



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO – PPGINDE

EMANUELLE REGINA ARAUJO GOMES

**VIABILIDADE AMBIENTAL DO TRATAMENTO DO EFLUENTE INDUSTRIAL
DO DENDÊ E USO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE**

TUCURUÍ – PA

2024



EMANUELLE REGINA ARAUJO GOMES

**VIABILIDADE AMBIENTAL DO TRATAMENTO DO EFLUENTE INDUSTRIAL
DO DENDÊ E USO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético – PPGINDE, do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia - NDAE, da Universidade Federal do Pará - UFPA, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Junior Hiroyuki Ishihara

TUCURUÍ – PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A658a Araujo Gomes, Emanuelle Regina.
VIABILIDADE AMBIENTAL DO TRATAMENTO DO EFLUENTE
INDUSTRIAL DO DENDÊ E USO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E
BIOFERTILIZANTE /
Emanuelle Regina Araujo Gomes. — 2024.
106 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Junior Hiroyuki Ishihara
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de
Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós- Graduação
em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí,
2024.

1. Tratamento de efluentes. 2. Efluentes agroindustriais. 3. POME. 4.
Biofertilizante. 5. Biogás.

CDD 620.8

EMANUELLE REGINA ARAUJO GOMES

**VIABILIDADE AMBIENTAL DO TRATAMENTO DO EFLUENTE INDUSTRIAL
DO DENDÊ E USO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético – PPGINDE, do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia - NDAE, da Universidade Federal do Pará - UFPA, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Junior Hiroyuki Ishihara

Aprovada em 28 de março de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Junior Hiroyuki Ishihara – Orientador (PPGINDE/ UFPA)

Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza – Examinador Interno (PPGINDE/ NDAE)

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho – Examinador Externo (PPGEQ e PPGEC/ UFPE)

Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e
meu esposo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me dar força, discernimento e me permitir concluir com êxito mais essa etapa importante da minha trajetória.

Aos meus pais Mara e Márcio pelo apoio de sempre, em todas as minhas decisões e escolhas, por nunca terem me deixado desistir, nunca terem deixado faltar nada e por sempre terem investido na minha educação.

A minha irmã Rafaela, por sempre se fazer presente, através de apoio, ajuda, conselhos, incentivos diários, ajuda com estudos e por todo companheirismo ao longo da nossa vida.

Ao meu esposo Gabriel, por estar ao meu lado todos os dias, me ajudando, apoiando e incentivando a ser cada dia melhor e principalmente por não me deixar desistir nos momentos de dificuldade e fraqueza.

A todos os meus familiares que de algum modo se fizeram presentes durante essa trajetória, proferindo palavras de carinho, apoio, amor e que estão sempre aplaudindo minhas conquistas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Junior Ishihara pelos incentivos, conselhos e orientação ao longo dessa jornada acadêmica e pela confiança em mim depositada.

A CAPES, pela oportunidade de bolsa que possibilitou melhores condições para a realização dessa dissertação e da minha carreira acadêmica enquanto pesquisadora.

Ao PROCAD, projeto ao qual estou vinculada, que possibilitou apoio acadêmico e financeiro à pesquisa, através da aquisição dos materiais para confecção dos biorreatores e das análises laboratoriais particulares.

Por fim, um agradecimento ao NDAE, Núcleo ao qual o programa de Mestrado esta inserido, por proporcionar aos discentes e pesquisadores boas condições de aprendizado através de um excelente grupo de docentes e corpo técnico capacitado para atender a todas às demandas necessárias para a total e satisfatória conclusão da Pós-Graduação.

“A essência do conhecimento consiste em
aplicá-lo, uma vez possuído”.
Confúcio

RESUMO

Os efluentes gerados nos setores agroindustriais são produzidos em grandes quantidades, especialmente aqueles oriundos do beneficiamento de um produto para uso comercial, como é o caso do dendê. Na busca por alternativas de tratamento e/ou reutilização, observa-se no efluente agroindustrial do dendê (POME – *Palm oil mill effluent*) a possibilidade de uso na produção de bioinsumo e biocombustível. Dessa forma, objetiva-se na presente dissertação avaliar a viabilidade do tratamento do efluente industrial do dendê e seu uso para produção de biogás e biofertilizante. A metodologia do trabalho consistiu na confecção de 10 biorreatores de bancada, adaptados com um sistema de controle automático, que permitiu quantificar as medidas de pressão, temperatura e concentração de metano através de sensores, possibilitando o tratamento por meio do sistema de digestão anaeróbia dos efluentes. Para o tratamento foi realizada a inoculação do efluente com um dos materiais sólidos resultantes das etapas de beneficiamento (borra do dendê), e realizou-se a análise físico-química dos parâmetros. Por fim, o sistema permitiu quantificar a produção de biogás e caracterizar o biofertilizante gerado no sistema. A análise dos resultados obtidos demonstrou que o tratamento do POME, aliado ao inóculo, promove melhores resultados para os parâmetros físico-químicos analisados na pesquisa, haja vista que as melhores condições ocorreram para a faixa de 30% de inóculo, ou seja, 700 ml de efluente + 300 ml de inóculo, apresentando viabilidade técnica de tratamento. No que diz respeito a produção do biogás e do biofertilizante, os indicadores de temperatura (20 a 45°C), pressão (1 atm) e produção de gás metano diária entre 0,26 e 0,44 ml do sistema de digestão anaeróbia demonstraram boas condições de operação no sistema, possibilitando a viabilidade de produção deles, através da utilização do efluente agroindustrial do dendê, permitindo uma possibilidade ambientalmente adequada ao resíduo, do ponto de vista da cadeia produtiva e ambiental.

Palavras – chave: tratamento de efluentes; efluentes agroindustriais; POME; biofertilizante; biogás.

ABSTRACT

The effluents generated in the agro-industrial sector are produced in large quantities, especially those from the processing of a product for commercial use, as is the case with palm oil. In the search for alternatives for treatment and/or reuse, oil palm agro-industrial effluent can be used to produce bio-input and biofuel. The aim of this dissertation is to assess the feasibility of treating industrial oil palm effluent and using it to produce biogas and biofertilizer. The work methodology consisted of manufacturing 10 benchtop bioreactors, adapted with an automatic control system, which allowed quantification of pressure, temperature and methane concentration measurements through sensors, enabling treatment through the anaerobic digestion system of effluents. . For treatment, the effluent was inoculated with one of the solid materials resulting from the processing stages (palm oil sludge), and a physical-chemical analysis of the parameters was carried out. Finally, the system made it possible to quantify biogas production and characterize the biofertilizer generated in the system. The data analysis presented demonstrates that the POME treatment, combined with the inoculum, promotes better results for the physicochemical parameters analyzed in the research, given that the best conditions occurred for the 30% inoculum range, that is. 700 ml of effluent + 300 ml of inoculum, showing the environmental viability of the treatment. With regard to the production of biogas and biofertilizer, the indicators of temperature (20 to 45°C), pressure (1 atm) and daily methane gas production of between 0.26 and 0.44 ml in the anaerobic digestion system showed good operating conditions in the system, making their production feasible through the use of oil palm agro-industrial effluent, allowing an environmentally appropriate possibility for the waste, from the point of view of the production chain, the environment and the economy.

Keywords: *effluent treatment; agro-industrial effluents; POME; biofertilizer; biogas.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico do consumo mundial de óleos vegetais de 2013/14 a 2022/23, por tipo de óleo (em milhões de toneladas)	20
Figura 2 - Evolução do Óleo de Palma no Brasil	21
Figura 3 - Óleo de Palma como Matéria Prima para Biodiesel Brasil	21
Figura 4 – Coprodutos do beneficiamento do dendê (a - cachos vazios; b – fibra e engaços; c – torta de palmiste; d – casquilhas da noz; e – cinzas)	22
Figura 5 - Efluente Líquido	23
Figura 6 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.....	29
Figura 7 - Equivalência de 1m ³ de biogás a outros combustíveis	32
Figura 8 - Biodigestor - Modelo Indiano.....	35
Figura 9 - Biodigestor Modelo Fluxo Tubular – Fluxo pistão (Plug Flow) – modelo Canadense.....	35
Figura 10 - Biodigestor – modelo chinês.....	35
Figura 11 - Biodigestor (Planta Industrial).....	36
Figura 12 - Esquema de etapas da metodologia	39
Figura 13 - Localização do Município de Tailândia – PA	40
Figura 14 - Piscina de efluente	41
Figura 15 - Borra do dendê (material inoculante)	41
Figura 16 - Procedimento de Coleta (Efluente – a) (Inóculo – b)	42
Figura 17 - Identificação das amostras	42
Figura 18 - Biorreator	46
Figura 19 - Biorreatores em escala de bancada (10 unidades)	46
Figura 20 - Protótipo do sistema de controle automático.....	47
Figura 21 – Sensores (A – Sensor de Concentração de Metano) (B – Sensor de Pressão e Temperatura) (C – Sensores alocados no gasômetro)	47
Figura 22 - Biorreator em funcionamento	49
Figura 23 - Fermentadores com os tratamentos indicados no quadro 02	50
Figura 24 – Béquer contendo 1 g de cada amostra.....	51
Figura 25 - Amostras diluídas	52
Figura 26 - Amostra no agitador magnético.....	52
Figura 27 - Caracterização do pH.....	53
Figura 28 - Caracterização da turbidez.....	53
Figura 29 - Caracterização da condutividade elétrica	54
Figura 30 - Correção do pH.....	55
Figura 31 - Filtragem das amostras	55
Figura 32 - Preparo das cápsulas (a – Mufla; b – Estufa; c – Dessecador; d – Balança)	56
Figura 33 – Cápsulas em banho maria.....	56
Figura 34 – Cápsulas com amostras no dessecador.....	57
Figura 35 - Pesagem das cápsulas com amostra.....	57
Figura 36 - Cápsulas com amostras na mufla.....	58
Figura 37 - Gráficos comparativos dos parâmetros do inóculo bruto e tratado (T03 e T04) ...	66
Figura 38 - Gráficos comparativos dos parâmetros do efluente bruto e tratado (T01 e T02) ..	68
Figura 39 - Gráficos de temperatura dos biorreatores	71
Figura 40 - Gráficos de pressão dos biorreatores	75
Figura 41 - Gráficos de concentração de metano dos biorreatores	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metodologias utilizadas para caracterização do efluente bruto	43
Quadro 2 - Planejamento Experimental	44
Quadro 3 - Materiais do biorreator	45
Quadro 4 - Materiais do sistema de controle automático	48
Quadro 5 - Indicação de laboratórios e metodologias utilizadas para caracterização do efluente tratado	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de ácidos graxos do óleo de dendê e palmiste.....	23
Tabela 2 - Características de algumas oleaginosas.....	24
Tabela 3 - Caracterização do POME.	26
Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos da borra sólida	27
Tabela 5 – Taxa de crescimento do cenário mundial de produção de energia	31
Tabela 6 - Potencial brasileiro de biogás e biometano por fonte em 2019.....	33
Tabela 7 - Análise laboratorial do efluente bruto	59
Tabela 8 - Análise laboratorial da borra do dendê.....	59
Tabela 9 - Análise laboratorial das amostras do composto tratado	61
Tabela 10 - Volume de metano produzido nos biorreatores.....	82
Tabela 11 - Comparação da produção de biogás em outros trabalhos	83

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Sólidos Totais	56
Equação 2 – Sólidos Totais Fixos.....	57
Equação 3 – Sólidos Totais Voláteis	57
Equação 4 – Carbono Orgânico Total	58
Equação 5 – Volume de gás metano.....	82

LISTA DE SIGLAS/ABREVIATURAS

C	Carbono
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CE	Condutividade Elétrica
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPI	Equipamento de Proteção Individual
G	Graxas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Potássio
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
O	Óleos
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
P	Fósforo
Pa	Pascal
pH	Potencial Hidrogeniônico
POME	<i>Palm Oil Mill Effluent</i>
PVC	Policloreto de vinila
PPM	Partes por milhão
SMWW	Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater
SS	Sólidos em Suspensão
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SV	Sólidos Voláteis
T01	Tratamento 01
T02	Tratamento 02
T03	Tratamento 03
T04	Tratamento 04
T05	Tratamento 05

T06	Tratamento 06
T07	Tratamento 07
T08	Tratamento 08
T09	Tratamento 09
T10	Tratamento 10
uC	Unidade de Cor
UFPA	Universidade Federal do Pará
UND	Unidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 DENDÊ (<i>Elaeis guineenses</i>).....	20
2.2 EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS.....	24
2.2.1 Palm Oil Mill Effluent (POME).....	25
2.3 INÓCULO	26
2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA	28
2.5 BIOGÁS.....	31
2.6 BIOFERTILIZANTE.....	33
2.7 ESTUDO DE VIABILIDADE	36
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 ÁREA DE ESTUDO	39
3.2 COLETA.....	40
3.2.1 Procedimento de coleta	41
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	43
3.3.1 Local da realização da parte experimental.....	43
3.3.2 Caracterização	43
3.4 ENSAIOS EM ESCALA DE BANCADA	44
3.4.1 Planejamento Experimental.....	44
3.4.2 Sistema de Digestão Anaeróbia.....	45
3.4.2.1 Confeção dos biorreatores de bancada.....	45
3.4.2.2 Sistema de controle automático.....	46
3.4.2.3 Digestão anaeróbia	49
3.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TRATADO E BIOFERTILIZANTE.....	50
3.5.1 Instrumentos e Procedimentos experimentais	51
3.5.1.1 – Preparo das amostras	51
3.5.1.2 – Análise do pH.....	52
3.5.1.3 – Análise da turbidez.....	53
3.5.1.3 – Análise da condutividade elétrica.....	54

3.5.1.4 – Análise da cor	54
3.5.1.5 – Análise de sólidos totais, fixos e voláteis	55
3.6 ANÁLISE DOS DADOS	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 VIABILIDADE DO TRATAMENTO DO POME, MATERIAL INOCULANTE E COMBINAÇÃO DOS RESÍDUOS, POR MEIO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	59
4.1.1 Análise das características físico – químicas e viabilidade da utilização do POME na produção de biofertilizante.	62
4.1.1.1 pH.....	62
4.1.1.2 Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK)	63
4.1.1.3 Sólidos totais, Sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis	64
4.1.1.4 Condutividade elétrica.....	64
4.1.1.5 Cor e Turbidez.....	65
4.1.1.6 DQO e DBO	65
4.1.1.7 Carbono Orgânico Total.....	66
4.1.2 Análise individual do POME e inóculo	66
4.2 VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO POME NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	70
4.2.1 Temperatura	70
4.2.2 Pressão	74
4.2.3 Concentração de metano	78
5 CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS	86
ANEXO I – CÓDIGO DO SENSOR DE CONCENTRAÇÃO DE METANO.....	100
ANEXO II - CÓDIGO DO SENSOR DE TEMPERATURA E PRESSÃO.....	101
ANEXO III – TABELAS DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA, PRESSÃO E CONCENTRAÇÃO DE METANO DOS BIORREACTORES	102

1 INTRODUÇÃO

A água, presente na natureza, possui múltiplos usos e é aplicada para os mais variados processos, principalmente os industriais, ao passo que garante a produtividade econômica, vem também promovendo um consumo elevado desse recurso. Tal utilização se dá devido a necessidade de transformar a matéria prima em produto e, os processos produtivos deste, geram efluentes quase que proporcionalmente à quantidade de água que foi utilizada (Costa, 2014; Emerick, 2019).

