogás produzido, é comum empregar sistemas de purificação para eliminar impurezas, como dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e outros gases indesejados. O sistema de purificação do biogás (Figura 4) desempenha um papel crucial no funcionamento do sistema de biodigestão, garantindo a utilização segura do biogás como fonte de combustível em uma variedade de aplicações.

Neste trabalho, ao considerar a estrutura disponibilizada (Figura 4) para o processamento anaeróbio dos resíduos de camarão, o biogás produzido durante o processo era encaminhado para a Câmara de Lavagem, que consiste em um recipiente de PET de 5 litros, contendo 2 litros de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) (0,5 mol/L⁻¹).

Figura 4. (a) Biodigestores e manômetros. (b) Câmara de acumulo de CH₄ e transferência da água para manômetro de coluna d'água.



Fonte: Autor (2023)

O fluxo de biogás borbulhado através da solução aquosa de hidróxido de sódio gera uma zona de turbulência, otimizando o contato entre o líquido e o gás e, conseqüentemente, a reação química de absorção das impurezas presentes no biogás, especialmente a remoção de CO₂ e H₂S, resultando em sua purificação. A vazão do biogás é determinada pela transferência de gás para o Gasômetro de Metano, constituído por uma garrafa PET de 2 litros de capacidade. Essa garrafa, contendo água, funciona como um reservatório que armazena o biogás gerado. À medida que o gás acumula gradativamente no interior da garrafa, ele pressiona a água presente no recipiente, que por sua vez é transferida para uma proveta graduada de 1000 ml. O volume aferido corresponde ao volume de metano no reservatório, seguindo o princípio de Mariotte.

Em resumo, a estrutura do biodigestor é composta por vários componentes que por etapas atuam em conjunto para converter a biomassa em biogás e fertilizante orgânico. O controle e monitoramento das variáveis do biodigestor são fundamentais para assegurar a eficiência do processo, enquanto o sistema de purificação do biogás é essencial para permitir o uso seguro do biogás produzido.

3.4 Instalação e operação dos biodigestores anaeróbios

Os biodigestores utilizados nesta pesquisa seguem o modelo de batelada (Figura 5). Esse sistema é simples e requer pouca operação. Operando de forma descontínua, é uma ótima opção para locais com baixa disponibilidade de matéria orgânica. Nele, o fornecimento de substratos para degradação nos biorreatores ocorre em uma única etapa durante um longo período de fermentação. De acordo com Bonturi e Van Dijk (2012), a produção de metano nesse sistema começa após 20 dias de biodigestão, atingindo o pico na terceira semana e diminuindo gradualmente ao longo de cerca de 90 dias de fermentação. O modelo de batelada é apropriado para a biodigestão dos resíduos da carcinicultura no sistema superintensivo de bioflocos (BFT), devido à natureza intermitente da geração desses resíduos. Nesse sistema de cultivo, a disponibilidade de matéria orgânica ou substrato ocorre de forma intermitente, apesar das altas densidades de estocagem (Santos et al., 2017).

Figura 5. Biorreator abastecido de substrato para biodigestão em batelada (a). Mostra de Lodo decantado para biodigestão (b).



Fonte: Autor (2023)

Os biodigestores foram instalados em uma sala com pouca ventilação e mantidos a uma temperatura média de 34°C. O tempo de retenção hidráulica (TRH) dos substratos - lodo *in natura* e dessalinizado, bem como nos volumes aditivados com inóculo (LGA) - ocorreu ao longo de um período de 60 dias (7 semanas e 1 dia), iniciando em 28 de agosto de 2022 e terminando em 26 de outubro de 2022. Durante esse período, foram

realizadas medições de pressão e temperatura nos biodigestores. Amostras residuais foram coletadas para análises de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (STV), pH e condutividade elétrica (CE). Além disso, a produção de biogás foi avaliada por meio do deslocamento vertical da coluna d'água na proveta graduada.

Para assegurar o funcionamento adequado do sistema durante a pesquisa, foi desenvolvida uma estrutura operacional específica para a biodigestão. Cada unidade de biodigestor foi construída com os seguintes equipamentos:

- Garrafão de 20 litros: para armazenamento dos resíduos;
- Galão de PET de 5 litros com tampa rosqueada;
- Garrafa PET de 2 litros;
- Proveta Polipropileno Graduada, alto relevo Cap 1000 ml: para registrar diariamente o volume de biogás produzido;
- Rolha de Borracha antiácida (61 mm);
- Divisores de ar (4 und) com registro 4mm (plástico atóxico): para controlar a vazão do biogás;
- Mangueira cristal 11,5x8mm: para canalização do biogás;
- Agulha descartável 25x7 (0,70x25mm);
- Registros de PVC: instalados na tampa de Garrafa PET de 5 litros (lavadores de biogás) para controle da vazão da eliminação de resíduos químicos e troca de solução;
- Cano PVC de 1/2: extensão acoplada ao registro instalado no lavador de gás;
- Válvula de pneu: instalada na base da garrafa PET de 2 litros para entrada de água;
- Lixa preta: utilizada para eliminar qualquer elemento cortante e aparar cortes;
- Furadeira: utilizada para perfuração da rolha de borracha para instalação das chaves de registros de gás;
- Serrinha: utilizada para serrar a mangueira e outros componentes;
- Tesoura;
- Lixa de Água Grão 100: para preparo de superfícies e eliminação de bases cortantes;
- Durepoxi: para fixação e melhora da resistência de componentes da estrutura;
- Cola Araldite: usada nas tampas e conexões para aumentar a resistência e vedação;
- Cola instantânea de alta resistência e secagem rápida: usada na estrutura para aumentar a resistência e vedação;
- Cola trava rosca: utilizada para fixar e vedar o registro de gás na tampa PET;
- Fita veda rosca de 18 x 25 mm e cola para tubos;
- Arame galvanizado e mangueiras de gás.

3.5 Delineamento experimental

Neste estudo, foi empregado um delineamento experimental completamente casualizado para avaliar o potencial do efluente gerado na carcinicultura em um sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) para a produção de biogás. Foram coletadas amostras residuais pontuais nos quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4) para análise de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (STV), pH e condutividade elétrica (CE) em três momentos distintos: no início da biodigestão, no 30º dia e no final da retenção hidráulica de 60 dias.

Também foram investigadas as influências da salinidade do lodo de cultivo de camarão na produção de biogás e os efeitos da adição de inóculo (microrganismos) no processo de biodigestão anaeróbia do lodo.

Foram conduzidos dois experimentos, cada um com dois tratamentos replicados em triplicata para garantir maior confiabilidade dos resultados. Todos os parâmetros foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e a normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk. As médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste de Tukey a 5%. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o programa Statística.

A Tabela 2 apresenta as proporções de lodo de cultivo de camarões e inóculo (LGA) utilizadas em cada tratamento. Esses dados são essenciais para compreender como diferentes composições, incluindo inóculo e concentração de sais nos efluentes de cultivo de camarões, podem afetar o processo de biodigestão anaeróbia.

Tabela 2. Proporções (%) de efluentes do cultivo de camarões e inóculo utilizados nesta pesquisa.

Tratamentos	Lodo <i>natura</i> (%)	<i>In</i> Lodo (%)	Lodo Dessalinizado (%)	Lodo <i>In natura</i> (%) + Inóculo (%)	Lodo Dessal (%) + Inóculo LGA (%)
T1	100				
T2			100		
T3				33,33 + 66,67	
T4					33,33 + 66,67

Fonte: Autor 2023

Com base nos resultados da ANOVA e do teste de Tukey, foi possível avaliar qual tratamento apresentou a melhor performance e determinar a proporção e composição mais adequadas dos substratos para o propósito do estudo. Essas informações são valiosas para

o desenvolvimento de pesquisas futuras e para o avanço do conhecimento na área de estudos de efluentes da aquicultura, especialmente da carcinicultura.

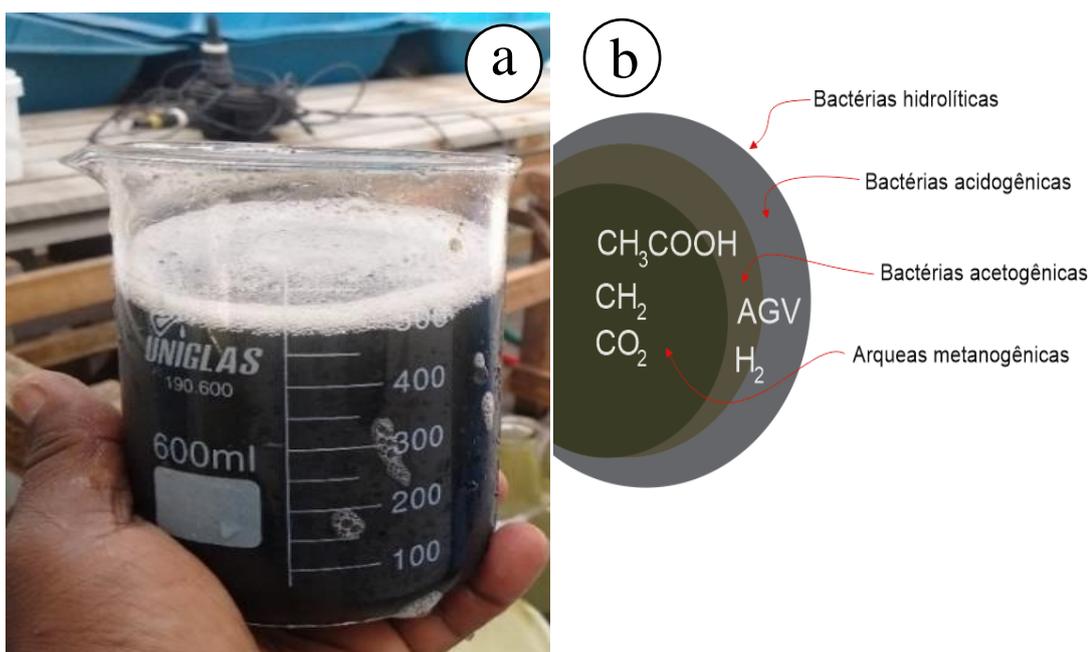
Conforme descrito por HALLIDAY et al. (2009), o volume de biogás gerado é determinado através da equação combinada dos gases ideais, que estabelece uma relação constante entre temperatura, pressão e o volume de um gás.

3.6 Digestão anaeróbia de resíduos de cultivo de camarão com inóculo LGA

O inóculo microbiológico utilizado no início do processo de digestão anaeróbia foi o Lodo Granular Anaeróbio (LGA), obtido do tratamento de efluentes da parboilização de arroz realizado pela empresa Nelson Wendt em Pelotas, RS.

Conforme mencionado por Liu e Tay (2004), a formação de lodo granular anaeróbio é resultado das interações que envolvem processos como agregação, adesão e interdependência metabólica entre as células microbianas, levando à formação de conglomerados densos compostos por microrganismos de diferentes gêneros (Figura 6). Essa estrutura granular do lodo oferece vantagens significativas, como a capacidade de tratar efluentes com alta carga orgânica e resistência a variações na composição dos materiais alimentados nas estações de tratamento de águas residuais.

Figura 6. (a) Lodo Granular Anaeróbio (LGA) resultante do tratamento de efluentes da parboilização de arroz. (b) Estrutura dos grânulos e produtos das interações físico-químicas e microbiológicas.



Fonte: Autor (2022)

Fonte: adaptado de Chernicharo (2007).

Na perspectiva biológica, os grânulos representam uma estrutura multicelular robusta e simbiótica (Abreu, 2007). Estudos conduzidos por Cassini et al. (2003) enfatizam que a estrutura granular facilita a transferência de massa dos produtos gerados em cada etapa do processo.

A avaliação da qualidade do lodo desempenha um papel fundamental na determinação de sua eficácia na produção de biogás. Um parâmetro frequentemente empregado nesse contexto é a atividade metanogênica específica (AME), que quantifica a capacidade dos microrganismos anaeróbios de converter matéria orgânica em Biogás. Por meio da AME, é possível obter insights preciosos sobre a velocidade de decomposição da matéria orgânica durante o processo de digestão anaeróbia. Além disso, a AME desempenha um papel crucial no dimensionamento e controle dos reatores, contribuindo para a eficiência geral do sistema (Chernicharo, 2007).

É importante considerar que, embora a AME seja uma ferramenta valiosa na avaliação da capacidade de produção de metano, este estudo não realizou a análise da AME. Em vez disso, as estimativas foram baseadas em resultados previamente relatados na literatura como nos exemplos da tabela 3.

Tabela 3. Rendimento de metano de resíduos orgânicos reportados na literatura.

Reator	Condições de operação	Inóculo	Rendimento metano (mL CH ₄ .g SV-1)	Referência
Frascos 500 mL (PBM)	S/I = 1:2 (SV); 37°C	Lodo de estação de tratamento de RA, alimento	385 – 627	Li, Y. et al. (2018)
Sistema AMPTS	Análise dos efeitos da <u>trealose</u> e glicina betaína, bem como do <u>potássio</u> sobre a atividade metanogênica específica (SMA);	Lodo de peixe turbot (Scophthalmus maximus) - água salobra.	270 - 330	(Zhang et al., 2014)
AMPTS, digestor anaeróbico mesófilo em escala real (CSTR)	I/S = 50 (SV); 38°C	Lodo esterco de vaca leiteira e silagem de milho	564,2	Da Borso et al. <u>2021</u>
digestor anaeróbio ascendente	I/S = 24-25°C Taxa de alimentação, 2,8 L de lodo fecal bombeados a cada quatro horas no digestor anaeróbio.	Lodo de cultivos de truta de água doce	460 L/kg VS	Lanari et al. (1998)

PBM = potencial bioquímico de metano; CSTR = reatores de tanque agitado contínuo; SV = sólidos voláteis; CO = carga orgânica; COV = carga orgânica volumétrica; S/I = razão substrato/inóculo; TDL = tempo de detenção do lodo; RA = resíduo alimentar.

Esse enfoque se deve ao reconhecimento da relevância da AME, mas também à consideração das limitações de recursos e do escopo da pesquisa. Mesmo sem a realização direta da AME, as estimativas embasadas na literatura contribuem para um entendimento geral das capacidades do sistema em relação à produção de biogás.

Neste estudo, foram coletadas amostras residuais pontuais nos quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4) para análise de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (STV), pH e condutividade elétrica (CE) em três momentos distintos: no início da biodigestão, no 30º dia e no final da retenção hidráulica de 60 dias. Na última coleta, foram obtidas amostras dos digestatos dos quatro tratamentos e enviadas para análise das características físicas, químicas e biológicas em laboratório. A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular os dados de eficiência de remoção de ST, SV e DBO nos tratamentos utilizando a Equação 5 sugerida por Von Sperling (2014):

(Eq.5)

$$E \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100$$

Em que:

E = Eficiência de remoção (%);

E0 = Concentração afluente do resíduo (mg/l)

E1 = Concentração efluente do resíduo (mg/l).

3.7 Potencial do lodo de cultivo para a produção de biogás

A metodologia empregada para avaliar a produção de biogás foi desenvolvida internamente no laboratório de aquicultura da EMA-FURG. Esse método incluiu a utilização de uma estrutura de biodigestão especialmente construída para esta pesquisa, que consiste na conexão de biodigestores a um sistema de lavagem de biogás e medição de metano. Para estimar a produção teórica de biogás, utilizamos uma equação simplificada (Equação 6) com base na produção final de metano, seguindo o referencial de CIBIOGÁS (2020).

(Eq.6)

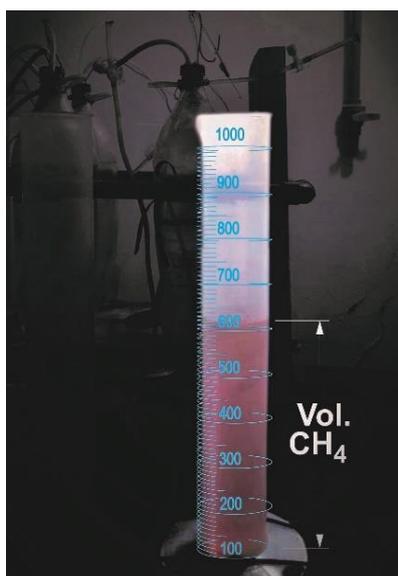
$$\frac{100}{60} = \frac{CH_4}{Biogás}$$

$$Biogás = \frac{100 \times CH_4}{60}$$

A estimativa levou em conta a composição média do biogás para uma digestão anaeróbia plenamente desenvolvida, com aproximadamente 60% de metano e 40% de dióxido de carbono, refletindo o potencial de produção dos substratos utilizados na digestão anaeróbia.

Para a quantificação do volume de biogás gerado, foi feita à aferição da pressão do gás e da temperatura, bem como ao registro do deslocamento vertical da coluna de líquido na proveta graduada, esta última estando conectada ao módulo do biodigestor (vide Figura 7). O monitoramento da temperatura do biogás foi efetuado diariamente por meio de um Medidor Multiparâmetro da marca Hanna, modelo HI98194, cuja sonda era submergida na caixa de água com capacidade de 3 mil litros que abrigava os biorreatores imersos em um sistema de banho-maria. O controle térmico deste sistema de banho-maria foi viabilizado através de três unidades de termostatos com aquecedor da marca Roxin, modelo HT-1300/Q3, cada um com potência de 300W e capacidade de ajuste de temperatura na faixa de 22°C a 34°C. A temperatura ambiente no recinto experimental foi constantemente monitorada por um termômetro de ambiente com precisão de 0,1 °C e margem de erro de ± 1 °C. As medições de temperatura, pressão do biogás e volume de metano produzido nos biorreatores eram realizadas diariamente às 17:00h. Após cada leitura, era feito o reabastecimento da câmara de transferência de água.

Figura 7. Proveta de coleta de água para a medição indireta do volume de metano produzido.



Fonte: Autor (2022)

Os biorreatores acumulavam a produção de biogás por 24 horas. Para quantificar o volume produzido, a chave de registro era aberta, permitindo que o biogás fosse direcionado para a câmara de lavagem. Nessa câmara, ocorria a troca do volume da solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) a cada 72 horas, devido à saturação química dos compostos retidos no processo de lavagem. O Hidróxido de sódio foi utilizado como meio de lavagem para purificar o metano por adsorção de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, garantindo assim que apenas a produção de metano fosse registrada.

O gás metano (CH₄) resultante da lavagem era direcionado para o gasômetro de metano, que estava previamente preenchido com água em sua capacidade total. Durante esse procedimento, o gás metano exercia pressão sobre a água, transferindo-a para fora da câmara, ao mesmo tempo em que ocupava o espaço no gasômetro. A água transferida era acumulada em uma proveta graduada de 1000 ml (reservatório de medição). Nesse caso, a câmara era esvaziada do gás metano e reabastecida diariamente com água, na proporção do volume de gás produzido a cada dia.

A quantificação diária da produção de metano era realizada com base na medição do deslocamento vertical da coluna de água no reservatório de medição indireta. Esse deslocamento estava diretamente relacionado à quantidade de metano presente no biogás. Tais procedimentos foram baseados no princípio de Mariotte e conforme método proposto por Aquino et al. (2007), que estabelece que, a uma temperatura constante, o volume de um gás é inversamente proporcional à pressão exercida sobre ele. Se o volume de um gás for reduzido pela metade, a pressão dobrará, desde que a temperatura permaneça a mesma (Lima, 2014).

A fim de garantir a precisão dos resultados obtidos, foi realizada a correção do volume de biogás produzido para as condições-padrão de 1 atmosfera de pressão e 20°C (conforme mostrado na Tabela 4). Para isso, foi adotada a metodologia proposta por Barana (2000), que considera o fator de compressibilidade do biogás, o qual apresenta comportamento próximo ao ideal. A correção do volume de biogás foi feita utilizando a Equação 7, que combina as leis de Boyle e Gay-Lussac, conforme descrito por Santos (2017). Esses procedimentos são essenciais para garantir a precisão dos dados obtidos e facilitar sua comparação com outras análises realizadas nas mesmas condições-padrão.

(Eq.7)

$$\frac{V_0 \times P_0}{T_0} = \frac{V_1 \times P_1}{T_1}$$

Em que:

V_0 = volume de biogás corrigido, m^3 ;

P_0 = pressão corrigida do biogás, 10.322,72 mm de H_2O ;

T_0 = temperatura corrigida do biogás, em 293,15 K;

V_1 = volume do gás no gasômetro, m^3 ;

P_1 = pressão do biogás no instante da leitura, mm de H_2O ; e

T_1 = temperatura do biogás, em K, no instante da leitura

A pressão do biogás no momento da leitura (P_1) foi calculada usando a média dos valores de pressão atmosférica registrados em Rio Grande, RS, durante o período de retenção hidráulica dos resíduos em questão. Essa média, obtida no site do Instituto Nacional de Meteorologia em janeiro de 2023, foi de 1017,7 hPa (equivalente a 10.389,18 mmH₂O).

Tabela 4. Dados de correção do volume de biogás.

Variável	Descrição	Und de medid	Valor
V_0	Volume de biogás corrigido	m^3	$T_1 = 0,000780$ $T_2 = 0,000791$ $T_3 = 0,000542$ $T_4 = 0,000438$
P_0	Pressão corrigida do biogás	Pa ou mmHg	101305,62 Pa (ou 760,06 mmHg, obtido a partir de 10.322,72 mmH ₂ O)
T_0	Temperatura corrigida do biogás		293,15 (°K)
V_1	Volume do gás no gasômetro: T_1 , T_2 , T_3 e T_4	m^3	0,000797 0,000812 0,000560 0,000454
P_1	Pressão do biogás no instante da leitura	Pa ou mmHg	101305,62 Pa
T_1	Temperatura do biogás no instante da leitura	°K	307

Fonte: Autor (2022)

A avaliação do potencial de produção de biogás nos diferentes tratamentos baseou-se na análise dos dados de produção de biogás, com destaque para as quantidades de substrato, sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (STV) introduzidos e degradados nos biodigestores, conforme detalhado na Tabela 5. Esses parâmetros foram calculados em termos de volume de biogás gerado por unidade de substrato, assim como por unidade de ST e STV, proporcionando uma visão abrangente do desempenho dos processos de biodigestão.

Tabela 5. Referenciais do potencial de produção de biogás nos tratamentos.

Tratamento	ST		STV	
	Inicial	Final (reduzido)	Inicial	Final (reduzido)
T1	7.461,11	5.077,78	3.783,33	3.344,44
T2	7.672,22	5.772,22	3.561,11	3.000,00
T3	7.861,11	3.255,56	6.172,22	3.733,33
T4	7.022,22	4.316,67	6.827,78	3.622,22

Fonte: Autor (2022)

3.8 Composição e purificação do biogás: metano como fonte de energia

O biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), que representam as maiores concentrações presentes nesse gás. Em menor quantidade, o monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e outros gases (Wellinger e Lindberg, 2001). Existem diversas abordagens para determinar a composição e a porcentagem do metano (CH_4) presente no biogás, como a purificação do biogás, a cromatografia gasosa, a espectrometria de massa, a análise infravermelha e o teste de combustão de biogás.

Neste estudo, optou-se por realizar o processo de purificação do biogás, que consiste na eliminação de impurezas indesejáveis, como dióxido de carbono (CO_2), compostos de enxofre (como o sulfeto de hidrogênio, H_2S) e vapor d'água (H_2O), além de outros contaminantes que possam afetar sua qualidade e eficiência como fonte de energia. Esse processo resulta na separação do metano (CH_4), principal componente do biogás, permitindo sua utilização em aplicações industriais ou como combustível em motores de combustão interna.

3.9 Cromatografia da composição do biogás e verificação do teor de metano

Amostras de biogás bruto foram coletadas de cada biorreator das 12 unidades de triplicatas de cada tratamento. Os volumes amostrais foram obtidos por meio de uma sonda (comprimento de 20 cm, espessura $\geq 0,45$ mm e diâmetro externo $\geq 4,0$ mm) acoplada à válvula de retenção de cada biodigestor, através da qual o biogás foi succionado por meio de uma seringa de 20 ml. As amostras foram transferidas para bolsas pneumáticas individuais.

As análises dos gases CO_2 , CH_4 , O_2 e N_2 foram realizadas por cromatografia gasosa utilizando diferentes métodos. Para o CO_2 e CH_4 , utilizou-se um cromatógrafo gasoso da marca Hewlett Packard modelo 5880 equipado com um detector de

condutividade térmica (TCD) e uma coluna empacotada Porapak Q de 100/120 mesh e 12 pés de comprimento. A temperatura do forno foi de 80°C e do detector foi de 160°C, com o gás de arraste H₂ na pressão de 80 psi.

Já para a análise do O₂, utilizou-se o mesmo cromatógrafo gasoso da marca Hewlett Packard modelo 5880, com detector TCD e coluna empacotada Porapak Q de 100/120 mesh e 12 pés de comprimento, adicionando uma coluna empacotada PM 5A de 100/120 mesh e 6 pés de comprimento. A temperatura do forno e do detector foram de 80°C e 160°C, respectivamente, com o gás de arraste H₂ na pressão de 80 psi.

Para a análise do N₂, utilizou-se o mesmo cromatógrafo gasoso da marca Hewlett Packard modelo 5880, com detector TCD e coluna empacotada Porapak Q de 100/120 mesh e 12 pés de comprimento. A temperatura do forno foi de 80°C e do detector foi de 160°C, com o gás de arraste H₂ na pressão de 80 psi. O somatório de N₂ e O₂ foi determinado pela subtração do teor de O₂ e os resultados foram normalizados. Não foram analisados H₂ e CO.

Por fim, foi realizado um teste de queima para verificar a presença de metano no biogás gerado nos biodigestores. Esse teste consistiu em acoplar uma mangueira de borracha a um bico de Bunsen similar, conectando-o a uma bolsa pneumática previamente abastecida com gás metano (CH₄), transferido de uma câmara gasômetro do biodigestor. Ao acender a chama, foi confirmada a presença de metano em quantidade suficiente para mantê-la acesa. Esse resultado indica que o biogás continha, no mínimo, 50% de metano, conforme a metodologia utilizada por Xavier e Lucas Júnior (2010) e Sagula et al. (2017).

4. Resultados e discussão

4.1 Composição do lodo de cultivo de camarão em BFT

Os dados das características físico-químicas dos resíduos gerados no cultivo de camarões (*Litopenaeus vannamei*) em um sistema BFT, apresentados na Tabela 6, foram obtidos de fontes literárias de referência. Esses dados foram utilizados como matéria de estudo nesta pesquisa. É importante ressaltar que há uma escassez de estudos sobre a biodigestão desses resíduos específicos provenientes do cultivo de camarões marinhos nos diferentes sistemas.

Tabela 6. Características do lodo gerado pelo cultivo de camarões (*L. vannamei*) em sistemas de BFT.

		Faixa	Média
Parâmetro físico-químicos	Sulfato (mg l ⁻¹)	-	-
	Dbó (mg l ⁻¹)	-	-
	SST (mg l ⁻¹)	3.930 – 5.130	4.476,7
	SSV (% sst)	34,77 – 66,26	49,71
	Sólidos Totais (g l ⁻¹)	8,55 – 6,55	7,46
	Sólidos Voláteis (g kg ⁻¹)	2,53 – 5,67	3,78
	C:N	6,24 - 7,68	6,96
	pH	6,33 - 6,34	6,34

Fonte: Adaptado de Arantes (2014).