Compreende-se a importância tanto do ponto de vista ambiental, quanto social e econômico, do tratamento de efluentes agroindustriais, em virtude dos danos que estes provocam quando são lançados sem tratamento adequado no ambiente. Para tanto, há a necessidade da utilização de tecnologias eficientes e de outras alternativas para uma possível reutilização desses resíduos. Devendo-se reduzir a elevada carga orgânica, biológica, química, dentre outras, que os efluentes possuem (Costa, Mendonça; Junior, 2017; Emerick, 2019; Kuhl, 2017).

Entende-se que a escolha do processo de tratamento destes resíduos estão diretamente associadas às características do efluente que é gerado em função das atividades praticadas, do controle operacional da indústria e das condições e características da água que foi utilizada (Emerick, 2019), sendo necessário, portanto, analisar as características do efluente, para posteriormente definir quais os processos e etapas de tratamento serão necessários para a redução das impurezas.

Dentro do setor agroindustrial, o cultivo do dendê com finalidades comerciais existe desde a década de 60, onde ocorre a extração do óleo de palma ou de dendê, que possui elevado valor para a indústria alimentícia (Kuhl, 2017). Durante o seu beneficiamento, são gerados produtos ou coprodutos que podem ser utilizados para outras finalidades. Dentre estes produtos, destacam-se os óleos, os cachos, a fibra, a casca, o caroço, assim como o efluente (Kuhl, 2017).

Os resíduos e efluentes que são gerados durante o processo do beneficiamento do dendê têm sido utilizados como bioinsumo e biocombustível, os quais são adquiridos através de métodos físicos, biológicos e químicos (Ferreira Junior *et al.*, 2020). A possibilidade de tratamento do efluente e a sua reutilização como biofertilizante e biogás permite uma finalidade adequada ao resíduo do ponto de vista da cadeia produtiva e ambiental, em virtude da alternativa de reaproveitá-lo no processo produtivo de outras culturas, ou até mesmo do próprio dendê (Romera, 2020).

Dentro dessa finalidade, destaca-se nos ODS's (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável) o objetivo 6 - Água potável e saneamento (Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos), através do qual pretende-se eliminar o despejo, reduzir o descarte de águas residuárias não tratadas e aumentar a reutilização segura e o objetivo 7 - Energia limpa e acessível (Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos), que pretendem aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética do mundo (Organização das Nações Unidas, 2023).

O efluente líquido gerado neste processo é conhecido como efluente do óleo de palma ou *Palm Oil Mill Effluent* (POME) (Ferreira Junior *et al.*, 2020; Romera, 2020). O POME é um efluente composto por um elevado teor de sólidos, óleo, graxa, matéria orgânica e água, que promove prejuízos ao meio ambiente, na possibilidade de ser descartado de forma inadequada e sem tratamento (Marinho, 2016). Dessa forma, é imprescindível realizar o tratamento deste de forma adequada, seja através do tratamento biológico por meio do processo de digestão anaeróbia, seja através de outros processos de tratamento (Romera, 2020).

Diante do exposto, a presente dissertação tem como objetivo avaliar a viabilidade do tratamento do efluente líquido do óleo de palma, através da inoculação com a borra do dendê, e sua utilização na produção de biogás e biofertilizante. Tal estudo possibilita uma forma de tratamento e destinação final ou reaproveitamento adequado ao efluente, além de promover benefícios no cultivo de outras culturas, através do uso do biofertilizante e o uso como biocombustível por meio da produção do biogás.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade ambiental do tratamento do efluente agroindustrial do dendê (POME) e sua utilização na produção de biogás e biofertilizante.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o tratamento do POME por meio do processo de digestão anaeróbia;
- Avaliar a viabilidade da utilização do POME na produção de biofertilizante;
- Analisar as características físico – químicas do biofertilizante produzido;
- Avaliar a viabilidade da utilização do POME na produção de biogás.

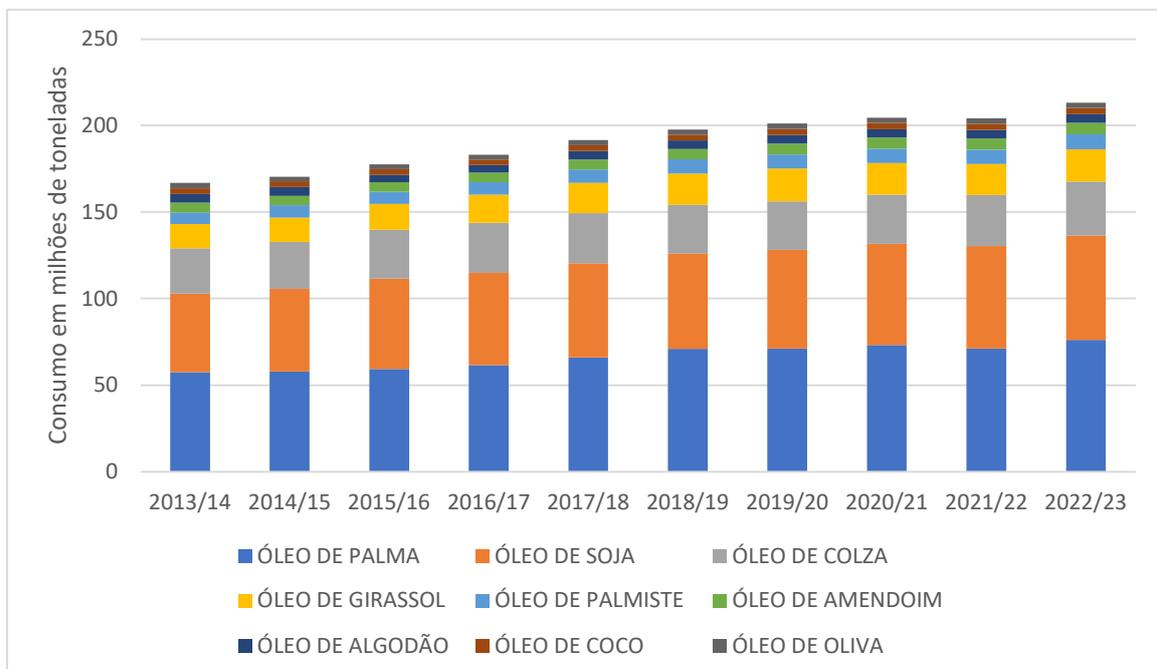
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DENDÊ (*Elaeis guineenses*)

O dendê é o fruto de uma palmeira de origem africana, que dentre os óleos vegetais existentes, possui maior consumo mundial (aproximadamente 75 milhões de toneladas) (Figura 1), sendo produzido e consumido em larga escala no Brasil, respectivamente 570 mil e 915 mil toneladas (Figura 2), principalmente na região Norte, tendo como maior produtor o Estado do Pará e com maior quantidade de hectares de área plantada. Sua produção equivale a aproximadamente 1/3 da produção de óleos vegetais no país (Vásquez Carrillo, 2018; Reis, 2019; Santa Rosa, 2022).

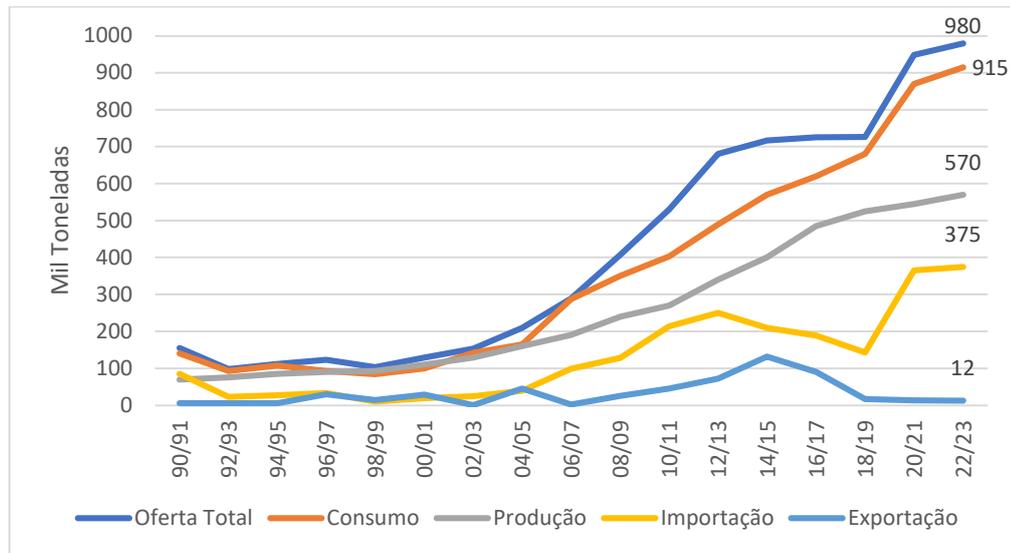
Sua produção apresenta diversas vantagens, seja de interesse ambiental, em detrimento do sequestro de carbono, seja de interesse comercial e industrial, uma vez que esta cultura pode ser utilizada para produção de alimentação animal e humana, cosméticos e para produção de biocombustíveis (Figura 3) (Alcântara, 2022; Bandeira *et al.*, 2023; Ferreira Junior *et al.*, 2019; Romera, 2020; Santa Rosa, 2022). De acordo com Rezende *et al.* (2021) o óleo de palma está entre as matérias primas mais importantes para a produção de biodiesel, chegando a 35% de uso desse material para a produção mundial.

Figura 1 - Gráfico do consumo mundial de óleos vegetais de 2013/14 a 2022/23, por tipo de óleo (em milhões de toneladas)



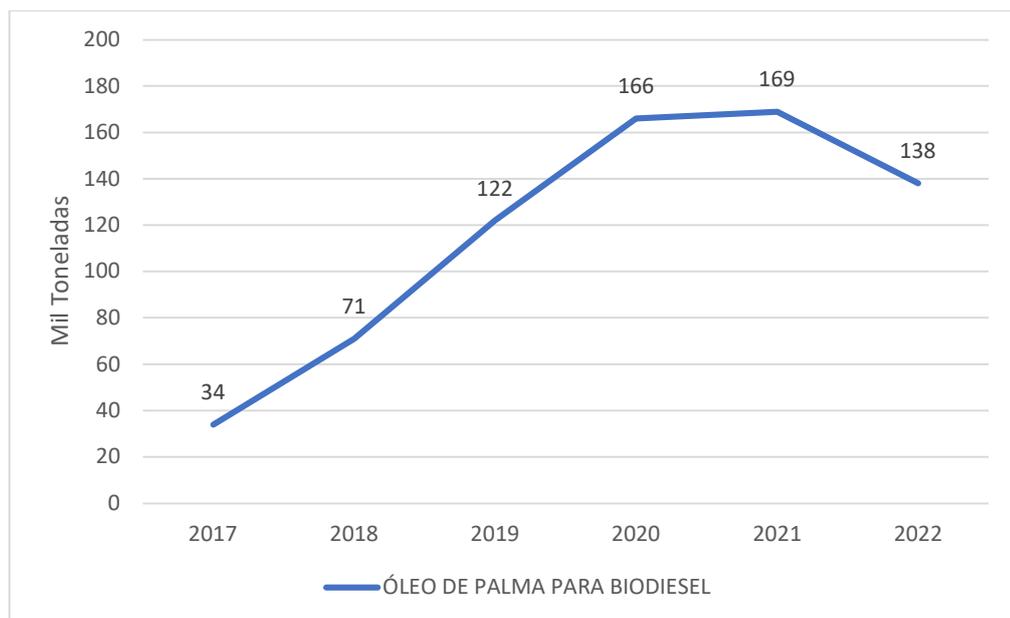
Fonte: Shahbandeh (2023), adaptado pelo autor

Figura 2 - Evolução do Óleo de Palma no Brasil



Fonte: USDA (2022), adaptado pelo autor.

Figura 3 - Óleo de Palma como Matéria Prima para Biodiesel Brasil



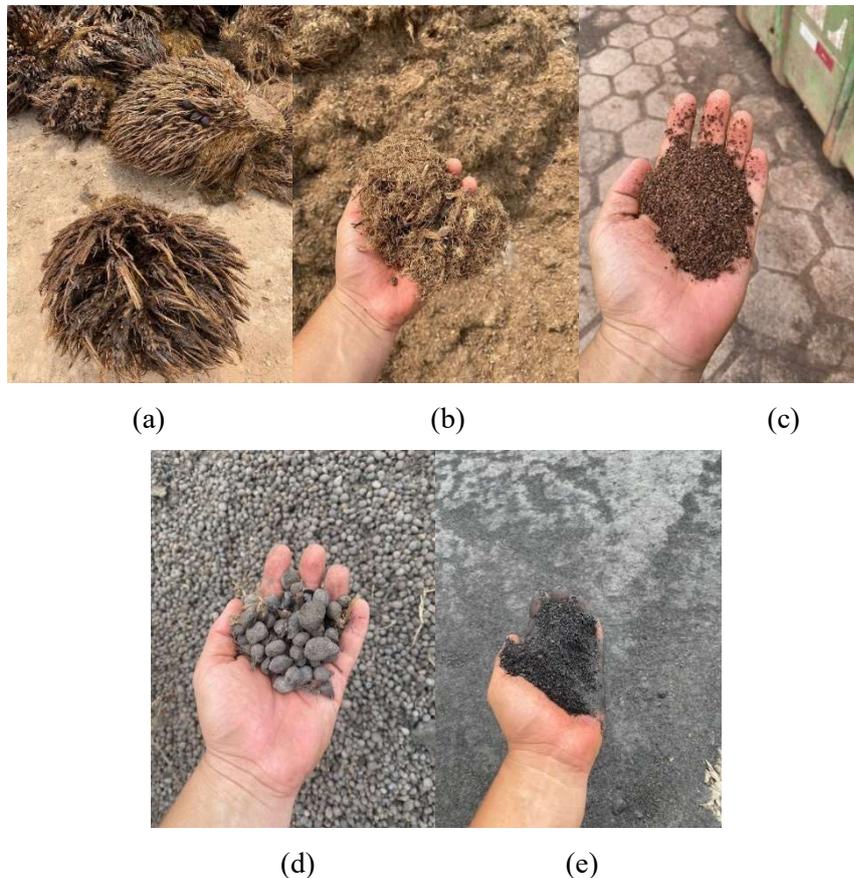
Fonte: USDA (2022), adaptado pelo autor.

Os processos envolvidos e o beneficiamento do dendê geram inúmeros coprodutos, dentre os quais pode-se destacar em média 20% do óleo de dendê ou óleo de palma (oriundo do mesocarpo do fruto), 1,5% do óleo de palmiste (oriundo da semente do fruto), 3,5% torta de palmiste (oriundo da extração do óleo da amêndoa), 22% de engaços, 12% de fibras, 5% de cascas e 50% de efluente líquido, conhecido popularmente como *Palm Oil Mill Effluent* - POME (Vásquez Carrillo, 2018; Reis, 2019; Santa Rosa, 2022; Simas, Pereira, 2019).

Os coprodutos mencionados e alguns outros produtos são utilizados para outros processos dentro da própria produção ou para outras finalidades (Morais, 2016; Teixeira, 2019), como por exemplo:

- Cachos vazios: utilizados na queima (vapor) e possibilidade de serem incorporados ao solo para reciclar nutrientes. (Figura 04-a);
- Fibra: insumo para a construção civil, estabilização de solos, matéria prima similar à fibra de coco, combustível para caldeira (Figura 04-b);
- Engaços: utilizados para produzir cinza, vapor ou na cobertura do campo (Figura 04-b);
- Torta de palmiste: utilizada na alimentação animal (Figura 04-c);
- Casquilhas da noz do dendê: utilizados para produzir carvão ativado e combustível, bem como sendo substituta do cimento ou granito, em agregados de concreto (Figura 04-d);
- Cinzas: utilização para adubação (Figura 04-e);
- Efluente líquido: utilizado na produção de biogás e biofertilizante (Figura 05).

Figura 4 – Coprodutos do beneficiamento do dendê (a - cachos vazios; b – fibra e engaços; c – torta de palmiste; d – casquilhas da noz; e – cinzas)



Fonte: Autor (2024).

Figura 5 - Efluente Líquido



Fonte: Autor (2024).

O óleo do dendê apresenta em sua composição semelhança aos ácidos graxos (Tabela 1) saturados e não saturados, sendo respectivamente 39% de palmítico e 4% esteárico, e 36 oleico e 14% linoleico, além de 7% de fonte de antioxidantes e vitaminas, o que propicia a produção de biocombustíveis (Rodrigues, 2018). Além disso, devido sua constituição heterogênea, apresenta celulose (40 a 50 %), hemicelulose (25 a 35%) e lignina (25 a 35%) (Morais, 2016).

Tabela 1 - Composição de ácidos graxos do óleo de dendê e palmiste

	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3		
	C10								C20	
Óleo	C8	Láurico	Mirístico	Palmítico	Palmitoleico	Esteárico	Oleico	Linoleico	Linolênico	C20:1
	C6									C22:0
	C4									C22:1
	Palma (%)	0,1	0,45	1,12	38,84	4,25	4,25	35,79	14,77	0,22
Palmiste (%)	6,9	47,53	15,21	7,84	1,90	1,90	14,73	2,14	0,1	0,3

Fonte: Vásquez Carrillo (2018); Miranda (2023), adaptado pelo autor

Dentre as culturas de oleaginosas, o rendimento do óleo de dendê é o maior em quantidade em toneladas por hectare, assim como sua colheita, a qual, embora exista o período de safra e entressafra, ocorre durante os doze meses do ano, conforme apresentado na Tabela 2, diferente da maioria das outras culturas que ocorre em torno de três meses (Simas, Pereira,

2019). Dessa forma, segundo os autores, pode-se afirmar que esses fatores tornam o dendê mais atrativo para ser cultivado.

Tabela 2 - Características de algumas oleaginosas.

Espécie	Origem do Óleo	Meses de Colheita	Rendimento em Óleo (t/ha)
Dendê	Amêndoa	12	3,0 - 6,0
Babaçu	Amêndoa	12	0,4 – 0,8
Girassol	Grão	3	0,5 – 1,5
Colza	Grão	3	0,5 – 0,9
Mamona	Grão	3	0,5 – 1,0
Amendoim	Grão	3	0,6 – 0,8
Soja	Grão	3	0,2 – 0,6

Fonte: Simas, Pereira (2019), adaptado pelo autor

De acordo com Vidal (2016), os motivos para a produção e o cultivo do dendê são a elevada produção do óleo por hectare plantado, o custo mínimo da produção, em comparação a outros frutos e culturas com características semelhantes e o fato da demanda elevada por produtos mais naturais e puros para a indústria alimentícia, em detrimento da fabricação de alimentos, além disso, devido as quantidades de antioxidantes, é um óleo interessante para as indústrias de cosméticos e químicas.

2.2 EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS

Os efluentes agroindustriais são oriundos de processos agropecuários industriais, os quais ganham destaque devido serem de um dos setores com maior quantidade de efluente gerado (Oliveira, Coelho; Melo, 2018). Devido a diversidade em sua composição, as quais podemos citar materiais orgânicos, nutrientes, contaminantes biológicos, gorduras, componentes químicos, dentre outros, seu tratamento e destinação final, quando não executados de maneira correta, podem ser prejudiciais ao meio ambiente e a saúde (Oliveira, Coelho; Melo, 2018; Santos, 2020).

Dentre os problemas causados em função do descarte inadequado do efluente agroindustrial, tem-se: morte da vegetação, entupimento e encharcamento do solo para descarte em terrenos; poluição aquática resultando na morte de espécies de peixes e plantas e redução de fontes de água para uso doméstico e turístico, para casos de descarte em corpos hídricos; dentre outros (Mohammad *et al.*, 2021; Okoli, 2021).

Como alternativa a esses problemas, estudos buscam a utilização desse efluente como forma de reaproveitamento para produção de rações, energia e como fertilizantes para o setor

da agricultura (Santos, 2020). Ou, em outros casos, como afirma a autora, através do próprio tratamento do efluente, para que possa haver o posterior reuso ou então a correta destinação.

Tal reuso pode ser citado na produção de mudas, forragem, fruteiras e cafeeiras (Bezerra *et al.*, 2019). Entretanto, no que diz respeito ao aproveitamento, este apresenta limitações relacionadas à sua composição e a tolerância das culturas, devendo, portanto, sua aplicação ser executada de forma controlada (Bezerra *et al.*, 2019; Santos, 2020).

Dentre as formas de tratamento desse tipo de efluente, tem-se o sistemas de lagoas de estabilização; processos mais intensivos como processos anaeróbicos de separação por membrana e processo de tratamento anaeróbico, executados por meio da digestão, em biodigestores; reatores anaeróbicos; processos por lodos ativados; processos oxidativos e adsorptivos; tratamento por técnicas biológicas na presença de bactérias, fungos, leveduras, microalgas, e outras culturas microbianas; Sistema Anaeróbico de Membrana Assistido por Ultrassom (UMAS); tratamentos físico-químicos como coagulação-floculação; extração com solvente; adsorção; dentre outros (Saad, Wirzal; Adi Putra, 2021; Dominic e Baidurah, 2022; Mohammad *et al.*, 2021; Okoli, 2021; Santos, 2020; Silva *et al.*, 2018).

A escolha do melhor tratamento vai depender da origem do efluente, suas características e o tipo de destinação, uma vez que não existe um sistema de tratamento aplicável a todos os casos, conforme afirma Lima *et al.* (2018). Ainda segundo os autores, deve ser realizada uma análise que englobe os aspectos ambientais, sociais e econômicos, para se definir o tratamento que melhor corresponde às demandas (Lima *et al.*, 2018, Notari *et al.*, 2020).

2.2.1 Palm Oil Mill Effluent (POME)

O POME é o efluente líquido gerado no processo produtivo do dendê através de três fontes diferentes, sendo águas residuais da clarificação, condensado de esterilizador e águas residuais de hidrociclones (Mohammad *et al.*, 2021; Okoli, 2021). Sua produção se dá devido a extração dos óleos de palma e de palmiste, onde, para cada tonelada de óleo produzido, são gerados de 0.5 a 2.5 toneladas de efluente (Low *et al.*, 2021). Sabe-se que a composição do POME é basicamente água (95-96%), sólidos suspensos (4-5%), óleos e graxas (0,6-0,7%) e matéria orgânica, possuindo elevado teor de carga orgânica e alto poder poluente (Marinho, 2016; Romera, 2020).

Em detrimento do seu poder de poluição, o efluente precisa ser tratado para que possa ser descartado de forma correta no ambiente ou para que possa ser reutilizado (Ferreira Junior *et al.*, 2020). Devido a isso, estudos vêm sendo realizados para o tratamento do efluente por meio da digestão anaeróbia e de outros processos, para produção de biocombustíveis e

aproveitamento energético, evidenciando a viabilidade ambiental e energética (Ferreira Junior *et al.*, 2020; Ferreira Junior *et al.*, 2019).

Em se tratando de níveis de energia, foi observado que cerca de 57 m³ de POME gera em torno de 500 Ktn de biometano, o equivalente a quase 800 milhões de litros de diesel ou 3,2 MWh de energia elétrica, além disso, no quesito da viabilidade ambiental, o efluente gerado no beneficiamento do dendê pode ser utilizado como fertilizante para o plantio da própria palma do óleo (Marinho, 2016; Romera, 2020).

O POME é considerado um resíduo tóxico devido seu elevado teor de carga orgânica, sendo seu teor expresso em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (Romera, 2020), conforme apresentado na Tabela 3. De acordo com a autora, em detrimento dessa elevada carga orgânica, no processo do tratamento desse efluente, observa-se um produto final com grande quantidade de biogás e com níveis de DQO reduzidos.

Tabela 3 - Caracterização do POME.

Parâmetro	Unidade	Variação
pH	-	4-5
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L	25,000-65,714
Demanda Química de Oxigênio	mg/L	44,300-102,696
Óleos e graxas (O e G)	mg/L	4000-9341
Nitrogênio Amoniacal (NH ₃ – N)	mg/L	35-103
Nitrogênio Total (NT)	mg/L	750-770
Sólidos Totais (ST)	mg/L	40,500-72,058
Sólidos em Suspensão (SS)	mg/L	18,000-46,011
Sólidos Voláteis (SV)	mg/L	34,000-49,300
Fósforo (P)	-	180
Potássio (K)	-	2.270

Fonte: Dominic e Baidurah, 2022; Okoli, (2021); Romera (2020), adaptado pelo autor

2.3 INÓCULO

O inóculo é um material (matéria orgânica) que apresenta uma microbiota responsável pelo consumo de biomassa (Wojcieckowski, *et al.*, 2023). Sua utilização incorporada a efluentes agroindustriais no processo de tratamento por meio de sistemas de digestão anaeróbia tem sido muito difundida por pesquisadores e estudantes das áreas de tecnologias sustentáveis

e ambientais, uma vez que, o uso desses materiais, favorece o processo de biodegradação (Rodrigues, Blasius; Castro, 2020; Santos *et al.*, 2018).

A presença de inóculos nesses sistemas permite otimizar o processo de biodigestão, através da alta taxa metabólica dos microrganismos contida no inóculo (Rodrigues, Blasius; Castro, 2020), garantindo “a existência de células viáveis de bactérias metanogênicas e de um ecossistema anaeróbio cuja função é viabilizar e acelerar o processo de digestão anaeróbia” (Cruz *et al.*, 2019, p. 3).