Na Tabela 7, encontram-se os dados das características físico-químicas do lodo gerado pelo cultivo de camarões (*Litopenaeus vannamei*) em sistemas de BFT. Essas características referem-se ao lodo coletado por esta pesquisa. Esses dados fornecem uma visão sobre a viabilidade e a eficácia da utilização dos resíduos provenientes do cultivo de camarões como um potencial fonte de matéria-prima para a produção de biogás, levando em conta as propriedades físico-químicas distintivas desses resíduos.

Tabela 7. Características físico-químicas do lodo gerado pelo cultivo de camarões (*Litopenaeus vannamei*) em sistemas de BFT. Os parâmetros analisados incluíram: sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (SV), potencial de hidrogênio (pH), nitrogênio total (N total), fósforo total (P total) e potássio (K). Essas características referem-se ao lodo coletado por esta pesquisa.

Parâmetro	Und	Valores
ST	mg/L	7,46
SV	mg/L	3,78
Cond. elétrica a 25 °C	µS/cm	4456,3
P total	mgP/kg	138
N total	mg/kg	5,300
pH	-	6,34
K	mg/kg	
DQO Total	-	16,50
DBO5	-	-

Fonte: Autor (2022)

Nos tratamentos delineados neste estudo (como demonstrado na Tabela 8), os valores de sólidos totais e sólidos voláteis totais obtidos, estão abaixo dos resultados apresentados por Sbizzaro (2013) e Junqueira (2011). Vale a pena salientar que os substratos oriundos da carcinicultura foram submetidos a diversas condições experimentais durante o processo de fermentação anaeróbia.

Tabela 8. Características físico-químicas do efluente do cultivo de camarão em triplicas, sob diferentes tratamentos. pH = potencial de hidrogênio; N total= nitrogênio total; P total = fósforo total; K = potássio.

Ensaio	Und	Resultados				T5 INOC
		Triplicata I	Triplicata II	Triplicata III	Triplicata IV	
Sólidos Totais	mg/L	7461,11	7672,22	7861,11	7022,22	444,54
Sólidos Voláteis	mg/L	3783,3	3561,11	6172,22	6827,78	177,50
Sólidos Fixos	%	92,08	90,24	84,47	79,86	82,25
SST	mg L-1	29527,78	30466,67	29188,89	29722,22	31933,33
SSV	% SST	267,203	356,099	617,192	904,968	729,483
Cond. elétrica a 25 °C	□S/cm	4456	61467	2641	167333	
pH	-	6,34	6,34	6,33	6,34	
P total	mg/kg	5,2	4,6	5,2	5,2	
N total	mg/kg	0,2	0,3	1,6	1,2	4,53
K	mg/kg					

Fonte: Autor (2023) com base nos resultados das análises realizadas pelo Laboratório da EMA/FURG. * Nota do Autor: Resultados com base em mg/kg de Matéria Seca (MS).

Estas condições englobaram amostras *in natura*, dessalinizadas, *in natura* inoculadas e dessalinizadas inoculadas, incorporando ainda o aditivo microbiológico LGA (Lodo Granular Anaeróbio). A diversidade dessas condições experimentais, aliada a outros fatores, notadamente os aspectos físico-químicos, pode contribuir para explicar a variabilidade observada nos resultados.

Contudo, é notável que os valores obtidos nesta pesquisa estão em consonância com os valores médios encontrados na literatura. Além disso, a composição da dieta alimentar dos substratos pode se revelar um elemento influente nas discrepâncias observadas nos teores de nitrogênio (N) e fósforo (P), que, em comparação com outros estudos, se apresentaram em níveis inferiores.

4.2 Contexto de reação

4.2.1 Remoção e redução de parâmetros

A eficiência da biodigestão está intimamente relacionada às taxas de remoção de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Essas taxas dependem das interações entre os microrganismos e os compostos orgânicos durante o processo de degradação, o qual resulta na produção de biogás.

Após 60 dias de biodigestão, os tratamentos realizados nos experimentos apresentaram desempenho satisfatório, com eficiências de remoção de ST variando de

24,76% a 58,59%, e uma média de remoção de 38,46% em relação aos dados iniciais de cada tratamento. Os dados referentes aos ST e SVT em relação à eficiência de remoção estão detalhados na Tabela 9.

Durante as análises de dados, observaram-se diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, evidenciadas pelo baixo valor do coeficiente de variação (CV) de $> 0,05\%$, indicando baixa variabilidade em relação à média. Isso sugere que os dados são relativamente homogêneos e consistentes. Quanto às remoções de SVT, os valores variaram de 11,60% a 46,95%, com uma redução média de 28,46%. O coeficiente de variação (CV) também foi de $> 0,05\%$, indicando diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

Tabela 9. Eficiência de remoção de ST, SVT nos quatro tratamentos.

Tratamentos	Ef. R. ST (%)	Tratamentos	Ef. R. STV (%)
T3	58,59 a	T4	46,95 a
T4	38,53 b	T3	39,51 b
T1	31,94 c	T2	15,76 c
T2	24,76 d	T1	11,60 d

A eficiência de remoção de sólidos totais (Ef. R. ST) e a eficiência de remoção de sólidos voláteis (Ef. R. SVT) foram avaliadas neste estudo. Os valores médios apresentados nas colunas diferem entre si, conforme verificado pelo teste de Tuckey a um nível de significância de 5% (ANOVA, teste de Tuckey $p < 0,05$). As análises foram realizadas no Lab-EMA.

Após o período de 60 dias de processamento anaeróbio, constatou-se uma diminuição substancial nos níveis de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SVT) em todos os tratamentos, evidenciando a eficácia dos processos de conversão da matéria orgânica em biogás. Essa redução nos teores de ST e SVT é um indicativo de que a matéria orgânica carbonácea foi devidamente decomposta e convertida em subprodutos gasosos, contribuindo para a obtenção de um produto final de qualidade (Tabela 10).

Em geral, o tratamento T4 (100% LIN) apresentou a maior média de redução de SVT, com uma redução de 3.205,56 mg/l, seguido do T3 (100% LD). Enquanto isso, os tratamentos T2 e T1 apresentaram as menores taxas.

Na perspectiva dos objetivos experimentais desta pesquisa, os tratamentos T1 (100% LIN) e T2 (100% LD), cuja análise verificou a influência da salinidade na DA, apresentaram médias significativas de redução dos valores de SVT em mg/l. O tratamento

T2 obteve o maior resultado, com uma redução de 561,11 mg/l, enquanto o T1 apresentou uma redução de 438,89 mg/l de SVT. Esses resultados indicam diferenças significativas entre os tratamentos e repetições na influência da salinidade na variável analisada, conforme demonstrado pelos valores de Fc e p-valor. O teste de Tukey confirmou que as médias das repetições são estatisticamente diferentes umas das outras.

Tabela 10. Concentrações médias de ST e SVT afluente e reduções e porcentagem de reduções de ST e SVT nos 4 tratamentos após 60 dias.

Tratamen tos	STa (mg/l)	R. ST (mg/l)	R. ST (%)	SVTa (mg/l)	R. SVT (mg/l)	R. SVT (%)
CV (%)	11,60	21,20	32,24	27,89	24,48	24,48
T1	7.461,11	2.383,33 c	31,9 4 c	3.783,33c	438,89 d	11,60 d
T2	7.672,22	1.900,00 d	24,76 d	3.561,11d	561,11 c	15,76 c
T3	7.861,11	4.605,56 a	58,59 a	6.172,22b	2.438,89 b	39,51 b
T4	7.022,22	2.705,56 b	38,53 b	6.827,78a	3.205,56 a	46,95 a

As variáveis abreviadas utilizadas neste estudo são: STa (sólidos totais afluentes), R. SVT (redução de sólidos voláteis totais), SVTa (sólidos voláteis totais afluentes) e R. SV (redução de sólidos voláteis). Além disso, o CV representa o coeficiente de variação. Os valores médios com letras diferentes na mesma coluna apresentam diferenças significativas entre si, conforme o teste de Tukey realizado com um nível de probabilidade de erro de 5% (ANOVA, teste de Tukey, $p < 0,05$). Fonte: Autor (2023) com base nos resultados das análises realizadas no Laboratório EMA/FURG.

No segundo experimento, que analisou os efeitos na digestão do lodo de cultivo de camarão com a adição de inóculo microbiológico no desempenho da digestão anaeróbica, os tratamentos T3 (33,33% LIN + 66,67% Inóc) e T4 (33,33% LD + 66,67% Inóc) resultaram em reduções significativas nas taxas de ST e SVT. No T3, a redução foi de 3.205,56 mg/l de SVT, ou seja, 46,95% de SVT, indicando diferenças significativas entre os tratamentos e repetições na influência do inóculo na biodigestão, conforme demonstrado pelos valores de Fc e p-valor. O teste de Tukey confirmou que as médias das repetições são estatisticamente diferentes umas das outras. Esse cenário sugere que a adição microbiológica (LGA) no processo de biodigestão anaeróbia pode ter influência na elevação dessas reduções.

Embora os tratamentos T3 e T4 tenham mostrado reduções significativas nas taxas de ST e SVT, é importante ressaltar que a comparação baseada apenas no ST pode ser enganosa. Isso ocorre porque os tratamentos diferem na composição do material orgânico, com o T3 e T4 incluindo inóculo LGA, que é pobre em carbono devido à digestão prévia. Portanto, ao interpretar os resultados, é crucial considerar não apenas a

carga orgânica estimada por ST, mas também a diferença na quantidade de carbono entre os tratamentos.

Outros estudos foram conduzidos com foco na geração de biogás a partir de diferentes substratos. Um estudo realizado por Kuczman et al. (2018) utilizou resíduos alimentares de um restaurante e obteve uma redução de 90% nos sólidos voláteis e 82% na demanda química de oxigênio (DQO). A produção de metano foi de 0,51 litros por grama de DQO consumida e 0,44 litros por grama de sólidos voláteis consumidos. A produção volumétrica de metano foi de 0,32 litros por litro de reator por dia, representando 59% do biogás produzido.

Soethe (2014) conduziu um estudo sobre a geração de biogás a partir de rejeitos piscícolas e analisou as propriedades físico-químicas das vísceras *in natura*. O estudo verificou que a concentração de vísceras de 79,75% proporcionou a melhor eficiência na redução de sólidos totais (ST) da biomassa, com uma redução de 25,59%. Além disso, uma concentração de 57,68% de vísceras apresentou a melhor eficiência na redução de sólidos voláteis (SV), com uma redução de 28,75%.

Rabelo (2018) investigou a codigestão de dejetos de esterco com substratos de palha de milho e palha de feijão para a produção de biogás. Os resultados mostraram uma redução significativa nos sólidos totais (ST) ao longo do processo, com teores de ST nos efluentes variando entre 7% e 9%. Tanto os sólidos totais (ST) quanto os sólidos voláteis (SV) apresentaram uma redução superior a 30%, com médias consistentes em torno de 17,3% a 17,2%. Esses resultados indicam uma eficiente remoção de sólidos no sistema estudado. O presente estudo obteve resultados semelhantes, com variações médias dos parâmetros de ST e SV maiores em comparação com o estudo de Rabelo (2018), indicando uma maior consistência e estabilidade nos processos de redução de ST e SV observados neste trabalho, resultando em uma maior produção de biogás e redução de sólidos voláteis.

4.2.2 Condutividade elétrica, pH e nutrientes

A Tabela 20 exibe os pHs correspondentes aos tratamentos adotados na fase de digestão anaeróbia. O pH, enquanto indicador da acidez ou alcalinidade de uma solução, apresenta papel crucial nesse contexto, demandando que se mantenha em uma faixa apropriada para a otimização das reações químicas subjacentes.

De acordo com as constatações de Chernicharo (2016), o intervalo de pH ótimo para a atividade das *Arqueias metanogênicas*, microrganismos responsáveis pela geração de metano no processo de digestão anaeróbia, oscila entre 6,0 e 8,0. Conforme observado na Tabela 10, os valores de pH iniciais (entrada dos reatores) alinharam-se a esse intervalo favorável, denotando condições propícias à atividade metanogênica no estágio inicial da digestão anaeróbia.

Ao longo da biodigestão, o pH nos substratos dos tratamentos manifestou discreto declínio, sinalizando acidificação nos reatores, um acúmulo de ácidos voláteis na matriz reacional. Ocorrências de acidificação, indesejáveis por natureza, contrapõem-se ao ideal de manutenção de níveis elevados de ácidos voláteis, os quais coíbem a atividade dos microrganismos associados à digestão anaeróbia. A possível causa do pH decrescente e da consequente acidificação nos reatores reside em uma possível sobreprodução de ácidos voláteis decorrente de falhas no sistema de tamponamento.

Pesquisas conduzidas por Matos et al. (2017), usando biodigestores de bancada alimentados com resíduos bovinos convencionais, notaram elevações nos pHs ao término da digestão anaeróbia. Esse fenômeno foi atribuído à conversão dos ácidos no afluente em produtos gasosos. Da mesma maneira, Geiza (2020) investigou a geração de metano no biogás, testemunhando um comportamento semelhante com incremento do pH no efluente em relação ao afluente. Essa pesquisa também realçou a influência nutricional no estágio final da digestão anaeróbia. Observou-se uma marcante diminuição nos valores de Condutividade Elétrica (CE) em todos os tratamentos (Tabela 11). Com variações nas reduções, particularmente ao se relacionar com experimentos específicos (impactos da salinidade na composição do biogás e análise da inclusão de inóculo microbiano na digestão anaeróbia), o T1 (LIN) evidenciou redução de 49,48%, enquanto o T2 (LD) atingiu 49,40%.

Reduções mais pronunciadas ocorreram nos tratamentos associados à investigação sobre o desempenho da digestão de substratos com inóculo adicional, com o T3 (LIN + Inóc) exibindo redução de 57,58% e o T4 (LD + Inóc) de 76,04%. Essa diminuição de CE pode ser influenciada pela presença de íons dissolvidos, tais como sais minerais. A digestão anaeróbia frequentemente resulta na formação de ácidos orgânicos como ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico, os quais são ácidos fracos e podem reduzir o pH do sistema.