Neste processo, a inserção do inóculo permite a estabilização do resíduo de maneira mais acelerada, uma vez que é um material que possibilita fornecer microrganismos ao substrato, aumentando, conseqüentemente, a atividade desses microrganismos, melhorando a rentabilidade da produção do biogás e gerando um biofertilizante com características melhoradas (Soares, Paes; Alves, 2022).

Os resíduos que podem ser utilizados como fontes de inóculo são o lodo de estações de tratamento industriais, esterco bovino, suíno e de frango, cascas de alimentos, estratos de solo etc., os quais apresentam microrganismos que vão auxiliar no processo de biodegradação (Soares, Paes; Alves, 2022).

Como uma nova fonte de inoculação, tem-se a borra sólida oriunda do próprio POME, a qual tem sido estudada para avaliar seu potencial de produção de biogás. Este resíduo apresenta elevado teor de DQO, DBO e concentração de sólidos (EMBRAPA, 2013), como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos da borra sólida

Parâmetro	Unidade	Valor
Umidade	%	76,56
Celulose	%	5,09
Lignina	%	7,22
Hemicelulose	%	0,93
Cinzas	%	5,23
DQO	mg/kg	316.937
DBO	mg/kg	41.813
Óleos e graxas	mg/kg	43.000
Sólidos totais	mg/kg	582.000
pH	-	4,08
Carbono	%	55,17
Enxofre	%	0,30

Potássio	%	1,40
Magnésio	%	0,3
Manganês	ppm	38,00
Ferro	ppm	4.438,00
Nitrogênio	%	2,80
Relação C/N	-	19,70
Fósforo	%	0,20
Cálcio	%	0,90
Boro	ppm	9,00
Cobre	ppm	59,00
Zinco	ppm	30,00

Fonte: EMBRAPA (2013), adaptado pelo autor.

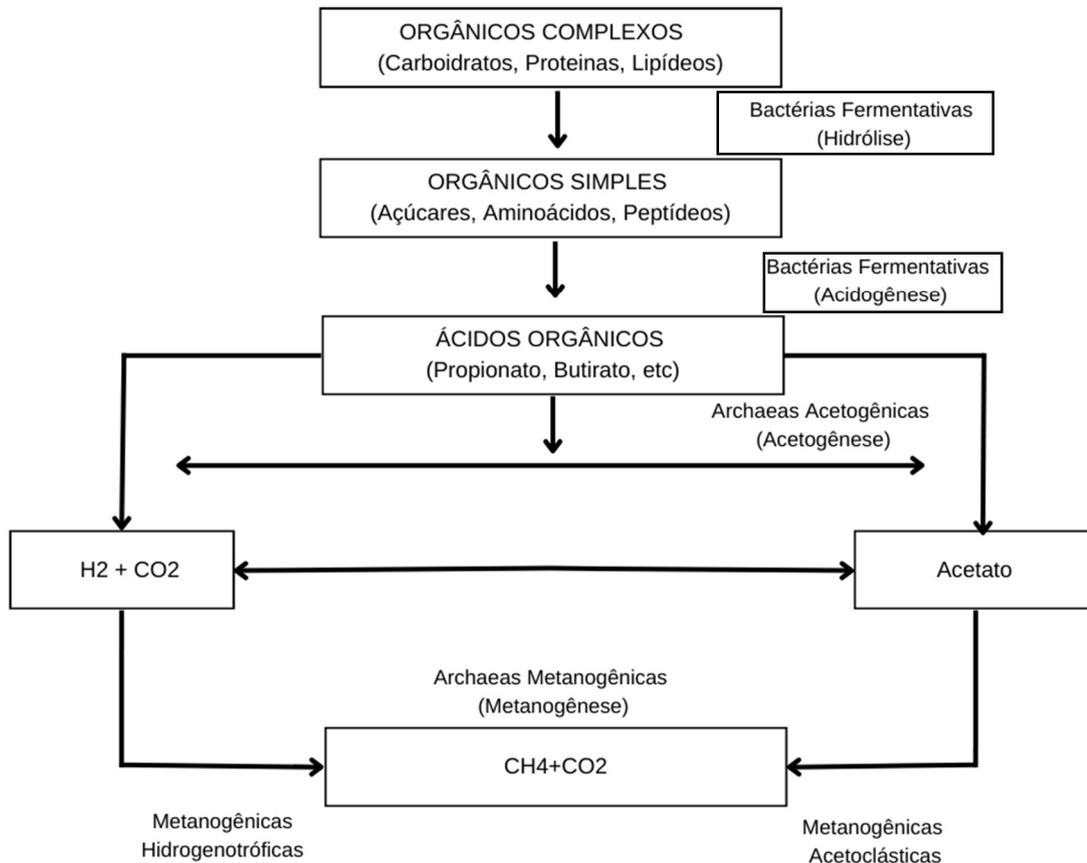
2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é o processo de degradação da matéria orgânica presente em determinado resíduo, em biogás. Tal degradação, conforme o próprio nome diz, ocorre na ausência de oxigênio e na presença de bactérias conhecidas como anaeróbias, além de bactérias anaeróbias facultativas e arqueas metanogênicas (Lima, 2015). Nesse processo, compostos orgânicos e substâncias simples são transformados e geram gases como o Metano (CH₄) e Dióxido de Carbono (CO₂), além do biofertilizante (Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022).

Dentre as vantagens apresentadas por esse processo de tratamento, tem-se a baixa geração de biomassa residual, ou seja, excesso de lodo, o baixo consumo de energia e geração de um gás com elevado poder calorífico, além da possibilidade de ser utilizado como combustível (Damasceno, 2013; Edwiges, 2017).

A digestão anaeróbia acontece em quatro processos distintos, quais sejam: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022; Romera, 2020), conforme a Figura 6 e sendo estas descritas a seguir:

Figura 6 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: Soares, Feiden, Tavares (2017), adaptado pelo autor.

- Hidrólise: é a primeira etapa da digestão anaeróbia, conhecida por ocorrer em um ambiente com pouca quantidade de oxigênio (Soares, Feiden; Tavares, 2017). Nesta etapa ocorre a quebra das matérias orgânicas complexas (carboidratos, proteínas e lipídeos) (Romera, 2020).
- Acidogênese: é a segunda etapa da digestão anaeróbia, onde, após a quebra das matérias orgânicas citadas anteriormente, ocorre a transformação destas, em moléculas menores, como “ácidos graxos, açúcares e aminoácidos” (Romera, 2020). Esta etapa tem a capacidade de fornecer energia para as etapas seguintes, do processo de transformação da matéria orgânica em biogás (Damasceno, 2013).
- Acetogênese: é a terceira etapa da digestão anaeróbia, onde as archaeas acetogênicas transformam os compostos anteriores em Dióxido de Carbono (CO₂), Ácido Acético (CH₃COOH) e Hidrogênio (H₂) (Edwiges, 2017) “substratos intermediários que serão metabolizados pelas archaeas metanogênicas” (Soares, Feiden; Tavares, 2017, pg. 523).

- Metanogênese: é a última etapa da digestão anaeróbia, onde as archaeas metanogênicas produzem o metano, que é o produto final da digestão anaeróbia, sendo que a produção do metano ocorre por duas vias, “uma pelo consumo do ácido acético (arqueas metanogênicas acetoclásticas) e outra a partir do hidrogênio e dióxido de carbono (arqueas metanogênicas hidrogenotróficas)” (Romera, 2020, pg. 12). Nesta etapa ocorre a estabilização da matéria orgânica (Damasceno, 2013).

Existem determinadas condições que devem ser seguidas para o total funcionamento do processo da digestão anaeróbia, sendo estas estabelecidas como parâmetros que vão promover a eficiência do processo do início ao final, os quais podem-se citar: alcalinidade, determinação da relação AI/AP, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica volumétrica e relação COV X Temperatura (Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022).

No processo da digestão anaeróbia, diversos métodos são utilizados para avaliar a cinética anaeróbia (características de degradabilidade de substratos, atividade de microrganismos, dentre outros), entretanto, o ponto importante destes métodos está relacionado ao fato de todos eles se basearem na mistura do substrato (efluente) com o inóculo anaeróbio (lodo), cujo método é feito por meio de incubação em batelada em condições controladas (Inoue, 2008; Junior, 2020; Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022).

A digestão anaeróbia, assim como qualquer outro processo, gera coprodutos, como neste caso, aos gases (usualmente chamados de biogás, devido serem originados em um biodigestor) e o digestato (efluente gerado no biodigestor, utilizado como biofertilizante) (Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022; Romera, 2020). Este segundo subproduto tem sua qualidade e seu potencial para uso agrônômico atrelada a fatores como:

“(a) composição e variabilidade dos resíduos utilizados como substratos para a biodigestão (ex.: dejetos e carcaças de animais mortos, resíduos de agroindústrias, resíduos ou biomassa vegetal, entre outros); (b) tipo de biodigestor e tecnologia de biodigestão utilizada; (c) segregação e perdas de nutrientes nas estruturas de armazenamento dos substratos e do digestato; (d) eficiência dos sistemas pré-tratamento do substrato (ex.: separação de fases antes do biodigestor) e/ou do tratamento do digestato; e (e) diluição dos substratos e digestato com água” (Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022, Pg. 98).

Dessa forma, diversos aspectos devem ser analisados e estudados para a eficiência do processo da digestão anaeróbia e para a eficiência dos seus coprodutos, de forma que eles possam ser utilizados sem causar prejuízos ao ambiente ou a saúde humana e para que possam contribuir de forma significativa nos demais processos em que forem empregados (Edwiges, 2017; Kunz, Steinmetz; Amaral, 2022; Romera, 2020).

2.5 BIOGÁS

O biogás é um produto caracterizado por ser uma mistura de gases, como o metano (55-75%) e dióxido de carbono (25-45%) em sua maioria, gás sulfídrico (0-1%), nitrogênio (0-3) e hidrogênio (0-2%) em sua minoria, que resulta da fermentação anaeróbia de matéria orgânica (Cruz, 2019; Poblete, 2019). Suas características vão depender principalmente de fatores como temperatura, concentração de metano e pressão (Milanez, Maia; Guimarães, 2021).

Esse material pode ser utilizado como fonte de energia, fonte de calor, aquecimento residencial, combustível para veículos, injeção na rede (grid) de gás natural, matéria-prima na indústria química e geração de vapor (Cruz, 2019; Poblete, 2019). Além disso, o biogás apresenta vantagens quando comparado com outros tipos de energia, como as renováveis, por exemplo, pois sua produção, armazenamento e utilização se dá conforme a necessidade do empreendimento e o tipo de finalidade para o qual será utilizado (Martinez, Buhring; Muller, 2019).

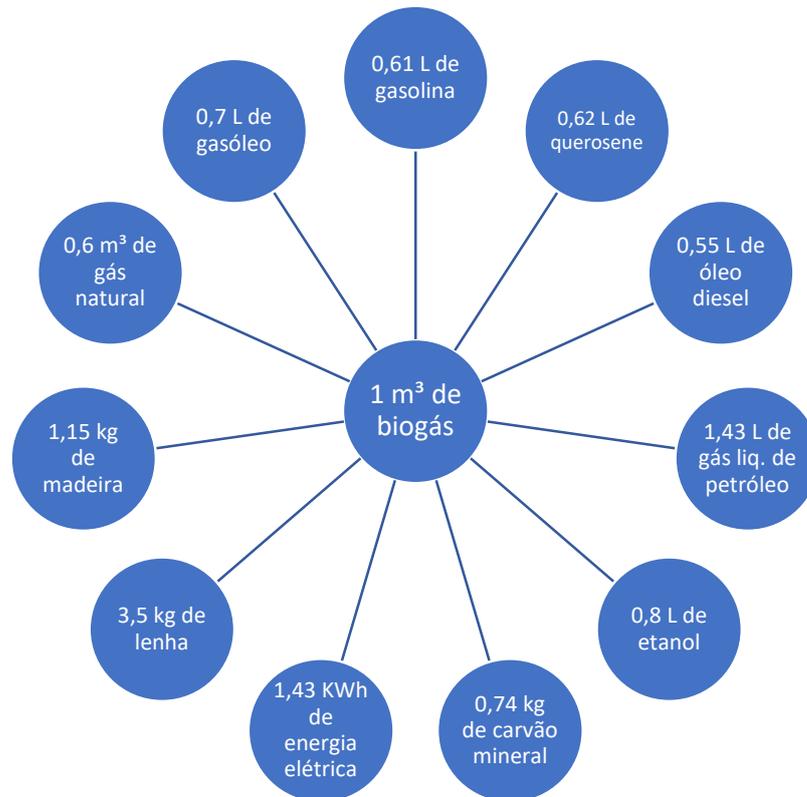
A produção de biogás existente através das atividades agropecuárias diminui as dificuldades por demanda de energia elétrica e, por isso, o uso do biogás para gerar energia elétrica vem sendo muito disseminado em diversos setores, em virtude da promoção da disposição e tratamento adequado de efluentes gerados nos processos produtivos industriais, como pode ser observado na sua taxa de crescimento, alcançando o terceiro lugar, dentre os demais (Tabela 5) (Cruz, 2019; Poblete, 2019). Diante disso, apresenta-se a equivalência do biogás (1 m³) relacionada a outros combustíveis (Figura 7).

Tabela 5 – Taxa de crescimento do cenário mundial de produção de energia

Fonte	Taxa de crescimento (%)
Solar Fotovoltaica	45,5
Eólica	24,0
Biogás	12,8
Solar Térmica	11,4
Biocombustíveis Líquidos	10,1
Geotérmica	3,1
Hidroelétrica	2,4
Biocombustíveis Sólidos	1,1

Fonte: Poblete, 2019, adaptado pelo autor.