Tabela 11. Condutividade elétrica, pH, concentração de NO₂-N e NO₃-N, PO₄ afluente e efluente nos 4 tratamentos.

Tratamentos	CEa (\square S/cm)	CEe (\square S/cm)	pHa	pHe	NO ₂ -N a (mg/L)	NO ₂ -N e (mg/L)	NO ₃ -N a (mg/L)	NO ₃ -N e (mg/L)	PO ₄ a (mg/l)	PO ₄ e (mg/l)
CV (%)		40,66		1,53		69,55		29,38		0,00
T1 In Nat LIN	4456,33a	2250,08 a	6,34	5,60 d	1,15b	0,5b	2,42c	2,22b	0,59d	0,07d
T2 Dessal LD	614,67d	311,33 d	6,34	6,63 b	1,916a	0,96a	4,97a	3,52a	1,25a	0,9a
T3 In Nat/Inóc LINI	2641,00b	1119,37 b	6,34	5,62 c	0,766c	0,46c	2,55b	1,9c	0,66c	0,16b
T4 Dessal/Inóc LDI	1673,33c	701,37 c	6,34	5,68 a	0,384d	0,04d	0,13d	0,11d	0,87b	0,09c

CEa: CE afluente; CEe: CE efluente; pHa: pH afluente; pHe: pH efluente; NO₂-Na: NO₂-N afluente; NO₂-Ne: NO₂-N efluente; NO₃a: NO₃ 1716 afluente; NO₃e: NO₃ efluente. POa: PO afluente; POe: PO efluente; CV: Coeficiente de variação. Valores médios seguidos de letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tuckey a um nível de probabilidade de erro de 5% (ANOVA; teste de Tuckey p<0,05).

Fonte: Autor (2023) com base nos resultados das análises realizadas no Laboratório EMA/FURG.

Nesse sentido, é viável que as reduções observadas na CE dos tratamentos se vinculem à geração de ácidos voláteis, levando à acidificação e subsequente redução do pH. A medição do pH do efluente foi realizada no 60º dia de retenção hidráulica, utilizando um Medidor Multiparâmetro (Hanna/Mod HI98194), com a sonda inserida diretamente no biorreator. Esse procedimento técnico é confiável e relevante, sendo a escolha desse momento durante o ciclo de retenção hidráulica representativa da fase de estabilidade do processo de biodigestão anaeróbica.

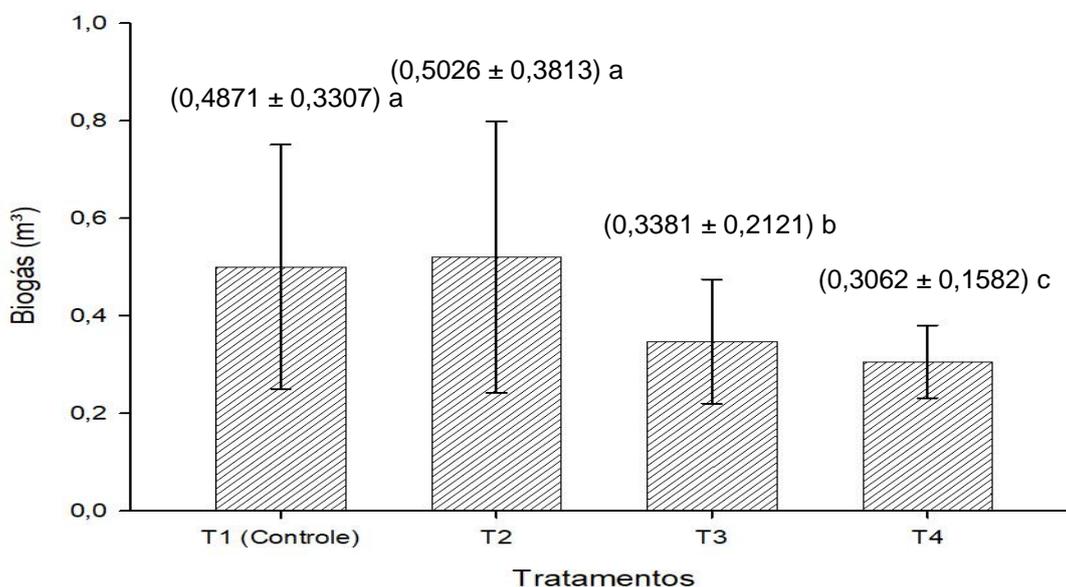
Esses resultados se harmonizam com as conclusões do estudo de Matos (2016), que analisou as flutuações da CE em dejetos bovinos submetidos a distintos sistemas de manejo, também testemunhando diminuição do pH. Tais resultados fortalecem a tendência de decréscimo na concentração de íons na solução, possivelmente originada pelos processos fermentativos e degradação biológica intrínsecos à digestão anaeróbia. Relativamente aos nutrientes, verifica-se redução considerável nos teores de nitrogênio (N) e fósforo (P) nos efluentes em relação aos afluxos. Essas diminuições resultam do processo energético conduzido pelo consórcio microbiano, alinhando-se às observações de Chernicharo (2016).

4.2.3 Produção diária e acumulada de Biogás

As médias das produções acumuladas de biogás, expressas em metros cúbicos por quilograma (m^3/kg), estão apresentadas no Gráfico 1. Neste gráfico, é demonstrado o desempenho da biodigestão em cada tratamento realizado neste estudo. Foi constatado que a produção de biogás foi significativamente influenciada pelas diferentes condições de tratamento aplicadas nos experimentos, indicando que os tratamentos exercem efeitos significativos na resposta medida pela produção de biogás.

A comparação dos tratamentos T1 (LIN) e T2 (LD), que avaliaram a influência do sódio no processo de biodigestão, demonstrou que as médias de produção foram estatisticamente iguais, não havendo diferença significativa entre esses tratamentos. Da mesma forma, os tratamentos T3 (LIN+Inóc) e T4 (LD+Inóc), que avaliaram a introdução do inóculo microbiológico na digestão anaeróbia, também não apresentaram diferenças significativas entre suas médias de produção.

Gráfico 1. Produção média acumulada de biogás (m³) e desvio padrão da produção média acumulada de biogás nos quatro tratamentos. Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas pelo teste de Tuckey (p<0,05).



Fonte: Autor (2022)

Ao compararmos as médias dos quatro tratamentos de forma múltipla, fica evidente que há diferenças significativas entre alguns deles. Os tratamentos T1 e T3, T1 e T4, T2 e T3, T2 e T4 apresentaram médias estatisticamente diferentes. Atribuindo letras às médias conforme o resultado do teste de Tukey, temos:

- Tratamento 1 (Média = 0,48708) e Tratamento 2 (Média = 0,50133): Letra = a
- Tratamento 3 (Média = 0,33810): Letra = b
- Tratamento 4 (Média = 0,30624): Letra = c

Portanto, os tratamentos T1 e T2 não diferem estatisticamente entre si (letra a), enquanto os tratamentos T1, T3 e T4, e T2 e T3, T2 e T4 diferem estatisticamente entre si (letras b e c). Os resultados obtidos também indicam que as concentrações de sais, especificamente o cloreto de sódio (NaCl), têm um impacto negativo no desempenho microbiológico da biodigestão anaeróbia. O NaCl atua como um inibidor do consumo da matéria orgânica nos biodigestores que utilizam lodo *in natura* do cultivo de camarões marinhos, o que leva a uma redução na produção de biogás. Um estudo anterior conduzido por Zupan et al. (2023) constatou que concentrações de 5, 10 e 14 g/L de Na⁺ causaram inibições de 10%, 50% e 100%, respectivamente, na atividade metanogênica específica máxima do lodo granulado contendo *Methanotrix* sp. como metanogênio acetoclástico predominante.

A adição do inóculo microbiológico (LGA) nos ensaios dos tratamentos T3 e T4 mostrou diferenças significativas na produção de biogás em comparação com o tratamento controle T1. Esses resultados mostram que a adição do recurso inóculo (LGA) nos ensaios dos tratamentos T3 e T4 não teve um efeito significativo na produção de biogás em comparação com o tratamento controle T1. Outro aspecto relevante é o impacto da salinidade, principalmente do íon sódio, na produção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) nos tratamentos do Experimento I. Concentrações elevadas de sal podem estar associadas a altas concentrações de ácidos graxos voláteis ou a altas concentrações de sais, no caso sais de sódio, que favorecem o crescimento de bactérias sulfato-redutoras, que utilizam compostos de enxofre presentes no lodo como fonte de energia e produzem H_2S como subproduto. Isso pode explicar a maior presença de H_2S nos tratamentos com maior teor de sal, como os tratamentos T1 (LIN) e T4 (LD+Inóc).

Em resumo, a salinidade influencia a produção de H_2S , o que pode ter efeitos na produção de metano, conforme observado nas diferenças volumétricas de produção de biogás entre os tratamentos T1 (LIN) e T2 (LD) (Gráfico 1).

No Experimento II, a adição do inóculo microbiológico não apresentou diferenças significativas na degradação da matéria orgânica nem na produção de biogás em relação ao tratamento T1 (LIN), uma vez que os tratamentos T3 (LIN+Inóc) e T4 (LD+Inóc) não diferem estatisticamente do tratamento controle.

Os tratamentos T1 (100% LIN) e T2 (100% LD), que contêm uma proporção maior de lodo de cultivo de camarão (sem a adição de Inóculo), demonstraram produções de biogás estatisticamente distintas em comparação aos tratamentos T3 e T4. Essa disparidade nos resultados pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo a qualidade e eficiência do inóculo utilizado, especialmente devido à menor concentração de carbono no inóculo (LGA) à base de arroz, o que resulta em uma eficiência reduzida na produção de biogás observada nesses tratamentos. Se o inóculo não proporcionar condições adequadas ou não possuir uma população microbiológica suficiente, isso pode afetar negativamente o processo de digestão anaeróbia. Outro aspecto a ser considerado é a possibilidade de que a interação entre a biomassa *in natura* e o inóculo microbiológico (LGA) não tenha sido adequada, resultando em falta de adaptação ou sinergia entre os microrganismos e os substratos. É importante salientar que essas são apenas algumas possíveis explicações, e que outros fatores também podem ter influenciado na baixa

produção de biogás nos biorreatores com inóculo microbiológico, como o controle das condições operacionais, a presença de inibidores no substrato ou problemas técnicos nos biorreatores.

No estudo realizado por Von Sperlin (2014), que analisou dejetos de ovinos, foi observado que a diferença na granulometria das partículas resulta em uma maior resistência ao esmagamento, dificultando o contato dos micro-organismos com o substrato. Isso interfere negativamente na conversão da matéria carbonácea em biogás e, conseqüentemente, na produção de biogás.

O estudo realizado por Matos et al. (2016) investigou por 210 dias a produção de biogás a partir dos dejetos de bovinos de leite em dois sistemas distintos: o sistema convencional e o sistema orgânico. Os resultados mostraram que, no sistema orgânico, a produção acumulada de biogás a partir da biodigestão dos dejetos de bovinos foi de 0,00618 m³, o que equivale a 6,18 litros. Por outro lado, no sistema convencional de produção, a produção acumulada foi de 0,01115 m³, o que corresponde a 11,15 litros de biogás. Os pesquisadores atribuíram os resultados encontrados às diferenças no manejo dos animais, principalmente em relação à dieta adotada em cada sistema de produção. Eles observaram que a degradação dos dejetos provenientes de uma dieta com maior proporção de concentrado foi mais significativa, o que impactou diretamente na produção de biogás e metano. É importante ressaltar que, embora a dieta alimentar e o sistema de produção sejam similares, principalmente no sistema de produção orgânico, os valores de produção acumulada obtidos no presente estudo foram superiores em comparação com estudos anteriores.

Friedrich (2018) investigou a produção de biogás a partir do lodo gerado no cultivo de camarões marinhos utilizando a tecnologia BFT (biofloc) ao longo de 93 dias. Foi observada uma redução satisfatória de 62% nos sólidos voláteis (SV) e uma conversão total de sólidos voláteis em metano com valores específicos para cada condição experimental: 0,078 mL/g, 0,373 mL/g, 0,234 mL/g e 0,990 mL/g. Os resultados mostraram que a produção acumulada de biogás alcançou 0,1496 mL de metano/g de SV para as amostras de 25 mL com nutrientes e 0,0625 mL de metano/g de SV para as amostras de 25 mL sem nutrientes.

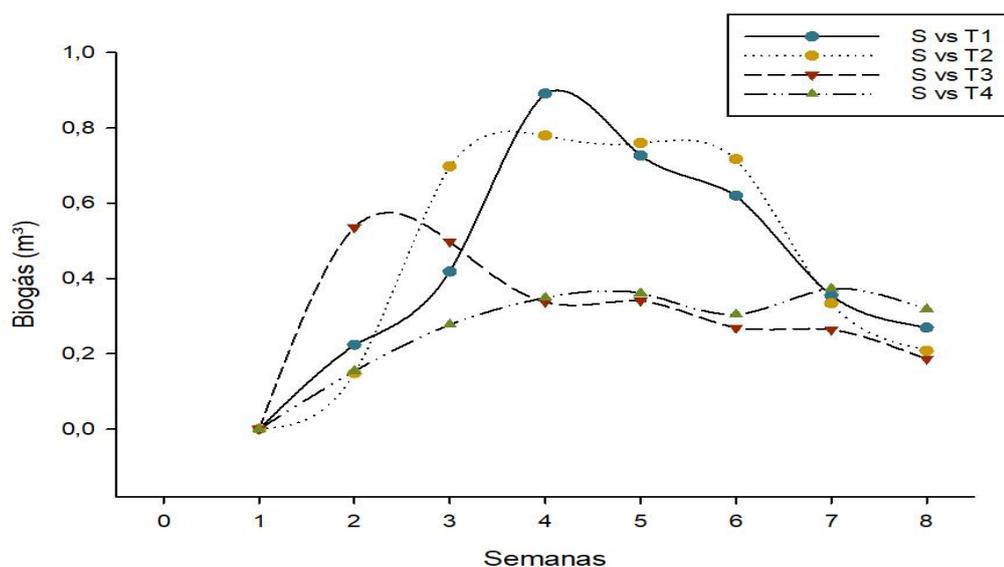
Shueroff (2019) avaliou o potencial de produção de biogás através da utilização do efluente de um sistema de Bioflócos na produção de camarões (*Litopenaeus vannamei*),

tanto *in natura* quanto com a remoção de parte do cloreto de sódio (NaCl) e sulfato (SO_4^{2-}). Seus resultados mostraram concentrações médias de metano no efluente processado e *in natura* de aproximadamente 69,33% e 64,67%, respectivamente. O estudo concluiu que a presença do inibidor (íon sódio) nos biorreatores afetou negativamente a produção de biogás, sendo que a remoção parcial dos sais do efluente resultou em aumento na concentração de metano. Isso evidencia a importância da salinidade na produção de biogás a partir do cultivo de camarões em sistema BFT.