Figura 7 - Equivalência de 1m³ de biogás a outros combustíveis



Fonte: Cruz, 2019; Matias, 2022; Pobleto, 2019, adaptado pelo autor.

O biogás traz como uma das vantagens o aproveitamento de resíduos que são de difícil destinação, como por exemplo efluentes, lodo de estações de tratamento, fezes de animais etc. Tal aproveitamento se dá mediante a introdução desses materiais em biodigestores, que permitem a decomposição da matéria orgânica, através da digestão anaeróbia e consequentemente promovem a produção do biogás (Bandeira *et al.*, 2023; De Lima *et al.*, 2022; Matias, 2022).

O Brasil, devido possuir um extenso setor agroindustrial, apresenta elevado potencial de produção de biogás, em função do aproveitamento dos resíduos gerados neste setor (Milanez, Maia; Guimarães, 2021). Diante disso, através de dados da Cibiogás (Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás) (2020), pode-se apresentar que até o ano de 2019, 521 plantas de geração de biogás estavam em operação no país, seguido de 12 em reforma ou reformulação e 15 em fase de implementação, as quais seriam capazes de gerar um volume de 1,8 bilhão de m³ e biogás.

A produção de biogás também se dá através de aterros sanitários, uma vez que os resíduos sólidos descartados apresentam uma grande quantidade de chorume, com grande potencial energético (Santos, 2019). De acordo com Fernandes (2022) a finalidade do gás dos

aterros está condicionada em detrimento do nível de tratamento aplicado a ele, como uso no próprio aterro, eletricidade, abastecimento, entre outros.

No setor agroindustrial, a Cibiogás (2020) apresenta ainda as fontes de substrato que são utilizadas para produção de biogás, sendo do total 78% de plantas que utilizam substrato do setor agropecuário, 13% da indústria e 9% de resíduos sólidos urbanos ou esgoto. Abaixo, apresenta-se o potencial brasileiro de biogás para este setor (Tabela 6).

Tabela 6 - Potencial brasileiro de biogás e biometano por fonte em 2019

Origem	Volume biogás (bilhões de m ³ /ano)	Volume biometano (bilhões de m ³ /ano)	Geração elétrica Equivalente (kW/ano)
Agroindústria	38,39	19,55	72,10
Sucroenergético	39,76	21,06	85,17
Saneamento	6,84	2,62	10,28

Fonte: Milanez, Maia; Guimarães (2021), adaptado pelo autor.

Quando se fala a respeito de ganhos ambientais, estes vão além do uso como fonte de energia por exemplo, o uso de efluentes nos biodigestores ou nos sistemas de digestão anaeróbia reduzem os riscos de poluição ao meio ambiente e riscos sanitários, uma vez que o processo não remove os nutrientes do resíduo, permitindo que este seja utilizado como biofertilizante na agricultura (Milanez, Maia; Guimarães, 2021).

2.6 BIOFERTILIZANTE

Os biofertilizantes, cujo uso principal está na agricultura, são definidos como produtos que possuem a possibilidade de atuar totalmente ou parcialmente em plantas cultivadas, de forma a melhorar seu desempenho, através do desenvolvimento produtivo e por meio da ausência de produtos que são proibidos por algumas regulamentações, conforme estabelecido pela Instrução Normativa nº 46 de 06 de outubro de 2011.

A Instrução Normativa Nº 61, de 08 de julho de 2020 estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, tolerâncias, registro, garantias, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Dentro dessa IN, fica estabelecido os teores permitidos de nutrientes e outros materiais presentes no biofertilizante para uso no solo.

São considerados como compostos bioativos, devido serem um resíduo final da decomposição e/ou fermentação de material orgânico, principalmente através de processos como a digestão anaeróbia (Sousa, 2018). Os biofertilizantes, devido essa característica de bioatividade, promovem maior grau de proteção às culturas, possuindo propriedades fungicidas

e repelentes, que são favoráveis no que diz respeito à proteção ao ataque de pragas e o aparecimento de doenças nas plantas, além é claro, do aumento de nutrientes no solo (Lapicciarella *et al.*, 2022; Sousa, 2018).

Seus usos, surgem como alternativa à utilização de fertilizantes agrícolas ou adubos químicos, os quais não apresentam tantos benefícios às plantas e malefícios ao meio ambiente. Dentre estes, pode-se destacar, segundo Ferreira Junior *et al.* (2021) e Lapicciarella *et al.* (2022), diminuição de uso da energia; recuperação acelerada do solo; aumento da porosidade do solo; maior qualidade dos cultivos; maior produtividade dos cultivos; serve como suporte para a sustentabilidade na agricultura; é viável economicamente, principalmente para pequenos agricultores; o equilíbrio nutricional; dentre outros.

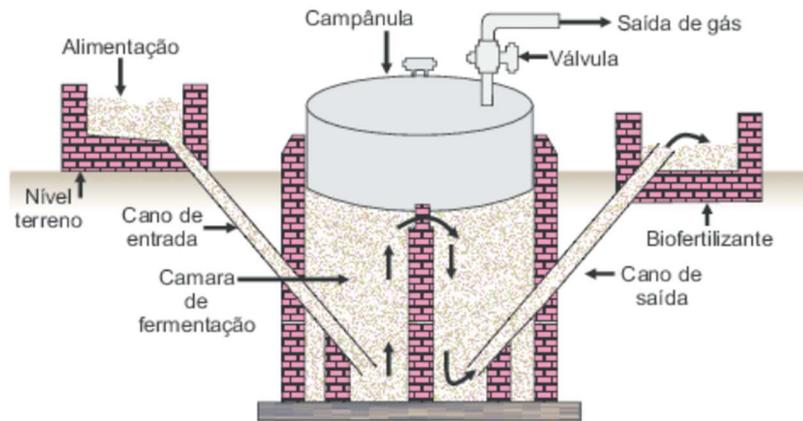
Em detrimento da busca por alternativas sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente, o uso desse tipo de produto tem crescido, tanto devido aos benefícios citados anteriormente, quanto devido à melhora das características químicas, físicas e biológicas do solo e ao fácil alcance e produção (Ferreira Junior *et al.*, 2021; Sousa, 2018).

Um fator de importância está na forma de apresentação do biofertilizante, pois, de acordo com Ferreira Junior *et al.* (2021), os biofertilizantes na sua forma líquida são melhor absorvidos pelo solo, pois possuem contato direto com planta através das raízes, e, em contrapartida, os fertilizantes sólidos necessitam dissolver-se para tornar-se disponível para as plantas, por intermédio da chuva e/ou irrigação.

Como forma de melhor desempenho e eficiência do uso dos biofertilizantes, deve-se realizar estudos a respeito do tipo de cultura que receberá o produto, bem como o tipo de solo (textura, estrutura e teor de matéria orgânica) e até mesmo do material que gerou o biofertilizante, a fim de se promover alta produtividade e estudos de dosagens ideais ao crescimento e nutrição da cultura (Lapicciarella *et al.*, 2022; Ferreira Junior *et al.*, 2021)

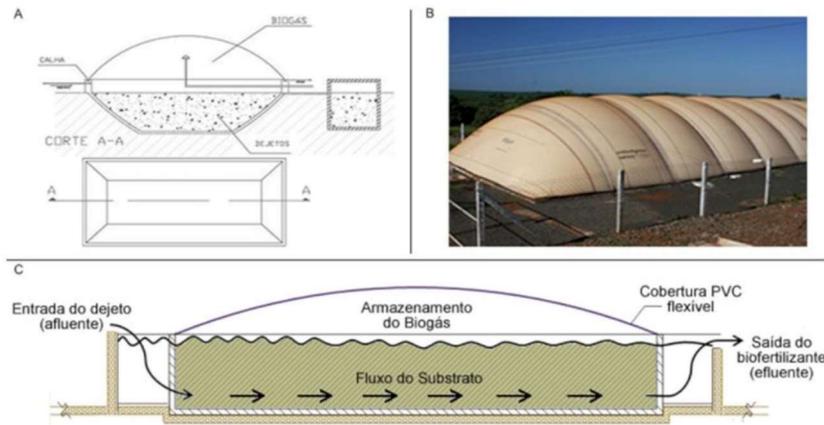
Existem dois processos importantes para se produzir o biofertilizante, o primeiro, através do processo aeróbio, acontece por meio do contato do produto com o ar, sendo misturado com água, armazenado e constantemente revolvido (misturado); e o segundo, através do processo anaeróbio, onde não ocorre contato com o ar, sendo também misturado com água, e armazenado (Lapicciarella *et al.*, 2022), após esses processos, de forma sucinta, ambos são continuados devendo-se coar e aplicar sobre as plantas e no solo. Nesses processos, utilizam-se os biodigestores (Figuras 8, 9, 10 e 11) para a produção do biofertilizante.

Figura 8 - Biodigestor - Modelo Indiano



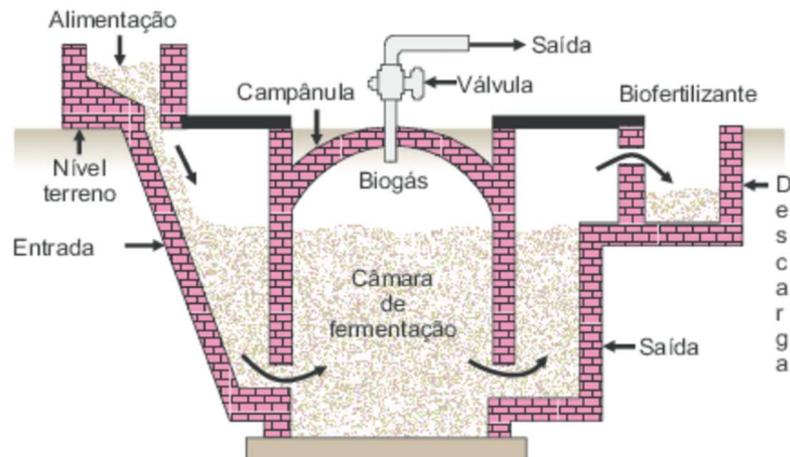
Fonte: De Lima, 2011; Cassini, Coelho; Pecora, 2014.

Figura 9 - Biodigestor Modelo Fluxo Tubular – Fluxo pistão (Plug Flow) – modelo Canadense



Fonte: Bley Junior, 2009; De Lima, 2011.

Figura 10 - Biodigestor – modelo chinês



Fonte: Cassini, Coelho; Pecora, 2014.

Figura 11 - Biodigestor (Planta Industrial)



Fonte: Luostarinen, Kuligowski, 2011

De acordo com Junior *et al.* (2021),

“os biofertilizantes tem um tempo de fermentação concluída em 30 dias no verão, ou 45 dias no inverno. A temperatura é um dos fatores importantes para sua fermentação, sendo que no período quente pode ser concluída de 14 a 30 dias e em períodos mais frios, de 45 a 90 dias, sendo que a temperatura ideal é 38 °C” (Ferreira Junior *et al.*, 2021, Pg. 6).

2.7 ESTUDO DE VIABILIDADE

O estudo de viabilidade busca analisar e avaliar a implementação bem-sucedida de um determinado projeto, do ponto de vista socioeconômico, ambiental e técnico, ou seja, é uma forma de avaliar se este pode ou não funcionar ou ser executado, mediante antecipação de um possível êxito ou fracasso, promovendo a recomendação de alternativas para a concepção do projeto e reduzindo as ameaças à validade (Bonatto, 2012; Tickle-Degnen, 2013).

De acordo com Bonatto (2012), o aspecto técnico avalia as alternativas para se implantar o projeto, o ambiental examina os possíveis impactos ambientais advindos da implantação do projeto e o socioeconômico avalia as possíveis melhorias e problemáticas oriundas da implantação do mesmo.

Os estudos de viabilidade promovem a utilização de dados e informações confiáveis e aplicam estudos e metodologias, as quais são capazes de identificar, analisar e estabelecer soluções alternativas para um projeto (IIBA, 2011).

Existem vários tipos de estudos de viabilidade, os quais se complementam e possibilitam uma melhor percepção das condições ideais de implementação de um projeto, quais sejam, estudo de viabilidade técnica; estudo de viabilidade econômico-financeira; estudo de

viabilidade comercial (Neto, 2009); estudo de viabilidade ambiental (Macedo e Teixeira, 2017); e o estudo de viabilidade social (Bonatto, 2012), os quais serão apresentadas a seguir:

- Estudo de viabilidade técnica: visa estabelecer se o projeto é tecnicamente possível de ser executado, de forma a se pensar “como será feito?”, “quais materiais serão necessários?”, “qual o pessoal necessário?”, “o pessoal disponível é qualificado?” e “quais técnicas devem ser definidas para a consecução do projeto?”.
- Estudo de viabilidade econômico-financeira: visa estabelecer se o projeto, em toda sua fase operacional, é executável do ponto de vista econômico e financeiro. Buscando compreender se a tecnologia é cara de se adquirir, se existe capital inicial suficiente para a execução do projeto e se o cenário atual é ou não favorável à implantação.
- Estudo de viabilidade comercial: visa estabelecer as condições de demanda para o projeto executado. Esse tipo de análise considera aspectos de estatísticas populacionais, sazonalidade, concorrência, dentre outros.
- Estudo de viabilidade ambiental: visa analisar de forma completa o ambiente onde será executado determinado projeto, o bioma, população local, recursos ambientais, atividades econômicas da região e as atividades que podem impactar direta ou indiretamente nessas situações.
- Estudo de viabilidade social: visa compreender o funcionamento da população do local onde determinado projeto será executado, sua cultura, as características econômicas, analisando fatores de saúde humana e benefícios sociais que serão gerados àquela população.