4.2.4 Produção de biogás no sistema contínuo de degradação anaeróbia

A pesquisa adotou o modelo de biodigestão “batelada”, em que a biomassa foi confinada nos biorreatores para um processo contínuo de digestão, sem adição de mais materiais orgânicos até a conclusão do ciclo anaeróbio. O tempo de retenção hidráulica dos substratos nos experimentos foi de 60 dias, conforme registrado no desempenho de produção de biogás por metro cúbico apresentado no Gráfico 2. Nele, a evolução do desempenho da biodigestão de cada tratamento foi registrada na produção média semanal acumulada de biogás (m^3) ao longo de oito semanas. Os primeiros 8 dias foram considerados um período de estabilização da biodigestão nos biorreatores, com os processos microbiológicos evoluindo a partir da etapa de hidrólise.

Gráfico 2. Evolução da produção média semanal acumulada de biogás (m^3) ao longo de oito semanas.



Fonte: Autor (2023)

Durante essa fase inicial, ocorreram problemas nos mecanismos de retenção e registro do volume de biogás em alguns biorreatores, o que demandou ajustes e reparos urgentes. Foram realizadas a reparação de mangueiras danificadas e a substituição de vedações defeituosas para garantir o bom funcionamento do processo.

A partir do nono dia de biodigestão, os tratamentos T1 (LIN), T3 (LIN+Inóc) e T4 (LD+Inóc) apresentaram produção simultânea de biogás, exceto nos ensaios E1 (T1) e E3 (T4), em que a produção foi retardada em mais um dia, com registro de produção em 11 dias de experimentos.

O tratamento T2 (LD) apresentou produção somente a partir do décimo dia, seguindo a tendência dos demais tratamentos.

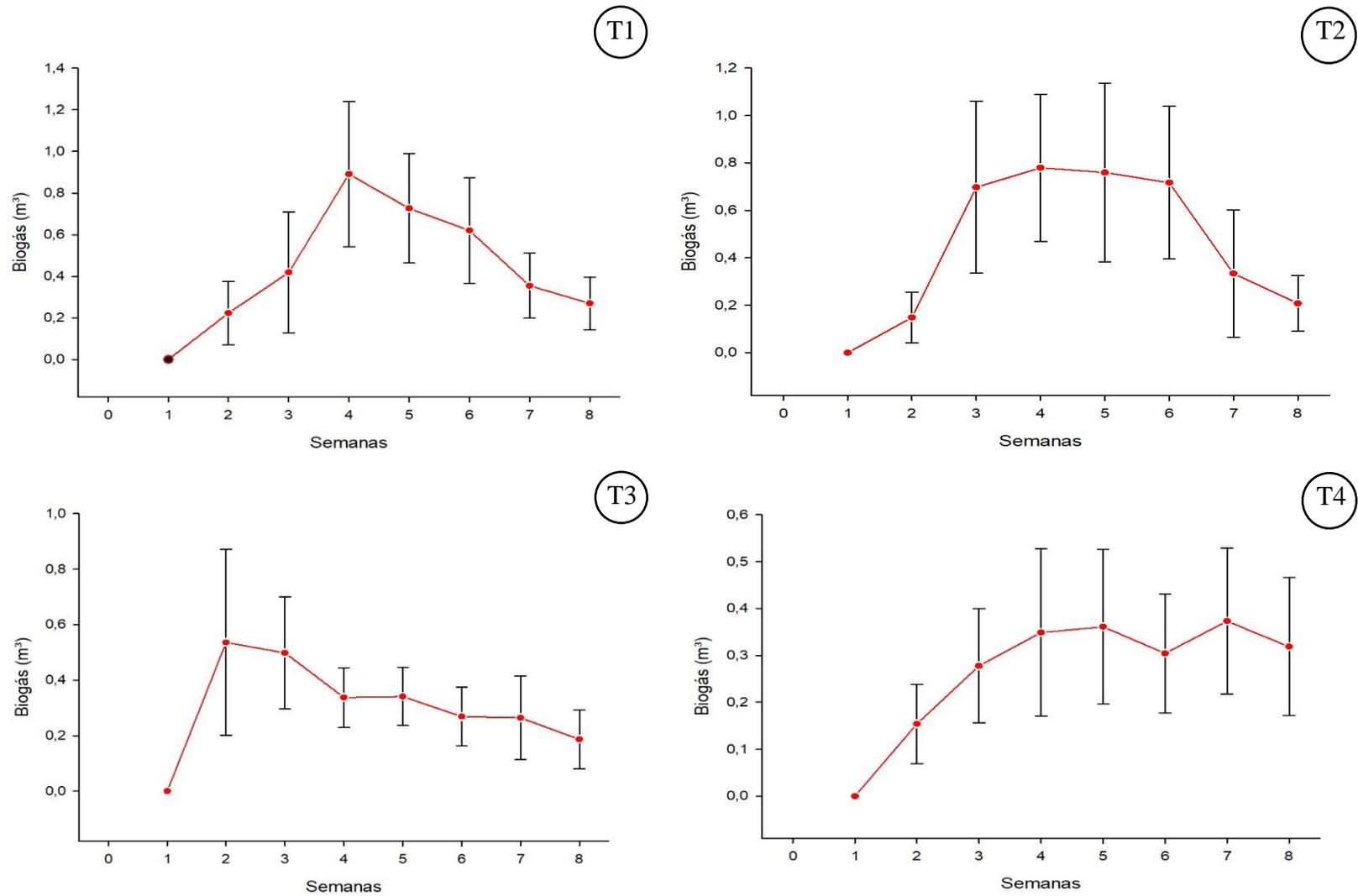
Após o período inicial de alta produção nos biorreatores, foram observadas oscilações frequentes entre picos primários e secundários de produção ao longo dos 60 dias (8 semanas e 6 dias), conforme demonstrado no Gráfico 3.

Após 25 dias de média móvel diária de alta produção de biogás ($T1 - 0,6709 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T2 - 0,7911 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T3 - 0,3564 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T4 - 0,3645 \text{ m}^3/\text{kg}$), os valores dos picos começaram a diminuir, mantendo valores médios ($T1 - 0,2348 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T2 - 0,2850 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T3 - 0,183 \text{ m}^3$, $T4 - 0,2768 \text{ m}^3/\text{kg}$) no final da oitava semana de experimento.

No contexto do tratamento T1, observou-se que o ensaio E1 registrou a produção de biogás a partir do 10º dia de processamento. Por outro lado, os ensaios E2 e E3, também pertencentes ao tratamento T1, apresentaram produção acumulada desde o início da primeira semana de processamento. Após atingir o pico inicial de produção, o tratamento T1 exibiu oscilações frequentes, tendendo a volumes médios até o quarto dia da oitava semana.

No tratamento T2, as oscilações na produção de biogás persistiram até o final da sexta semana de biodigestão. Em contraste, o tratamento T3 apresentou uma produção de biogás mais baixa e com oscilações em níveis inferiores aos demais tratamentos, mantendo esse padrão até o final da oitava semana.

Gráfico 3. Produção média semanal de biogás e desvio padrão da produção média semanal, nos tratamentos: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4.



Fonte: Autor (2023)

4.2.5 Potencial de produção de biogás

As médias de produção de biogás obtidas neste estudo foram analisadas e estão apresentadas na Tabela 12. Nela, é possível observar o desempenho de produção em relação aos substratos adicionados, expressas em litros por metro cúbico (l/m^3) para ST e SVT, bem como em metros cúbicos por quilograma (m^3/kg) para ST e SVT. Além disso, também foram calculadas as médias de produção em relação aos ST e SVT reduzidos, expressas em metros cúbicos por quilograma (m^3/kg). Esses dados são de extrema importância para a compreensão do comportamento da produção de biogás frente às diversas condições dos substratos utilizados no processo de biodigestão.

Tabela 12. Produção média total de biogás, produção de biogás em relação aos substratos adicionados e em relação aos ST e SVT adicionados e reduzidos nos 4 tratamentos.

Tto.	Produção média total (m^3)	Substrato adicionado (m^3/l)	ST adicionado (m^3/kg)	STV adicionado (m^3/kg)	ST reduzido (m^3/kg)	STV reduzido (m^3/kg)
CV (%)	20,28	0,00	8,69	48,41	30,51	59,41
T1	0,48708 a	0,0126 a	0,0080 b	0,0082 a	0,0029 a	0,0049 a
T2	0,50133 a	0,0126 a	0,0077 c	0,0036 d	0,0019 b	0,0006 d
T3	0,33810 b	0,0126 a	0,0095 a	0,0062 c	0,0063 a	0,0024 c
T4	0,30624 b	0,0126 a	0,0070 d	0,0068 b	0,0027 c	0,0032 b

CV: Coeficiente de Variação. Valores médios seguidos de letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa entre si pelo teste de Tukey a um nível de probabilidade de erro de 5% (ANOVA; teste de Tukey $p < 0,05$). Fonte: Autor (2023), com base nos resultados das análises realizadas pelo Laboratório EMA-FURG.

Fonte: Autor (2023)

Como resultado da biodigestão, foram identificadas diferenças significativas entre todos os pares de tratamentos. Notavelmente, o tratamento T2 apresentou o maior potencial de produção de biogás por litro de substrato adicionado, com um valor de 1,851 m^3/l . O tratamento T1 obteve o segundo maior potencial de forma significativa, com uma taxa de produção de 1,686 m^3/l de substrato adicionado. Já os tratamentos T3 e T4 registraram as menores taxas de produção de biogás por litro de substrato adicionado, com o tratamento T3 exibindo uma taxa de 1,252 m^3/l e o tratamento T4 apresentando uma taxa de 0,989 m^3/l . Esses resultados indicam que o tratamento T2 demonstrou a maior eficiência em termos de produção de Biogás por litro de substrato adicionado, ao passo que os tratamentos T3 e T4 apresentaram taxas de produção mais baixas. Além

disso, constatou-se que o controle da salinidade exerce impacto positivo na produção de biogás.

Na literatura, diversos estudos têm explorado o potencial de biomassas de organismos aquáticos para a biodigestão. Andrade (2009) conduziu pesquisas utilizando a biomassa da *Spirulina* LEB-18 em um reator anaeróbio de 14 litros, operando a 35 °C, que é a temperatura ideal para as bactérias metanogênicas. Os resultados obtidos mostraram uma taxa média de produção de biogás de 0,38 L/g⁻¹ por dia (0,38 d⁻¹). De maneira semelhante, Henrard et al. (2011) investigaram a bioconversão da *Spirulina* LEB-18 em metano em um biorreator anaeróbio operado em batelada sequencial, sob condições não controladas. Eles obtiveram uma média de produção de biogás de 0,21 ± 0,05 L/g⁻¹ por dia (0,21 ± 0,05 d⁻¹), correspondendo a 71,8% de biometano. A decomposição de 72,4% da biomassa resultou em uma conversão em biometano na ordem de 0,24 g/g⁻¹ em relação ao volume do meio. Esse reator operou na faixa de temperatura entre 25 e 38 °C.

Nesta pesquisa, os biorreatores de cada tratamento foram mantidos à temperatura de 34-36 °C, e os resultados da conversão metanogênica apresentaram médias consideráveis de volume de produção (0,84 L CH₄/kgSV⁻¹d⁻¹, 0,90 L CH₄/kgSV⁻¹d⁻¹, 0,59 L CH₄/kgSV⁻¹d⁻¹, 0,55 L CH₄/kgSV⁻¹d⁻¹) em todos os tratamentos.

Eiroa et al. (2012) realizaram estudos com restos de quatro tipos de peixes (atum, peixe-agulha, sardinha e cavalinha), obtendo valores de produção de CH₄ semelhantes para atum, peixe-agulha e sardinha, com 0,26 m³ CH₄/kgSV⁻¹ e 0,39 m³ CH₄/kgSV⁻¹ para cavalinha. Enquanto isso, Porfírio et al. (2022) examinaram o potencial de produção de biogás a partir de resíduos de Tilápia. No experimento, a adição de celulose microcristalina juntamente com o inóculo resultou em uma produção acumulada de biogás de 649 L/kgSV, superando os 80% ou 592 L/kgSV do valor padrão exigido pela norma VDI 4630, que varia entre 740 a 750 L/kgSV. Esses resultados evidenciaram um desempenho satisfatório na utilização dos resíduos de Tilápia para a produção de biogás.

Apesar das diferenças estatisticamente significativas mencionadas anteriormente, o desempenho dos biorreatores demonstrou consistência em comparação com outros estudos. Isso ressalta que o aumento da temperatura pode levar a um maior potencial metanogênico no biogás.

Conforme o previsto para essa pesquisa, foram avaliados diferentes tratamentos. Os tratamentos T1 e T2 envolveram o uso do lodo *in natura* e do lodo dessalinizado no processo de biodigestão, com volumes acumulados de metano obtidos de 126,64 L CH₄/kgSV⁻¹ e 130,67 L CH₄/kgSV⁻¹, respectivamente. Além disso, o experimento de inoculação de substrato nos tratamentos T3 e T4, nos quais a ativação do lodo de camarão com o inóculo LGA gerou volumes de CH₄ acumulado de 87,91 L CH₄/kgSV⁻¹ e 79,62 L CH₄/kgSV⁻¹, respectivamente. Esses resultados mostram similaridades com estudos anteriores, sugerindo importantes reflexões sobre as influências da salinidade na composição do biogás e análise da adição de inóculo (microrganismos) no processo de biodigestão anaeróbia na produção de biogás.

Embora pesquisas anteriores tenham obtido maiores produções de biogás quando a quantidade de lodo representava mais de 50% do inóculo, este estudo apresentou resultados promissores de maiores médias de produção sem a utilização de inóculo, nos tratamentos com lodo *in natura* e dessalinizado. Nas triplicatas com a adição de inóculo (razão 2:1) (lodo *in natura* + inóculo e lodo dessalinizado + inóculo), foram utilizadas proporções equivalentes a 66% de inóculo, resultando em menores produções em comparação com os demais tratamentos que tiveram proporções de 100% de lodo *in natura* ou dessalinizado.

A baixa produção de biogás nos biorreatores com partida microbiana do substrato, utilizando o lodo granular anaeróbio (LGA), como observado nos tratamentos T3 e T4, pode ser atribuída a diferentes fatores que impactam o desempenho da biodigestão anaeróbia. A inoculação de substrato envolve a adição de microrganismos (inóculo) ao lodo para facilitar o processo de degradação e produção de biogás. No entanto, diversos aspectos podem afetar negativamente essa estratégia. Uma das possíveis razões é a competição microbiana entre os microrganismos inoculados e as archeas metanogênicas presentes no lodo de camarão. O cenário competitivo entre microrganismos autóctones e os introduzidos acaba demandando energia de ambos os tipos de bactérias (Barcelos, 2009). Além disso, às características específicas do lodo de camarão pode ser um desafio para a metanogênese.

A presença de sais no substrato pode configurar um ambiente inibidor para a ação microbiológica nos diferentes estágios da biodegradação. Neste contexto, o sódio pode atuar como o principal agente inibidor para os microrganismos metanogênicos. Quando

os níveis de sódio são elevados, o potencial osmótico aumenta, tornando o ambiente mais hostil para os microrganismos. Isso pode levar à desidratação das células microbianas e interferir em seus processos metabólicos, prejudicando a atividade dos microrganismos metanogênicos e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência do sistema e a produção de biogás, incluindo o metano (Alhraishawi e Alani, 2018).

Outros fatores podem contribuir para o baixo desempenho do inóculo no meio anaeróbio. Um desses fatores é o desequilíbrio na relação C/N (carbono/nitrogênio) do substrato, onde proporções inadequadas de carbono e nitrogênio podem limitar a disponibilidade de carbono para as bactérias metanogênicas, prejudicando seu metabolismo e resultando em menor produção de biogás $\text{mLCH}_4(\text{CNTP})/\text{gSTV}^{-1}$. Todavia, é relevante destacar uma exceção encontrada no tratamento T4, onde o lodo de camarão dessalinizado apresentou um teor de umidade mais baixo, impactando negativamente na produção de metano (CH_4). Esses resultados apontam que a composição e umidade dos substratos podem ter um papel significativo na produção de biogás.

Os tratamentos T2, T1 e T3 alcançaram médias de produção diária de 0,90 L $\text{CH}_4/\text{kgSV}^{-1}\text{d}^{-1}$, 0,84 L $\text{CH}_4/\text{kgSV}^{-1}\text{d}^{-1}$ e 0,59 L $\text{CH}_4/\text{kgSV}^{-1}\text{d}^{-1}$, respectivamente. Essas diferenças nos resultados podem ser atribuídas a diversos fatores relacionados ao cultivo de camarões em Sistemas de Bioflócos (BFT). A alta concentração de matéria orgânica, como proteínas e lipídios, contribui para a produção de sólidos voláteis durante a biodigestão. Além disso, as condições operacionais, como temperatura e pH, também desempenham um papel crucial no potencial de produção de sólidos voláteis. É importante considerar esses aspectos para otimizar o desempenho dos biorreatores no processo de biodigestão.

A presença de sólidos voláteis (SV) no substrato merece destaque, pois está diretamente vinculada à quantidade de matéria orgânica, incluindo o carbono, que é um dos principais componentes envolvidos na produção de biogás. Quanto maior for a concentração de SV e, por conseguinte, de matéria orgânica no substrato, maior será a probabilidade de alcançar uma produção eficaz de biogás (Oliveira e Higarashi, 2006). Comparar a eficácia da produção de biogás deste estudo com os valores encontrados na literatura é desafiador devido às diversas condições experimentais empregadas. Vários fatores, como as características do resíduo, a utilização de inóculo, a temperatura e o

tempo de retenção hidráulica (TRH), entre outros, têm a capacidade de influenciar os resultados, especialmente o potencial metanogênico do biogás. Portanto, é fundamental considerar essas variáveis ao interpretar e contrastar as conclusões entre diferentes estudos.

Os potenciais de produção de biogás por metro cúbico/litro de substrato adicionado e por metro cúbico/quilograma de ST e SVT acrescidos apresentaram diferenças. Nos casos em que houve a incorporação de 100% de lodo *in natura* e lodo dessalinizado, os potenciais de produção de biogás por litro de substrato adicionado e por quilograma de ST e SVT acrescidos foram significativamente superior ($p < 0,05$) em relação aos tratamentos que envolveram a adição de inóculo na proporção I/S de 2:1, correspondendo a 66,67% e 33,33%, respectivamente.

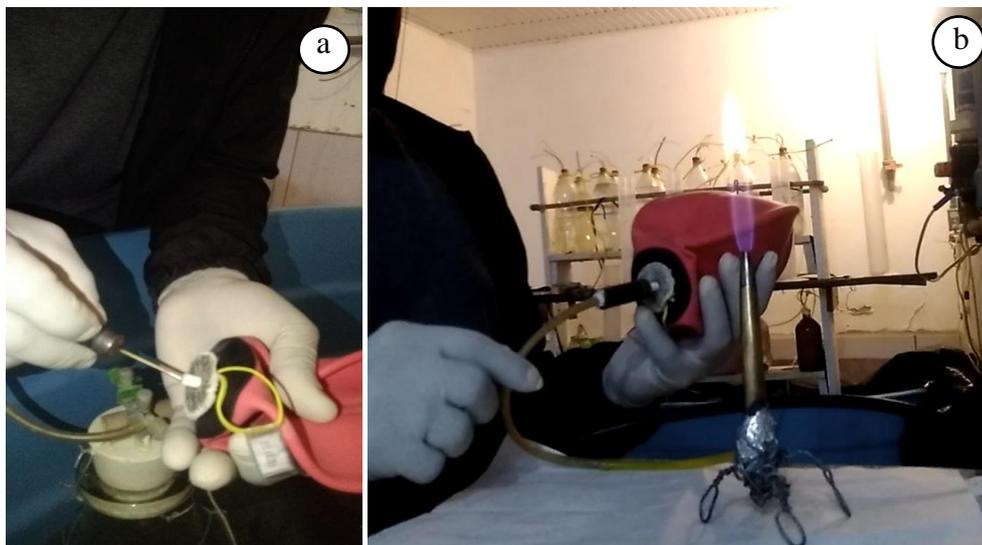
4.2.6 Confirmação da presença de metano no Biogás por queima controlada

Ao longo do teste de combustão do biogás, que se estendeu por um período de 10 minutos, uma câmara pneumática foi previamente abastecida com cerca de 300 a 400 ml de gás metano. Esse gás foi coletado dos gasômetros de metano, que estavam conectados tanto ao biodigestor quanto à câmara de lavagem de biogás, conforme ilustrado na Figura 8. A queima do gás foi realizada através de um bico de Bunsen, conectado à bolsa pneumática de gás por meio de uma mangueira. Para liberar o gás de forma controlada, foi inserida uma válvula de ar na câmara, permitindo a liberação gradual do gás por meio da compressão da bolsa, mantendo a pressão até que todo o gás conduzido até o queimador fosse consumido. Esse teste foi conduzido usando duas bolsas de gás.

Durante o processo de queima, ficou evidente que havia uma quantidade suficiente de gás metano para manter a chama acesa, como pode ser observado na Figura 8. A constância da chama ao longo do teste indica que, no mínimo, aproximadamente 50% do volume total do biogás gerado consiste em metano, conforme metodologia utilizada por Xavier e Lucas Júnior (2010) e Sagula et. al. (2017).

Esse resultado valida a eficácia do processo de digestão anaeróbia, derivado dos efluentes da carcinicultura em BFT, para a produção de metano.

Figura 8. Teste de queima do biogás. (a) Transferência de biogás para a câmara pneumática. (b) Queima de metano com uso de um similar de bico de Bunsen.



Fonte: Autor (2023).

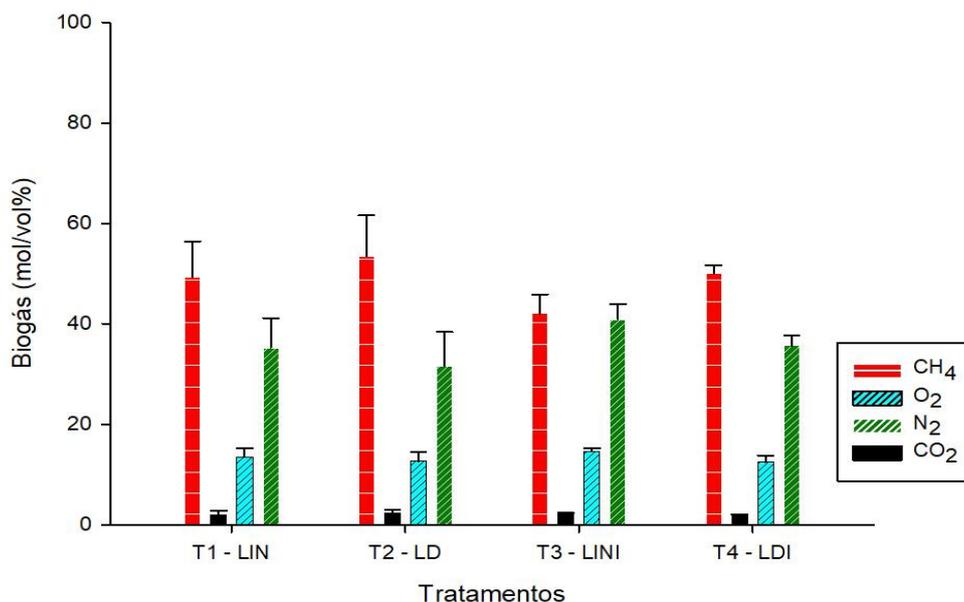
4.2.7 Quantificação do Potencial metanogênico por cromatografia dos gases em resíduos de cultivo de camarões.

A realização das análises cromatográficas desempenhou um papel de extrema relevância ao permitir uma caracterização abrangente dos produtos gasosos resultantes dos biorreatores. Através dessa metodologia, foi possível obter identificações precisas dos principais constituintes gasosos, incluindo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Embora tenha sido levada em consideração a possível presença de hidrogênio (H_2) no biogás gerado, as nuances das análises cromatográficas impediram a sua detecção. Esse desafio decorreu, provavelmente, da similaridade nas respostas térmicas entre o hidrogênio e o gás de arraste utilizado, o hélio (He), resultando na limitação da precisão da detecção.

As amostras gasosas para as análises cromatográficas foram coletadas em três momentos distintos durante um período de 60 dias de digestão anaeróbia. A primeira coleta das amostras nos biorreatores de cada tratamento ocorreu no vigésimo terceiro dia de digestão anaeróbia. A segunda coleta foi realizada no trigésimo sexto dia, seguida pela terceira coleta no sexagésimo dia, após o início do processo de retenção hidráulica e produção de biogás. É importante ressaltar que as análises em questão não abrangeram a avaliação dos compostos sulfeto de hidrogênio (H_2S) e monóxido de carbono (CO). Os Gráficos 4, 5 e 6 ilustram as distribuições percentuais das composições gasosas

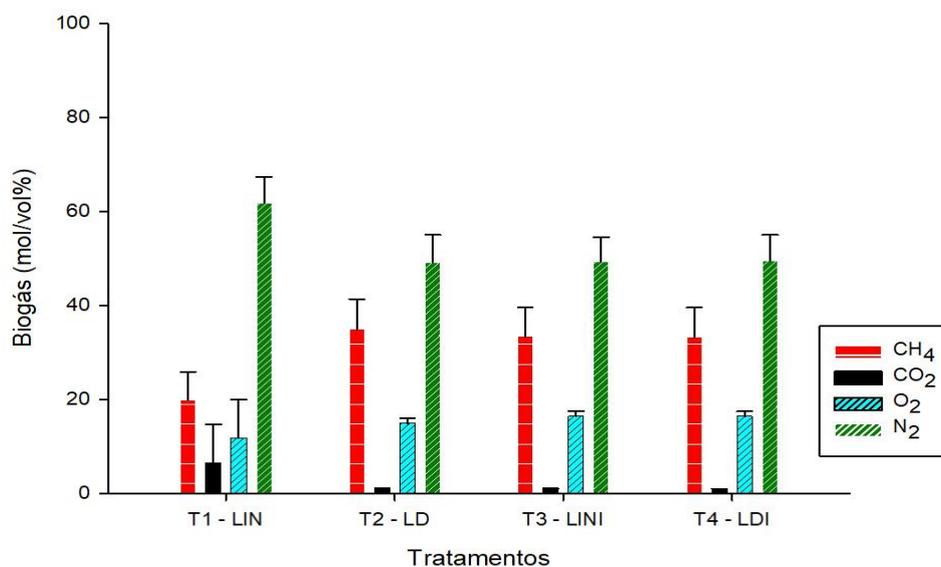
constituintes do biogás gerado em cada uma das configurações de tratamento experimental.