De posse da variedade de estudos de viabilidade que podem ser realizados, diversos autores decidiram estudar a viabilidade do tratamento de efluentes agroindustriais e a produção de biogás e o emprego do biofertilizante gerado no processo, ao longo dos anos, como apresentado abaixo. É o caso do trabalho de Marder (2015) que avaliou a partir de efluentes agroindustriais, a geração de biogás e o emprego do biofertilizante gerado para remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos e, concluiu este afirmando que os “resíduos agroindústrias tem potencial para geração de biogás de qualidade... Ao mesmo tempo em que se produz energia limpa e renovável, reduz-se a carga orgânica dos substratos, gerando um biofertilizante, que ao ser disposto em solo, resulta em um menor impacto no ambiente” (Marder, 2015, pg. 51).

No trabalho de Meyer, Ribeiro e Pombo (2017), foi estudada a análise da viabilidade técnica de tratamento a partir da digestão anaeróbica de dejetos suínos de um sistema de produção de biogás e biofertilizante e concluiu-se que houve redução significativa de todos os parâmetros físico-químicos analisados, além da redução considerável de carga orgânica do efluente, certificando-se que o sistema por eles analisados foi tecnicamente viável para o tratamento.

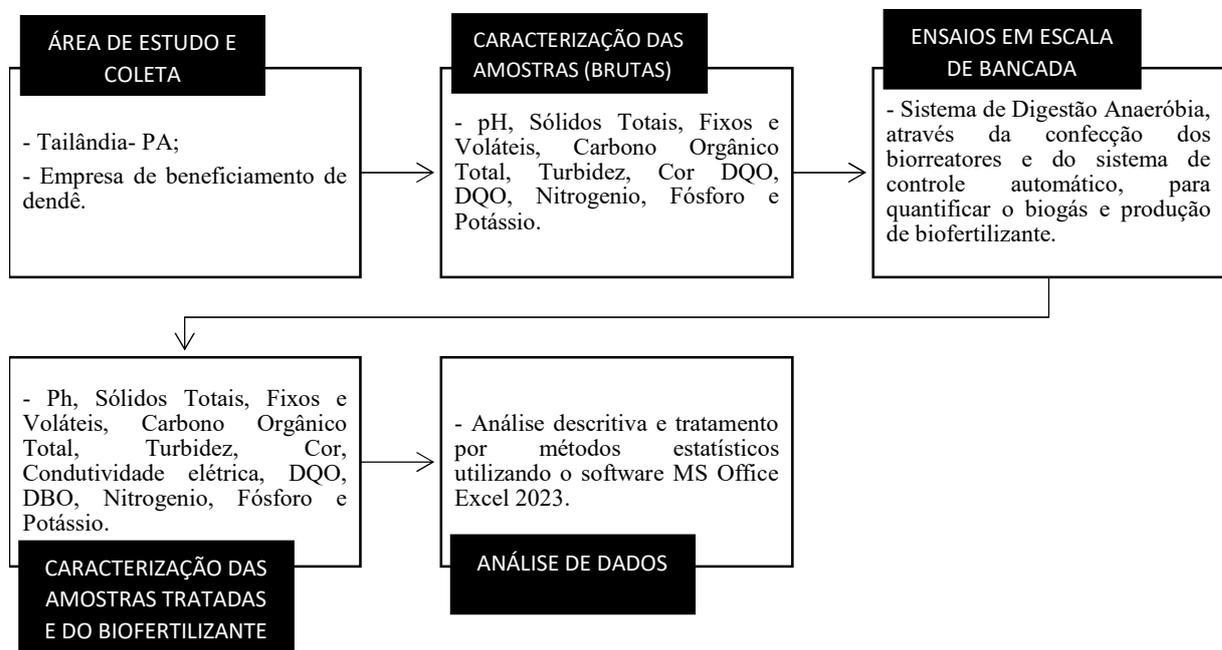
Na pesquisa de Zawatski (2018) avaliou-se a viabilidade técnica e ambiental de estação de tratamento de efluentes de bovinocultura leiteira e a consequente geração de biofertilizantes, concluindo que “há redução de sólidos e poluentes” e “redução de custos com o uso de biofertilizante, contribuindo assim, com a redução dos impactos ambientais, evitando que o efluente seja disposto de maneira inadequada no solo e/ou em corpos hídricos” (Zawatski, 2018, pg. 67).

Do mesmo modo, o trabalho de Lorentz (2019) avaliou a viabilidade econômica e ambiental do tratamento de efluentes da bovinocultura leiteira e produção de biofertilizante para aplicação em pastagem e concluiu que “fertilizante para o sistema solo/planta apresentou comportamento similar à adubação química”; “A análise de viabilidade econômica mostrou que a implantação de um sistema de tratamento de águas residuárias em uma propriedade produtora de leite é totalmente viável, em termos financeiros” (Lorentz, 2019, pg. 88).

3 METODOLOGIA

Para analisar a viabilidade ambiental do tratamento do POME e seu uso na produção biogás e de biofertilizante, são necessárias três etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais a serem utilizados (efluente + inóculo); a segunda constituiu-se do tratamento por meio de um sistema de digestão anaeróbia; e a terceira etapa consistiu em fazer a quantificação do biogás e a caracterização do biofertilizante gerado no sistema anterior. As etapas desta metodologia estão representadas na Figura 12.

Figura 12 - Esquema de etapas da metodologia



Fonte: Autor (2024)

3.1 ÁREA DE ESTUDO

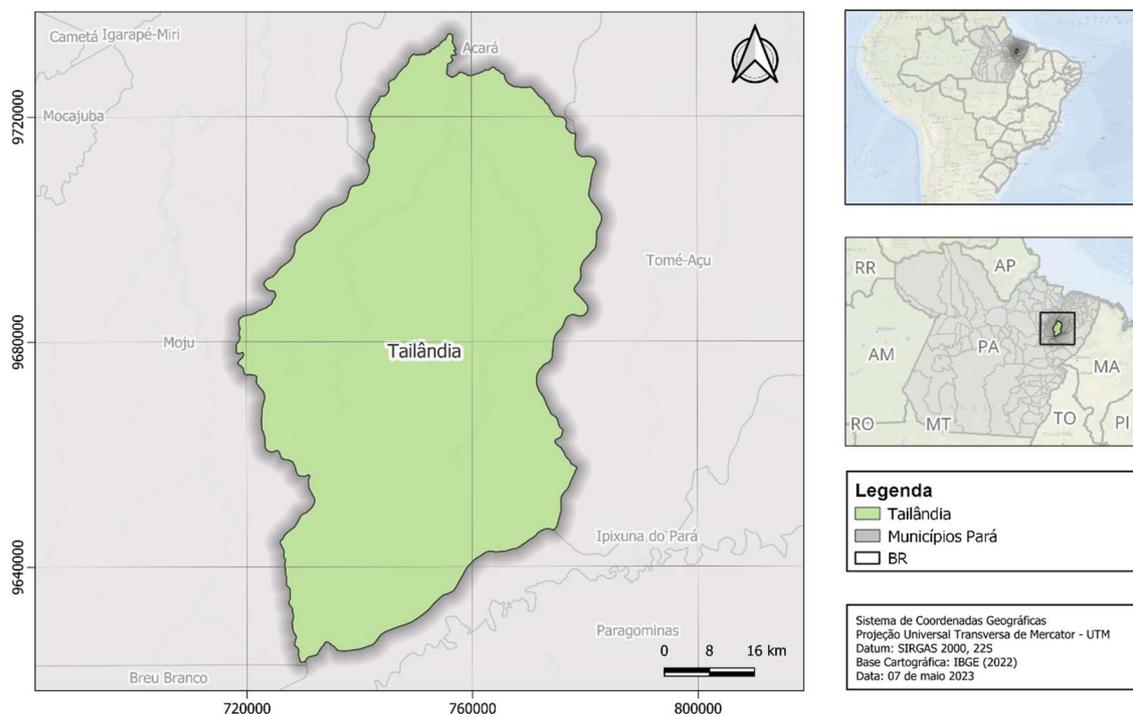
Para o estudo em questão, as coletas foram realizadas em uma fábrica que trabalha com o beneficiamento do dendê (nome não autorizado para divulgação), localizada no município de Tailândia – PA. A escolha da empresa deu-se devido esta ser uma empresa de grande porte, que apresenta etapas de produção comum à maioria das empresas que realizam o beneficiamento do dendê no Estado, produzindo resíduos e efluente em suas etapas, além da reutilização dos mesmos, além disso, pela proximidade da empresa com o município onde as amostras foram analisadas.

De acordo com as informações fornecidas através das entrevistas realizadas com trabalhadores da indústria durante a visita técnica, constatou-se que a empresa possui 41 mil

hectares de plantação do dendê, extraíndo aproximadamente 240 toneladas por dia do produto e fazendo o refino de até 300 toneladas diárias.

O município de Tailândia (Figura 13) está localizado na Região Norte, no Estado do Pará, pertencente à Mesorregião do Nordeste Paraense. Dispõe de uma população de 72.593 habitantes, área de aproximadamente 4.430 km² e densidade demográfica de 16,36 hab./km², segundo o censo do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 2022. De acordo com dados da Produção Agrícola Municipal do IBGE (2022), neste município encontra-se a maior produção de dendê do Estado, com 942.084 toneladas.

Figura 13 - Localização do Município de Tailândia – PA



Fonte: Autor (2024)

3.2 COLETA

A coleta deu-se tanto para amostras do efluente, quanto para o material inoculante. As amostras do efluente foram coletadas em uma das quatro piscinas de efluentes localizadas na fábrica (Figura 14). Cada piscina apresenta capacidade de 1300 toneladas de efluente, as quais são abastecidas diariamente, em virtude do beneficiamento contínuo de dendê realizado pela empresa. Devido as piscinas serem abastecidas diariamente com a mesma quantidade e estarem sob as mesmas condições e características, optou-se por coletar o efluente de apenas uma delas para esta pesquisa (Piscina 1).

Já para a amostra do inóculo, estas foram coletadas no pátio de estocagem da indústria, sendo o material conhecido como borra do dendê (Figura 15) (material sólido resultante do processo de beneficiamento do dendê, com alto teor de matéria orgânica).

Figura 14 - Piscina de efluente



Fonte: Autor (2024)

Figura 15 - Borra do dendê (material inoculante)



Fonte: Autor (2024)

3.2.1 Procedimento de coleta

O procedimento de coleta (Figura 16) das amostras de efluente e do material inoculante deu-se da seguinte forma: as amostras coletadas foram inseridas em bombonas plásticas de polietileno de cinco (05) litros, as quais já haviam sido higienizadas previamente, sendo

armazenadas à temperatura ambiente. Tal material utilizado para reserva das amostras tem por característica ser próprio para armazenagem de produtos químicos.

Nas coletas foram utilizados equipamentos de proteção individual (EPI), como luvas de látex, capacete, máscara PFF2 (S) e botas, cuja função além de proteção, é evitar que haja o contágio de compostos perigosos e/ou contaminantes que possam estar presentes nos materiais. As amostras de efluente coletadas foram identificadas como: Efluente Dendê - Piscina (Figura 17).

Após o procedimento de coleta, uma parte (1/3) das amostras foi enviada para o município de Marabá, para o laboratório particular da empresa Vet Plus, a qual iria realizar a análise dos parâmetros no efluente bruto. A outra parte foi reservada para início da parte experimental, o tratamento por meio da digestão anaeróbia.

Figura 16 - Procedimento de Coleta (Efluente – a) (Inóculo – b)



Fonte: Autor (2024)

Figura 17 - Identificação das amostras



Fonte: Autor (2024)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.3.1 Local da realização da parte experimental

Os ensaios realizados na pesquisa foram procedidos no Laboratório da empresa Vet Plus que possui certificação ISO 17025 (CRL 0974), localizado em Marabá e no Laboratório de Qualidade de Água da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, localizado na Universidade Federal do Pará – UFPA, campus Tucuruí.

3.3.2 Caracterização

Os critérios para a caracterização do efluente foram adaptados da metodologia de Inoue (2008) e do estudo de Tunes (2017) devido ao trabalho desses autores serem de características semelhantes ao presente estudo, através do qual os autores utilizam-se da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos para produzir e estudar a produção de biogás e biofertilizante.

Dessa forma, a caracterização foi realizada a partir de alguns métodos, que serão apresentados a seguir. Neste estudo, foram considerados parâmetros físico-químicos para caracterização do material, sendo estes, Potencial Hidrogeniônico (pH); Sólidos Totais, Fixos e Voláteis, Carbono Orgânico Total, Turbidez, Cor, DQO, DBO, Nitrogênio, Fósforo e Potássio.

Os parâmetros para caracterização no efluente bruto foram analisados no laboratório da empresa Vet Plus, de acordo com as seguintes metodologias descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Metodologias utilizadas para caracterização do efluente bruto

PARÂMETROS	MÉTODOS
pH	Método POP-FQ-30
Sólidos Totais, Fixos e Voláteis	SMWW 23ª Edição Método 2540 C
Carbono Orgânico Total	SMWW 23ª Edição Método 5310 C
Turbidez (NTU)	SMWW, 23ª Edição, Método 2130B
Cor	SMWW 23ª Edição Método 2120C
DBO	SMWW 23ª Edição Método 5210 B
DQO	SMWW 23ª Edição Método 5220 D
Nitrogênio	Método POP-FQ-11
Potássio	SMWW 23ª Edição Método 3120-B Método 3030 k
Fósforo	Método POP-FQ-41

Legenda: NTU – Unidade Nefolométrica de Turbidez; pH – Potencial Hidrogeniônico; DQO – Demanda Química de Oxigênio; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Fonte: Autor (2024)

Em decorrência da segunda etapa da presente pesquisa, o procedimento de caracterização através dos parâmetros físico-químicos mencionados no Quadro 1, será realizado tanto para as amostras in natura (bruto) quanto após o tratamento por meio da digestão anaeróbia.

3.4 ENSAIOS EM ESCALA DE BANCADA

3.4.1 Planejamento Experimental

Para a realização dos ensaios, foi feito o planejamento experimental fundamentado na metodologia adaptada de Ferreira Júnior *et al.*, (2020), pois, dentre os trabalhos recentes analisados, observou-se que, a mistura do efluente com o inóculo, pode promover melhores resultados que o uso somente do efluente, sendo, portanto, utilizada a mesma variação do volume de inóculo, definida na pesquisa destes, em 30%, 40% e 50%, conforme apresentado no Quadro 2.

A faixa de variação foi escolhida em virtude de poder se demonstrar que a maior eficiência se dá quando se relaciona o efluente com o inóculo, uma vez que ocorre maior redução de carga orgânica (Ferreira Júnior *et al.*, 2020; Rodrigues *et al.*, 2004). Para este estudo, definiu-se como volume total da mistura efluente + inóculo a quantidade de 1 litro e o mesmo foi realizado em duplicata.

Quadro 2 - Planejamento Experimental

TRATAMENTO	VOLUME (ml)	
	POME	SUBSTRATO OU INÓCULO
T01	1000	-
T02 (duplicata)	1000	-
T03	-	1000
T04 (duplicata)	-	1000
T05	700	300
T06 (duplicata)	700	300
T07	600	400
T08 (duplicata)	600	400
T09	500	500
T10 (duplicata)	500	500

Fonte: Autor (2024)

3.4.2 Sistema de Digestão Anaeróbia

3.4.2.1 Confeção dos biorreatores de bancada

Para o sistema de Digestão Anaeróbica, foram confeccionados 10 biorreatores de bancada, realizando-se uma adaptação da metodologia de estudo de Eckert *et al.* (2015). Tal estudo foi escolhido como referência devido aos autores confeccionarem um biodigestor de bancada, onde tem-se um planejamento experimental e condições aproximadas do que está sendo realizado nesta pesquisa.

Os materiais necessários à confecção do biorreator estão descritos no Quadro 03.

Quadro 3 - Materiais do biorreator

MATERIAL	QUANTIDADE	FUNÇÃO
Pote de vidro (3 litros)	10 unidades	Fermentador
Tubo de PVC (75 mm)	5 metros	Gasômetro
Cap PVC (75 mm)	20 unidades	Tampa das extremidades do gasômetro
Mangueira flexível de silicone (8 mm)	5 metros	Transporte de biogás
Selante de poliuretano	1 unidade	Fixação e selante das peças
Válvula de gás	10 unidades	Descarga de gás
Adaptador para válvula de gás	10 unidades	Fixação das válvulas
Anel de vedação 75 mm	20 unidades	Vedação dos tubos de PVC de 75 mm

Fonte: Autor (2024)

De posse desses materiais, dar-se-á início a confecção. Utilizando-se o fermentador (pote de vidro de 3 litros), acopla-se na tampa deste uma das pontas da mangueira de silicone flexível de 8 mm, a qual terá 50 cm de comprimento e volume de $500 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$, e a outra ponta deve ser acoplada na tampa superior (cap de PVC de 75 mm) do gasômetro (tudo de PVC de 75 mm), o qual terá 50 cm de comprimento e volume de 2200 cm^3 , para o transporte do biogás produzido. Ainda na tampa superior do gasômetro, acopla-se a válvula de gás, com o auxílio do adaptador, que servirá para descarga do gás acumulado. O biorreator produzido pode ser observado na Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 - Biorreator



Fonte: Autor (2024)

Figura 19 - Biorreatores em escala de bancada (10 unidades)



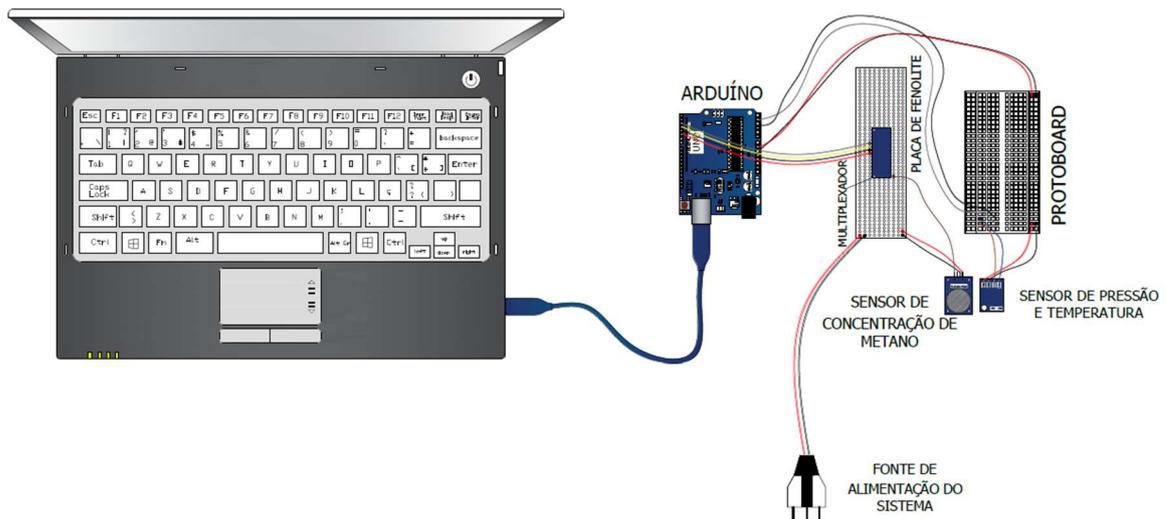
Fonte: Autor (2024)

3.4.2.2 Sistema de controle automático

Visando otimizar o processo de coleta das informações e enriquecer a presente pesquisa, melhorando tecnologicamente o equipamento construído, foi realizado um sistema de controle automático, conforme protótipo apresentado na Figura 20 (que demonstra a conexão dos

sensores de um único biorreator, sendo aplicado na prática para os 10 biorreatores), através da utilização de sensores adaptados ao sistema do biorreator (Figura 21), para quantificar as medidas de pressão (Pa), temperatura (°C) e concentração de metano (PPM). Os materiais necessários para o sistema de controle estão descritos no Quadro 04.

Figura 20 - Protótipo do sistema de controle automático



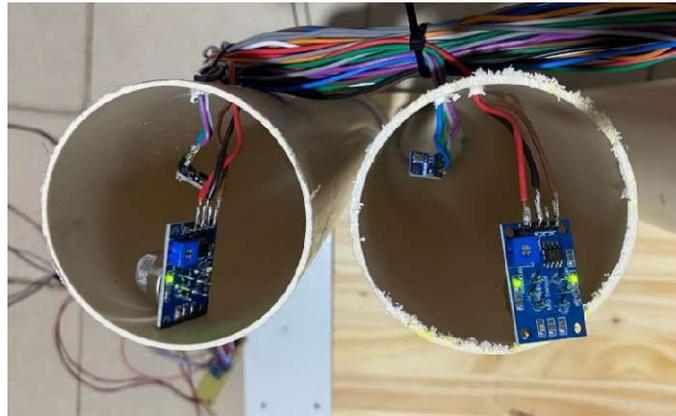
Fonte: Autor (2024)

Figura 21 – Sensores (A – Sensor de Concentração de Metano) (B – Sensor de Pressão e Temperatura) (C – Sensores alocados no gasômetro)



(a)

(b)



(c)

Fonte: Autor (2024)

Quadro 4 - Materiais do sistema de controle automático

ITEM	QUANTIDADE	FUNÇÃO
Placa Fenolite Ilhada 2,8x12,9 Cm Pcb Perfurada Padrao	1 UNIDADE	Base para montagem do circuito eletrônico do biodigestor
Multiplexador 16 canais CD74HC4067	1 UNIDADE	Extensão de portas analógicas para o circuito eletrônico do biorreator
10 PEÇAS Barra De Pinos 1x40x11,2 180 Graus 2.54 Mm	1 UNIDADE	Estabelecer a conexão entre os componentes do circuito eletrônico do biorreator
CABO WIRE JUMPER 20CM 40 FIOS MACHOMACHO	2 UNIDADES	Estabelecer a conexão entre os componentes do circuito eletrônico do biorreator
MODULO SENSOR DE GAS MQ-4 METANO	10 UNIDADES	Medir a concentração de metano produzida no gasômetro
Fio Cabinho Flexivel Cobre 0,30mm Com 10 M De 10 Cores 100m	1 UNIDADE	Fazer a ligação entre o circuito eletrônico e os sensores do biorreator
Bmp180 Sensor Pressao E Temperatura Arduino Gy-68	10 UNIDADES	Medir a pressão e temperatura gerada nos biorreatores
Placa Compativel Com Arduino Uno R3 Atmega328 Smd	1 UNIDADE	Microcontrolador utilizado para processamento dos sinais elétricos dos sensores
Protoboard	1 UNIDADE	Confecção de protótipo de circuitos elétricos

Fonte: Autor (2024)

Realizando-se a confecção, o sistema automático funciona da seguinte forma: cada sensor de pressão e temperatura (Figura 21 – b) instalado nos biorreatores (Figura 21 – c) foi conectado eletricamente ao protoboard, que se conectava também ao Arduino; os sensores de concentração de metano (Figura 21 – a) instalados nos biorreatores (Figura 21 – c) foram conectados eletricamente à placa de fenolite que continha um multiplexador acoplado, que também se conectava ao Arduino. Para que as informações dos sensores pudessem ser

coletadas, conectava-se o Arduino ao computador e compilava-se cada código no Arduino IDE – 2.2.1 (Figura 20).

Para que os sensores fossem utilizados e pudessem apresentar os valores medidos, foram criados dois códigos em linguagem de programação *C with Classes* (c++) para programação da placa Arduino Uno R3 (ANEXOS I e II), sendo um para o sensor de pressão e temperatura e outro para o sensor de concentração de metano.

A validação do sistema para os sensores de pressão e temperatura se deram através da utilização de termômetro digital infravermelho e de manômetro acoplado ao adaptador para válvula de gás. Para o sensor de concentração de metano, a validação não foi realizada, no entanto, poderia ter sido feita acoplando-se uma mangueira com água com uma altura conhecida, na lateral do gasômetro, para identificar a diferença de volume adquirido ao longo dos dias. Tal forma de validação fica como sugestão para trabalhos futuros.

3.4.2.3 Digestão anaeróbia

Para realização do tratamento por meio do sistema de digestão anaeróbia, foram utilizados 10 biorreatores de bancada (Figuras 22), operando em batelada, por um total de 15 dias. Os biodigestores de capacidade de 3 litros, foram abastecidos com 1 litro da mistura efluente + inóculo (Figura 23). Como resíduos resultantes do sistema de digestão anaeróbia, tem-se o biogás e biofertilizante, ambos de valor econômico e ambiental para o processo.

Figura 22 - Biorreator em funcionamento



Fonte: Autor (2024)

Figura 23 - Fermentadores com os tratamentos indicados no quadro 02



Fonte: Autor (2024)

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TRATADO E BIOFERTILIZANTE

Após o processo de digestão anaeróbia, gera-se um resíduo, denominado como biofertilizante, o qual, dependendo de sua qualidade e características, pode ser utilizado como fertilizante agrícola. Para avaliar se o biofertilizante produzido apresenta características essenciais para ser utilizado em alguma cultura, foi realizada a caracterização dele, através dos parâmetros físico-químicos apresentados abaixo.

Conforme apresentado anteriormente, a caracterização deste foi realizada a partir da adaptação da metodologia de estudo de Inoue (2008). Para esta segunda análise, além dos parâmetros já mencionados no Quadro 1 do item 3.4, adicionalmente foi também avaliada a condutividade elétrica, apresentada no Quadro 5, com a indicação dos respectivos laboratórios e metodologias.

Quadro 5 - Indicação de laboratórios e metodologias utilizadas para caracterização do efluente tratado

PARÂMETROS	MÉTODOS	LABORATÓRIO
pH	Método eletrométrico – SMWW 4500 B (APHA <i>et al.</i> , 2005).	UFPA – TUCURUÍ
Sólidos Totais, Fixos e Voláteis	Método gravimétrico (APHA <i>et al.</i> , 2005)	UFPA – TUCURUÍ
Carbono Orgânico Total	Método da divisão do valor dos sólidos voláteis pelo fator de Waskman (Kiehl, 1985)	UFPA – TUCURUÍ
Turbidez (NTU)	Método Nefelométrico – SEWW 2130 B	UFPA – TUCURUÍ

Cor	Color, True and Apparent Method 8025	UFPA – TUCURUÍ
DBO	SMWW 23ª Edição Método 5210 B	VET PLUS – MARABÁ
DQO	SMWW 23ª Edição Método 5220 D	VET PLUS – MARABÁ
Nitrogênio	Método POP-FQ-11	VET PLUS – MARABÁ
Potássio	SMWW 23ª Edição Método 3120-B Método 3030 k	VET PLUS – MARABÁ
Fósforo	Método POP-FQ-41	VET PLUS – MARABÁ
Condutividade Elétrica	Método utilizando um condutivímetro digital de bancada (APHA <i>et al.</i> , 2005).	UFPA – TUCURUÍ

Legenda: NTU – Unidade Nefolométrica de Turbidez; pH – Potencial Hidrogeniônico; DQO – Demanda Química de Oxigênio; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Fonte: Autor (2024)

3.5.1 Instrumentos e Procedimentos experimentais

3.5.1.1 – Preparo das amostras

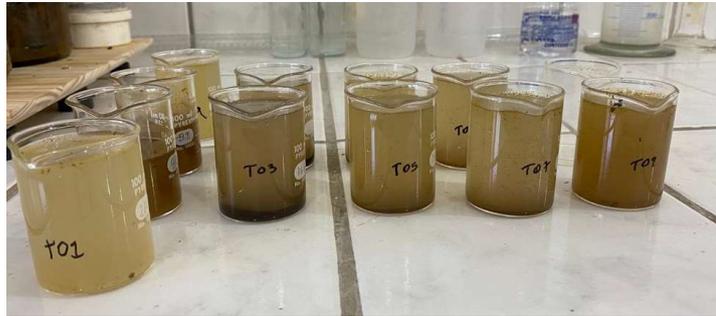
Para a caracterização dos parâmetros realizada no laboratório da UFPA, foi necessário preparar as amostras através da diluição dos resíduos resultantes do tratamento por meio do sistema de digestão anaeróbia, haja vista que devido terem sido inoculados, estavam parcialmente sólidos. Para a diluição, utilizou-se o fator de escala de 1:100, onde pesou-se e utilizou-se 1 (uma) grama de efluente (Figura 24) para cada 100 ml de água deionizada. As amostras diluídas estão apresentadas na Figura 25.