Gráfico 4. Análise da primeira amostra: teor percentual e desvio padrão de metano no biogás por tratamento na pesquisa.



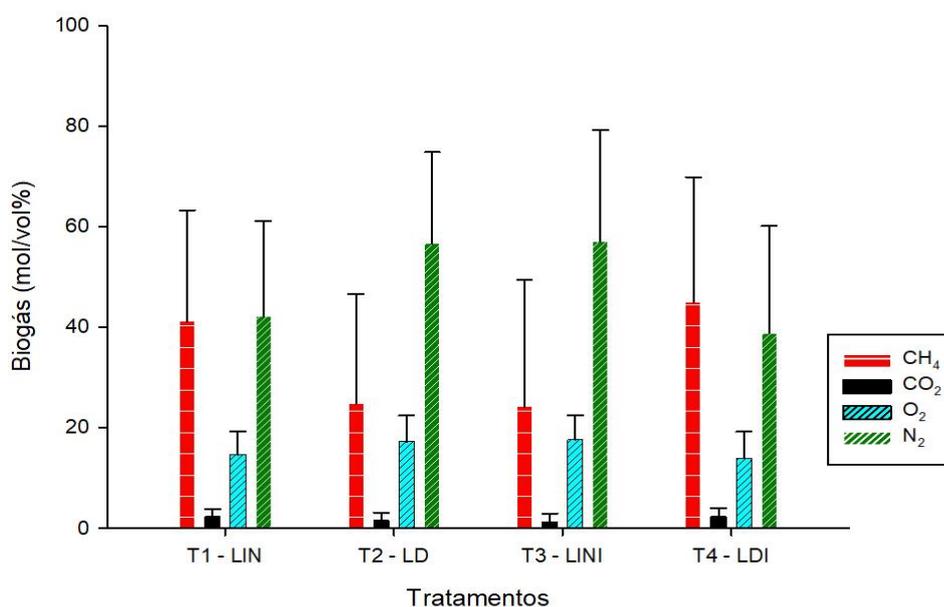
Fonte: Autor (2023)

Gráfico 5. Análise da segunda amostra: teor percentual e desvio padrão de metano no biogás por tratamento na pesquisa.



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 6. Análise da terceira amostra: teor percentual e desvio padrão de metano no biogás por tratamento na pesquisa.



Fonte: Autor (2023)

Ao examinar os resultados cromatográficos das três coletas pontuais de amostras de gás (conforme Tabela 13), alinhando-se com os objetivos experimentais, foi possível verificar que no *Experimento 1* as análises cromatográficas revelaram notáveis variações nos teores percentuais de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e nitrogênio (N₂) nos diversos tratamentos. Uma tendência de incremento contínuo nas concentrações de CH₄ nos ensaios dos tratamentos T1 (lodo *in natura*) e T2 (lodo dessalinizado) foi observada, possivelmente indicando um potencial metanogênico mais pronunciado ao longo do tempo. Adicionalmente, o Tratamento T2 demonstrou teores reduzidos de CO₂ nas análises, o que suscita a possibilidade de uma influência da salinidade na produção de CO₂.

No âmbito do *Experimento 2*, os tratamentos com adição de inóculo (T3 e T4) também apresentaram variações nos componentes gasosos conforme as análises cromatográficas. No Tratamento T3 (lodo *in natura* + Inóculo), foi verificado um aumento nas concentrações de CH₄ e CO₂ nas análises subsequentes, ao passo que a concentração de O₂ diminuiu. De forma análoga, o Tratamento T4 (lodo dessalinizado + Inóculo) exibiu variações comparáveis, caracterizadas pelo aumento gradual dos teores de CH₄ e CO₂ e a redução do O₂.

Tabela 13. Análises Cromatográficas dos gases gerados em diferentes tratamentos.

	Tratamentos	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	N ₂ (%)
1ª Analise	T1(controle)	19,87±6,0	6,48±8,2	11,84±8,1	61,81±5,6
	T2	34,87±6,4	1,03±0,1	14,93±1,1	49,17±5,8
	T3	33,40±6,2	0,83±0,3	16,44±1,2	49,34±5,5
	T4	33,22±6,3	0,76±0,2	16,41±1,1	49,61±5,4
2ª Analise	T1(controle)	49,37±7,1	1,98±0,8	13,49±1,87	35,16±6,0
	T2	53,48±8,1	2,26±0,7	12,71±1,8	31,55±6,8
	T3	42,13±3,8	2,26±0,1	14,72±0,6	40,88±3,1
	T4	49,98±1,7	1,80±0,3	12,53±1,3	35,69±2,0
3ª Analise	T1(controle)	41,07±22,2	2,29±1,5	14,57±4,7	42,07±19,0
	T2	24,80±21,8	1,46±1,6	17,15±5,2	56,59±18,2
	T3	24,18±25,2	1,22±1,7	17,56±4,9	57,04±22,2
	T4	44,99±24,9	2,35±1,7	13,91±5,3	38,75±21,3

Fonte: Autor (2023)

Considerando os teores metanogênicos detectados nas três análises cromatográficas, é possível destacar as seguintes observações:

Experimento 1:

- Os tratamentos T2 (lodo dessalinizado) e T4 (lodo dessalinizado + inóculo) consistentemente apresentaram maiores teores percentuais de metano (CH₄) em todas as análises;
- Os tratamentos T1 (lodo *in natura*) e T3 (lodo *in natura* + inóculo) também evidenciaram um aumento progressivo nos teores de CH₄, embora os valores não tenham atingido os níveis dos tratamentos com lodo dessalinizado.

Experimento 2:

- Nos tratamentos com adição de inóculo (T3 e T4), foi observada uma tendência semelhante de aumento nos teores de CH₄ ao longo das análises;
- Os tratamentos com inóculo (T3 e T4) exibiram teores mais elevados de CH₄ em comparação com os tratamentos sem inóculo (T1 e T2), especialmente na terceira análise.

Dessa forma, podemos concluir que os tratamentos com lodo dessalinizado (T2 e T4) e com adição de inóculo (T3 e T4) apresentaram os maiores teores de metano. Essa observação sugere que a combinação de lodo dessalinizado e a presença de inóculo pode ter impactado positivamente na produção de metano, resultando em concentrações mais altas desse gás. Esse fenômeno pode estar relacionado à composição do lodo e à influência dos microrganismos adicionados, os quais podem ter contribuído para uma conversão mais eficaz dos substratos em metano, resultando em um potencial metanogênico mais notável nos tratamentos mencionados.

Vale ressaltar que há discrepâncias entre os resultados das análises cromatográficas realizadas em três momentos distintos durante o processo de biodigestão anaeróbia e a quantificação direta do metano ao longo de 60 dias. Essa diferença pode ser justificada por diversos fatores que influenciam a produção de biogás, em particular o metano, a partir dos resíduos do cultivo de camarões em BFT.

As análises cromatográficas forneceram informações pontuais sobre a composição dos gases em momentos específicos do processo de digestão anaeróbia. Entretanto, esses momentos, apesar de representativos, podem não capturar completamente a dinâmica complexa dos processos microbiológicos em curso durante a decomposição dos resíduos. Adicionalmente, como as análises cromatográficas não foram conduzidas de maneira contínua, flutuações intermediárias nos componentes gasosos podem não ter sido registradas. Como resultado, embora possamos identificar tendências gerais, detalhes específicos podem não estar plenamente refletidos. Em contrapartida, a quantificação direta do metano ao longo de 60 dias oferece uma visão mais ampla do potencial de produção de biogás e metano ao longo do tempo. Essa abordagem direta envolve medições contínuas ou periódicas da quantidade de metano produzido e acumulado durante o processo. Essas medições contínuas podem capturar os efeitos acumulativos da atividade microbiana, proporcionando uma compreensão mais completa da produção de metano.

Os resultados da quantificação direta do metano, que destacam o tratamento T2 com a maior taxa de produção de metano por litro de substrato adicionado ($0,01089 \text{ m}^3/\text{l}$), podem ser justificados considerando-se que a adição de lodo dessalinizado pode ter criado um ambiente propício para a atividade metanogênica. A presença de microrganismos e condições específicas nos resíduos dessalinizados pode ter facilitado a conversão

eficiente dos substratos em metano. Além disso, a presença de inóculo pode ter acelerado a produção de metano nos tratamentos T3 e T4, como indicado pela tendência observada nas análises cromatográficas.

As discrepâncias entre os resultados das análises cromatográficas e a quantificação direta podem ser atribuídas à natureza dinâmica da digestão anaeróbia, onde múltiplos fatores, incluindo a composição do lodo, as condições de reação e as populações microbianas, interagem de maneira complexa. As análises cromatográficas fornecem informações valiosas sobre as mudanças nos perfis de gás, enquanto a quantificação direta do metano oferece uma visão mais abrangente da produção ao longo do tempo.

Portanto, a combinação das duas abordagens - análises cromatográficas e quantificação direta do metano - proporciona uma compreensão mais completa e complementar dos processos de produção de biogás a partir de resíduos do cultivo de camarões marinhos em BFT. Enquanto as análises cromatográficas destacam tendências nas composições gasosas, a quantificação direta do metano oferece informações sobre a produção real ao longo do tempo, auxiliando na validação e interpretação das observações das análises cromatográficas.

5. Conclusão

5.1 Conclusões e Considerações finais

Com base nas avaliações conduzidas para determinar o potencial do efluente gerado na carcinicultura, mais precisamente no cultivo superintensivo de camarões marinhos (*Litopenaeus vannamei*) em um sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) com o propósito de geração de biogás, ressalta-se a análise crítica da influência da salinidade e da introdução de inóculo microbiológico na biodigestão anaeróbia, com especial foco no desempenho metanogênico no biogás produzido a partir do lodo de camarão.

No contexto das análises efetuadas, fica evidente que a utilização dos efluentes provenientes da carcinicultura, especialmente em cultivos utilizando o sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT), emerge como uma estratégia promissora. Notavelmente, o lodo de camarão demonstra ser propício para a conversão energética por meio da produção de biogás, obtido através do processo de biodigestão anaeróbia. Duas abordagens distintas foram empregadas para avaliar esse potencial: a quantificação direta

do metano ao longo de um período de 60 dias e análises cromatográficas realizadas em pontos específicos do processo.

A primeira linha de análise concentra-se na investigação da influência da salinidade na produção de biogás. Os resultados obtidos indicam que a presença de salinidade desempenha um papel substancial no desempenho da biodigestão anaeróbia. Especificamente, a introdução de cloreto de sódio (NaCl) por meio do uso de lodo *in natura* (T1) revelou um impacto adverso na atividade microbiana, acarretando uma notável redução na produção de biogás. A presença do íon sódio pode ser considerada um fator relevante na formação de sulfeto de hidrogênio (H₂S), o qual tem sido associado como um possível inibidor da metanogênese, potencialmente afetando a eficácia da produção de metano (CH₄).

Adicionalmente, a influência do inóculo microbiológico (LGA) na produção de biogás a partir do lodo de camarão foi alvo de investigação. Os resultados sugerem que a introdução do inóculo não resultou em um impacto significativo na produção de biogás quando comparada ao tratamento controle (T1). Isso implica na necessidade de uma seleção criteriosa da combinação entre o lodo de camarão e o inóculo, visando otimizar a eficiência da produção de biogás.

A segunda abordagem de análise, baseada em avaliações cromatográficas, proporciona informações detalhadas sobre a composição do biogás em diferentes etapas do processo. Em consonância com os resultados da primeira linha de análise, os tratamentos nos quais a salinidade foi reduzida (T2 e T4) apresentaram consistentemente maiores teores percentuais de metano nas análises cromatográficas. Isso reforça a influência positiva da diminuição da salinidade na promoção da produção metanogênica.

Adicionalmente, os tratamentos que receberam a adição de inóculo (T3 e T4) mostraram porcentagens mais altas de metano nas análises cromatográficas, porém, na produção real, a quantidade de metano gerado foi menor. Este resultado sugere uma disparidade entre a eficiência da presença de microrganismos adicionais na composição do biogás e sua eficácia na produção de metano.

As considerações sobre a influência da salinidade e do inóculo microbiológico na produção de biogás a partir do lodo de camarão ressaltam a complexidade desses fatores no contexto da carnicultura e na busca pela produção sustentável de biogás. A otimização da salinidade e a seleção criteriosa do inóculo emergem como componentes-

chave para maximizar a produção metanogênica, contribuindo para a eficácia do sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) na conversão dos resíduos de camarão em biogás.

A otimização da salinidade e a seleção criteriosa do inóculo emergem como componentes-chave para maximizar a produção metanogênica, contribuindo para a eficácia do aproveitamento dos resíduos de camarão, resultantes do sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) na conversão de biogás.

Com base nas avaliações conduzidas para determinar o potencial do efluente gerado na carcinicultura, mais precisamente no cultivo superintensivo de camarões marinhos (*Litopenaeus vannamei*) em um sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) com o propósito de geração de biogás, ressalta-se a análise crítica da influência da salinidade e da introdução de inóculo microbiológico na biodigestão anaeróbia, com especial foco no desempenho metanogênico no biogás produzido a partir do lodo de camarão.

No contexto das análises efetuadas, fica evidente que a utilização dos efluentes provenientes da carcinicultura, especialmente em cultivos utilizando o sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT), emerge como uma estratégia promissora. Notavelmente, o lodo de camarão demonstra ser propício para a conversão energética por meio da produção de biogás, obtido através do processo de biodigestão anaeróbia. Duas abordagens distintas foram empregadas para avaliar esse potencial: a quantificação direta do metano ao longo de um período de 60 dias e análises cromatográficas realizadas em pontos específicos do processo.

A primeira linha de análise concentra-se na investigação da influência da salinidade na produção de biogás. Os resultados obtidos indicam que a presença de salinidade desempenha um papel substancial no desempenho da biodigestão anaeróbia. Especificamente, a introdução de cloreto de sódio (NaCl) por meio do uso de lodo *in natura* (T1) revelou um impacto adverso na atividade microbiana, acarretando uma notável redução na produção de biogás. A presença do íon sódio pode ser considerada um fator relevante na formação de sulfeto de hidrogênio (H₂S), o qual tem sido associado como um possível inibidor da metanogênese, potencialmente afetando a eficácia da produção de metano (CH₄).

Adicionalmente, a influência do inóculo microbiológico (LGA) na produção de biogás a partir do lodo de camarão foi alvo de investigação. Os resultados sugerem que a introdução do inóculo não resultou em um impacto significativo na produção de biogás

quando comparada ao tratamento controle (T1). Isso implica na necessidade de uma seleção criteriosa da combinação entre o lodo de camarão e o inóculo, visando otimizar a eficiência da produção de biogás.

A segunda abordagem de análise, baseada em avaliações cromatográficas, proporciona informações detalhadas sobre a composição do biogás em diferentes etapas do processo. Em consonância com os resultados da primeira linha de análise, os tratamentos nos quais a salinidade foi reduzida (T2 e T4) apresentaram consistentemente maiores teores percentuais de metano nas análises cromatográficas. Isso reforça a influência positiva da diminuição da salinidade na promoção da produção metanogênica.

Adicionalmente, os tratamentos que receberam a adição de inóculo (T3 e T4) mostraram porcentagens mais altas de metano nas análises cromatográficas, porém, na produção real, a quantidade de metano gerado foi menor. Este resultado sugere uma disparidade entre a eficiência da presença de microrganismos adicionais na composição do biogás e sua eficácia na produção de metano.

As considerações sobre a influência da salinidade e do inóculo microbiológico na produção de biogás a partir do lodo de camarão ressaltam a complexidade desses fatores no contexto da carcinicultura e na busca pela produção sustentável de biogás. A otimização da salinidade e a seleção criteriosa do inóculo emergem como componentes-chave para maximizar a produção metanogênica, contribuindo para a eficácia do sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) na conversão dos resíduos de camarão em biogás.

A otimização da salinidade e a seleção criteriosa do inóculo emergem como componentes-chave para maximizar a produção metanogênica, contribuindo para a eficácia do aproveitamento dos resíduos de camarão, resultantes do sistema de Tecnologia de Bioflócos (BFT) na conversão de biogás.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Diante dos resultados alcançados por esta pesquisa, algumas sugestões são sugeridas para fins de otimizar a produção de biogás com foco no lodo de camarões marinhos e garantir um melhor desempenho da biodigestão anaeróbia:

- ***Estudo da relação Salinidade-Inóculo:*** Maior investigação acerca da interação salinidade e a eficiência do inóculo microbiano, com ênfase em inóculos de maior resistência à salinidade;

- ***Melhorar a composição do inóculo:*** identificar microrganismos mais eficientes na metanogênese dos resíduos da carcinicultura, analisando o potencial microbiológico dos inóculos e sua relação com os substratos;
- ***Estudos sobre o balanço de massa e energia:*** Estudar os processos de biodigestão através das entradas e saídas ao longo do tempo de retenção hidráulica, em avaliação da eficiência global do sistema;
- ***Estudos sobre o balanço de massa e energia:*** Compreender os processos de biodigestão por meio da análise das entradas e saídas de carbono ao longo do tempo de retenção hidráulica, buscando avaliar a eficiência global do sistema em termos de produção e consumo de energia;
- ***Modelagem matemática:*** Utilizar a modelagem matemática para projeções do comportamento do sistema biodigestor em diferentes cenários, para fins de otimizar as condições operacionais e melhorar a produção de metano;
- ***Análise Econômica e Ambiental:*** Avaliar perspectivas econômicas e ambientais da conversão de efluentes em biogás, ponderando custobenefício e impacto ambiental;
- ***Descrição de Substratos:*** Pesquisas sobre a composição dos efluentes do cultivo de camarão, abrangendo variações sazonais, objetivando aperfeiçoar o tratamento e a geração de biogás;
- ***Análise do manejo de Efluentes:*** Avaliar a eficácia dos métodos utilizados em tratamentos de digestatos gerados na biodigestão e na remoção de nutrientes e poluentes;
- ***Avaliação de Escala Piloto e Industrial:*** Efetuar estudos em maior escala para a validação da viabilidade prática da conversão dos efluentes da carcinicultura em biogás;
- ***Estudo de outras Fontes de Resíduos:*** Estudar a viabilidade do uso da tecnologia de biodigestão anaeróbica a outros resíduos orgânicos do setor aquícola;
- ***Desenvolver novas Tecnologias de Controle:*** Efetuar estudo para o desenvolvimento de tecnologias de mitigação dos efeitos negativos da salinidade no processo de biodigestão dos efluentes de cultivo, como sistemas de pré-tratamento para diminuição da concentração de sais nos substratos.

Por fim, essas sugestões objetivam aprofundar o entendimento acerca dos processos que envolvem a produção de biogás, a partir da biodigestão dos efluentes da carcinicultura em sistemas de bioflócos, bem como melhorar sua eficiência e viabilidade econômica. Essa abordagem pode contribuir para o desenvolvimento de um processo mais eficiente, sustentável e econômico tanto para aquicultura de camarões quanto para a geração de energia renovável a partir desses resíduos.

6. Referências

Alhraishawi, A. A., & Alani, W. K. (2018, May). The co-fermentation of organic substrates: A review performance of biogas production under different salt content. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1032, p. 012041). IOP Publishing.

Andrade, M. R. (2009). Biosistema para produção de biomassa microalgal e biometano (Tese de doutorado, Engenharia e Ciência de Alimentos, Escola de Química e Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande).

APHA (American Public Health Association). Standard methods for examination of water and wastewater. In *Anales de Hidrología Médica*, 23rd ed.; Universidad Complutense de Madrid: Washington, DC, USA, 2017.

Aquino, S. F., Chernicharo, C. A., Foresti, E., Santos, M. D. L. F. D., & Monteggia, L. O. (2007). Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12, 192-201.

Ariunbaatar, J., Bair, R., Ozcan, O., Ravishankar, H., Esposito, G., Lens, P. N., & Yeh, D. H. (2021). Performance of AnMBR in treatment of post-consumer food waste: Effect of hydraulic retention time and organic loading rate on biogas production and membrane fouling. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 594936.

Associação Brasileira de Criadores de Camarão (ABCC). (2017). Censo da Carcinicultura do Litoral Sul do Estado do Ceará e Zonas Interioranas Adjacentes. Natal, RN.

Associação Brasileira de Criadores de Camarão (ABCC). (2020). Produção Brasileira de Camarão Marinho Cultivado por Estado: Dados Reais de 2015 a 2019. Recuperado de <https://abccam.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Producao-de-Camarao-2020.pdf>

Assunção, G. P. D. (2020). Avaliação da produção de metano no biogás frente a diferentes diluições do dejetto bovino e a influência nutricional. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO).

Barana, A. C. (2000). Avaliação de tratamento de manipueira em biodigestores fase acidogênica e metanogênica.

Bioenergy, I. E. A. (2000). Biogas upgrading and utilisation. *International energy agency*, 3-20.

BRAND, M. A., MUÑIZ, G. I. B. D., Silva, D. D., & Klock, U. (2002). Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. *Revista Floresta*, 32(2), 247-259.

Casini, S. T., Vozoller, R. F., & Pinto, M. T. (2003). Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. In ABES, RiMA (Eds.), Capítulo, vol. 1.

Chernicharo, C. A. L. (1997). *Reatores Anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias* (2nd ed., Vol. 5). Belo Horizonte: DESA/UFMG.

Chernicharo, C. A. L. (2016). *Reatores Anaeróbios Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias* (2nd ed. ampliada e atualizada). Belo Horizonte: Ed. UFMG.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro. [201?]. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro>. Acesso em: 2 out. 2020.

Da Fonseca Arantes, R. (2014). *Caracterização quali-quantitativa dos efluentes gerados no cultivo intensivo de *Litopenaeus vannamei* em sistema de bioflocos* (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina).

De Abreu, É. F. (2007). Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário.

De Luca Bonturi, G., & Van Dijk, M. (2012). Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. *Revista Ciências do Ambiente On-Line*, 8(2).

De OLIVEIRA, P. A. V., & HIGARASHI, M. M. (2006). Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos.

De Pesquisa Energética, E. E. (2015). Balanço energético nacional 2015. https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf. Acesso em, 12(06), 2016.

Dos Santos, D. F., Guimarães, W. F. F., & Gonçalves, C. U. (2017). Biodigestores como alternativa à sustentabilidade ambiental no campo brasileiro: um balanço bibliográfico acerca dos modelos Indiano, Chinês e Batelada. *Revista Ciência Agrícola*, 15, 35-39.

Eiroa, M., Costa, J. C., Alves, M. M., Kennes, C., & Veiga, M. C. (2012). Evaluation of the biomethane potential of solid fish waste. *Waste management*, 32(7), 1347-1352.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2020). Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese / ano base 2019. Rio de Janeiro.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2022). Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano Base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>

Fod and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). Painel de consulta estatística. Produção global de aquicultura (quantidade). Recuperado de [URL]

- Friedrich, A. B. D. C. (2018). Produção de biogás a partir de lodo de carcinicultura.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009). Fundamentos de Física, Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica, 8.ª Edição. LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, Brasil.
- Henrard, A. A., Meza, L. H. R., Borges, J. A., da Rosa, G. M., Andrade, M. D. R., Ogradowski, R., & Costa, J. A. V. (2011). Produção de Biogás a partir de biomassa microalgal. In *III Congresso Brasileiro de Carvão. Gramado, RS.*
- IEMA, 2018. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/>
- Junqueira, J. B. (2011). Biodigestão anaeróbia e compostagem com dejetos de bovinos confinados e aplicação do biofertilizante e do composto em área cultivada com *Panicum maximum* Jacq., CV Tanzânia.
- Kozłowski, D., Hutchinson, M., Hurley, J., & Browne, G. (2018). Increasing nurses' emotional intelligence with a brief intervention. *Applied Nursing Research*, 41, 59-61.
- Krummenauer, D., Samocha, T., Poersch, L., Lara, G., & Wasielesky Jr, W. (2014). The reuse of water on the culture of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in BFT system. *Journal of the World Aquaculture Society*, 45(1), 3-14.
- Kuczman, O., Gueri, M. V. D., De Souza, S. N. M., Schirmer, W. N., Alves, H. J., Secco, D., ... & Hernandez, F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382-389.
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1), 821-826.
- Lima, L. S. (2014). Lei de Boyle. *Revista de Ciência Elementar*, 2(4).
- Liu, Y., & Tay, J. H. (2004). State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. *Biotechnology advances*, 22(7), 533-563.
- Matos, C. F. (2016). Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção.
- Matos, C. F., Pinheiro, E. F. M., Paes, J. L., Lima, E., & de CAMPOS, D. V. B. (2017). Avaliação do potencial de uso de biofertilizante de esterco bovino resultante do sistema de manejo orgânico e convencional da produção de leite.
- Milanez, A. Y., Maia, G. B. D. S., & Guimarães, D. D. (2021). Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil.
- Otaraku, I. J., & Ogedengbe, E. V. (2013). Biogas production from sawdust waste, cow dung and water hyacinth-effect of sawdust concentration. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2(6), 91-93.

Pordesimo, L. O., Edens, W. C., & Sokhansanj, S. (2002). Distribution of above ground biomass in corn stover. In *2002 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Rabelo, E. A. (2018). Palhas de milho e de feijão como co-substratos na digestão anaeróbia de esterco bovino leiteiro. (Dissertação de mestrado). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília.

Sagula, A. L., Costa, L. V. C., & Lucas Junior, J. (2017). Diferentes diluições e uso de reciclo na biodigestão anaeróbia de cama de frango triturada e peneirada: ensaio batelada. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 11, 373-384.

Salam, B., Biswas, S., & Rabbi, M. S. (2015). Biogas from Mesophilic Anaerobic Digestion of Cow Dung Using Silica Gel as Catalyst. *Procedia Engineering*, 105, 652-657.

Sater, O., Souza, N. D. D., Oliveira, E. A. G. D., Elias, T. D. F., & Tavares, R. (2011). Estudo comparativo da carbonização de resíduos agrícolas e florestais visando à substituição da lenha no processo de secagem de grãos de café. *Revista Ceres*, 58, 717-722.

Sbizzaro, M. (2013). *Vermicompostagem a partir de dejetos de ovinos e bovinos com palha de cana-de-açúcar* (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

Schueroff, J. (2019). Análise do efluente de sistema de bioflocos da produção de camarão para geração de biogás.

Soethe, G. C. (2014). Aproveitamento da massa visceral da tilápia (*Oreochromis niloticus*) para produção de biogás.

VIDAL, M. D. F. (2024). *Agroindústria: Etanol*.

Viveros Rodas, D. P. (2022). *Análise do Potencial de Produção de Biogás a partir dos Resíduos de Tilápia na Região de Foz Do Iguaçu-PR* (Master's thesis).

Von Sperling, M. (1996). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos* (Vol. 1). Editora UFMG.

Wasielesky Jr, W., Atwood, H., Stokes, A., & Browdy, C. L. (2006). Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 258(1-4), 396-403.

Xavier, C. D. A., & Lucas Júnior, J. D. (2010). Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. *Engenharia Agrícola*, 30, 212-223.

Zupančič, G. D., Panjičko, M., Marinšek Logar, R., Lavrič, L., Zorec, M., & Fanedl, L. (2023). Salinity inhibition in thermophilic anaerobic digestion of organic waste. *Applied Sciences*, 13(11), 6590.