Figura 24 – Béquer contendo 1 g de cada amostra



Fonte: Autor (2024)

Figura 25 - Amostras diluídas



Fonte: Autor (2024)

Após esse procedimento, as amostras foram colocadas no agitador magnético (Modelo: SL-91/A-H da SOLAR CIENTÍFICA) (Figura 26) para que houvesse a diluição completa do material. Tendo as amostras preparadas, iniciou-se a caracterização dos parâmetros.

Figura 26 - Amostra no agitador magnético



Fonte: Autor (2024)

3.5.1.2 – Análise do pH

Para o pH, utilizou-se o phmetro digital (Modelo: K39-0014PA da KASVI), onde o mesmo era inserido (após calibração) em um béquer contendo a amostra do efluente tratado, conforme Figura 27.

Figura 27 - Caracterização do pH



Fonte: Autor (2024)

3.5.1.3 – Análise da turbidez

Para a turbidez, utilizou-se um turbidímetro digital (Modelo: AP2000 da PoliControl), onde inicialmente aferiu-se a amostra “branca” e posteriormente aferiu-se as amostras dos efluentes, conforme Figura 28.

Figura 28 - Caracterização da turbidez



Fonte: Autor (2024)

3.5.1.3 – Análise da condutividade elétrica

Para a condutividade elétrica, utilizou-se um condutivímetro (Modelo: SP 1410 da Sppencer Scientific), onde os eletrodos do equipamento foram inseridos no béquer contendo a amostra para aferição, conforme Figura 29.

Figura 29 - Caracterização da condutividade elétrica



Fonte: Autor (2024)

3.5.1.4 – Análise da cor

Para a cor (absorbância), primeiramente realizou-se a correção do pH das amostras (Figura 30), haja vista que os mesmos estavam numa faixa entre 6 e 7 e para a análise do parâmetro era desejável estar entre 7,3 e 7,6. Posteriormente, como forma de melhorar a leitura no espectrofotômetro, optou-se por filtrar as amostras (Figura 31) para redução da turbidez e em seguida fez-se a leitura no equipamento espectrofotômetro nos comprimentos de onda de absorbância 385 e 470.

Figura 30 - Correção do pH



Fonte: Autor (2024)

Figura 31 - Filtragem das amostras

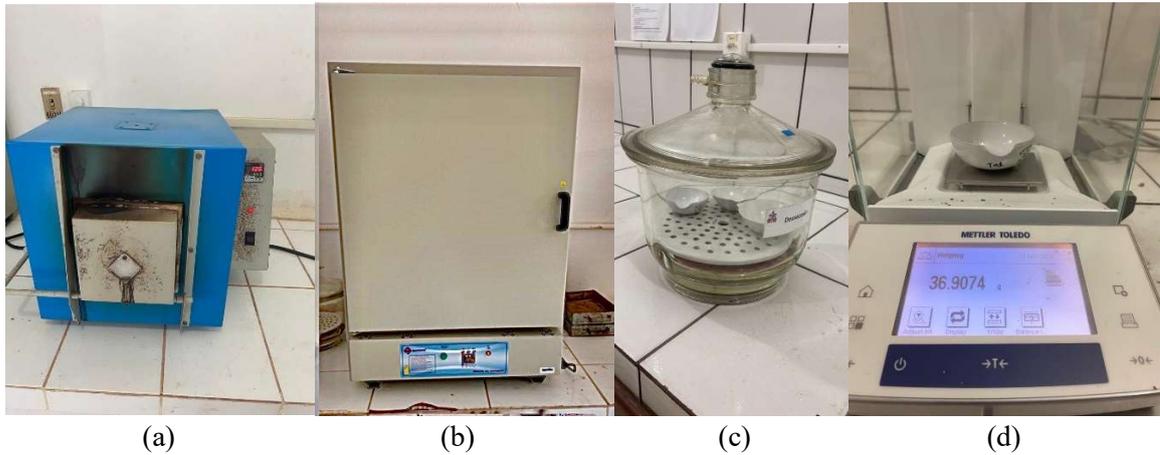


Fonte: Autor (2024)

3.5.1.5 – Análise de sólidos totais, fixos e voláteis

Por fim, concluiu-se fazendo as análises de sólidos totais, fixos e voláteis e de carbono orgânico total. Para sólidos inicialmente as cápsulas foram preparadas sendo colocadas no forno mufla (Modelo: SP 1200 da SP Labor) a 550° C por 1 (uma) hora (Figura 32 - a), seguido da Estufa (Modelo: Estufa Microprocessada De Secagem 200° (1 Porta) 421 (110v) Q317M-22 da Quimis) a 105° C por 45 minutos (Figura 32 - b) e posteriormente no dessecador até que estivessem resfriadas (Figura 32 - c), após esse procedimento, estas foram pesadas (Figura 32 - d) e anotou-se o valor p0 de cada.

Figura 32 - Preparo das cápsulas (a – Mufla; b – Estufa; c – Dessecador; d – Balança)



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, as alíquotas das amostras foram transferidas para as cápsulas que seriam utilizadas e estas foram mantidas em banho maria (Figura 33) no equipamento (Modelo: NI 1235 – Banho-Maria Digital 12L, da Nova Instruments) até atingir secura completa. Após esse processo, as mesmas foram para estufa a 105° C por 45 minutos, seguido de dessecador até o resfriamento (Figura 34) e pesagem para obter-se o valor p_1 de cada amostra (Figura 35). Abaixo apresenta-se a equação utilizada para obtenção do valor de sólidos totais (ST) (Eq. 01).

$$ST \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{((p_1 - p_0) * 1.000.000)}{v.amostra (ml)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: p_0 – Peso inicial das cápsulas após preparo

p_1 – Peso das cápsulas com amostra após banho maria

$v. amostra$ – Volume da amostra utilizada

Figura 33 – Cápsulas em banho maria



Fonte: Autor (2024)

Figura 34 – Cápsulas com amostras no dessecador



Fonte: Autor (2024)

Figura 35 - Pesagem das cápsulas com amostra



Fonte: Autor (2024)

Por último, as cápsulas passaram novamente para a mufla (Figura 36) a 550° C por 1 (uma) hora, seguida de estufa a 105° C por 30 minutos, dessecador até o resfriamento e pesagem para obter-se o valor p_2 de cada amostra. Apresenta-se abaixo as equações para obtenção do valor de sólidos totais fixos (STF) (Eq. 02) e sólidos totais voláteis (STV) (Eq. 03).

$$STF \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{((p_2 - p_0) * 1.000.000)}{v.amostra (ml)} \quad (\text{Equação 2})$$

$$STV \left(\frac{mg}{l} \right) = ST - STF \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: p_0 – Peso inicial das cápsulas após preparo

p_2 – Peso das cápsulas com amostra após mufla

$v. amostra$ – Volume da amostra utilizada

Figura 36 - Cápsulas com amostras na mufla



Fonte: Autor (2024)

Para obtenção do carbono orgânico total, calcula-se a divisão do valor de STV por 1,724 (fator de Waskman), conforme apresentado abaixo (Eq. 04).

$$COT = \frac{STV}{1,724} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: *STV* – Sólidos totais voláteis

3.6 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados foram analisados de forma descritiva e tratados por métodos estatísticos utilizando o software MS Office Excel 2023.

Para a análise da viabilidade do tratamento dos resíduos, os resultados foram apresentados através dos dados brutos, representados em gráficos e tabelas, bem como foi utilizado o cálculo dos percentuais para demonstrar a porcentagem de remoção ou aumento dos parâmetros das amostras.

Para a análise das características físico-químicas e viabilidade de produção de biofertilizante, os resultados também foram apresentados através de gráficos e tabelas, e por meio dos percentuais de remoção ou aumento dos parâmetros das amostras, assim como foram realizados os cálculos da razão dos parâmetros de DQO/DBO para determinação do tipo de oxidação efetiva e STV/ST para determinar a taxa de mineralização do sistema.

Para a análise da viabilidade de produção de biogás, os resultados foram demonstrados através de gráficos e pelo cálculo do volume em função da concentração de metano, para determinar qual o volume de biogás foi produzido em cada biorreator.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VIABILIDADE DO TRATAMENTO DO POME, MATERIAL INOCULANTE E COMBINAÇÃO DOS RESÍDUOS, POR MEIO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Para os tratamentos apresentados abaixo, avalia-se isoladamente o POME (T01 e T02) e o material inoculante (T03 e T04), e para os demais tratamentos avalia-se a combinação dos resíduos em diferentes concentrações. Dessa forma, apresenta-se a seguir as tabelas 7, 8 e 9 contendo os resultados da análise laboratorial do efluente bruto, da borra do dendê e das amostras do composto tratado, respectivamente.

Tabela 7 - Análise laboratorial do efluente bruto

PARÂMETROS	VALOR	UND
pH	6,70	-
Cor	1624,00	uC
Turbidez	27900,00	NTU
COT	34180,00	mg/l
Sólidos totais	474,00	mg/l
Sólidos fixos	413,00	mg/l
Sólidos voláteis	61,00	mg/l
Nitrogênio	0,80	mg/l
Fósforo	<0,04	mg/l
Potássio	2,00	mg/l
DQO	1190,00	mg/l
DBO	1631,20	mg/l

Legenda: uC - Unidades de cor; NTU – Unidade Nefolométrica de Turbidez; mg/l – miligrama por litro; pH – Potencial Hidrogeniônico; COT – Carbono Orgânico Total; DQO – Demanda Química de Oxigênio; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Fonte: Autor (2024)

Tabela 8 - Análise laboratorial da borra do dendê

PARÂMETROS	VALOR	UND
pH	4,08	-
Cor	35/ 30*	-
Turbidez	22200,00	NTU
COT	42280,00	mg/kg
Sólidos totais	110250,00	mg/kg
Sólidos fixos	22671,00	mg/kg
Sólidos voláteis	108451,00	mg/kg
Nitrogênio	18,00	mg/kg
Fósforo	5,00	mg/kg
Potássio	7,00	mg/kg
DQO	2720,00	mg/kg

DBO	1800,00	mg/kg
-----	---------	-------

Legenda: uC - Unidades de cor; NTU – Unidade Nefolométrica de Turbidez; mg/kg – miligrama por quilograma; pH – Potencial Hidrogeniônico; COT – Carbono Orgânico Total; DQO – Demanda Química de Oxigênio; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; * - Valores correspondentes a análise de absorvância com os comprimentos de onda 385/470.

Fonte: Autor (2024)

As tabelas acima demonstram que os resíduos em sua forma bruta, de modo geral, apresentavam elevadas concentrações de matéria orgânica e níveis de turbidez e cor altas, o que pode ser considerado normal, levando em consideração a oleaginosa utilizada para o beneficiamento e suas características de cor (vermelho-laranja intenso, devido ao elevado teor de carotenoides (500-700 mg kg⁻¹)) (Miranda 2023), oleosidade que promove característica viscosa ao resíduo, teor de sólidos suspensos em função da presença de fibras, entre outros fatores (Mohammad *et al.*, 2021).

Tabela 9 - Análise laboratorial das amostras do composto tratado

PARÂMETROS	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	UND
pH	4,80	4,80	7,80	7,30	5,80	5,20	6,10	6,60	5,30	6,20	-
Cor	19,9/13,8*	26,4/20,3*	35/26,4*	33,5/24,4*	23,8/17,2*	24,6/17,3*	20,1/14,1*	21,4/15,3*	21,4/15,2*	21,5/15,5*	-
Turbidez	25400,00	22200,00	18100,00	16300,00	11400,00	23500,00	23500,00	17300,00	19400,00	28000,00	UNT
COT	47447,80	38283,06	53712,30	28886,31	19605,57	27378,19	38747,10	36194,90	27146,17	46519,72	mg/kg
Sólidos totais	102400,00	81000,00	108200,00	74200,00	56000,00	60800,00	81400,00	73400,00	61800,00	95600,00	mg/kg
Sólidos fixos	20600,00	15000,00	15600,00	24400,00	22200,00	13600,00	14600,00	11000,00	15000,00	15400,00	mg/kg
Sólidos voláteis	81800,00	66000,00	92600,00	49800,00	33800,00	47200,00	66800,00	62400,00	46800,00	80200,00	mg/kg
Nitrogênio	40,86	16,14	19,26	14,57	50,23	66,37	112,7	37,48	19,26	61,42	mg/kg
Fósforo	931,80	552,70	631,90	527,00	527,00	1176,00	671,55	437,00	584,80	604,10	mg/kg
Potássio	8817,00	9249,00	2835,00	2330,00	5237,00	4517,00	2859,00	3003,00	2306,00	3195,00	mg/kg
DQO	723,00	2226,00	860,00	2003,00	1700,00	2300,00	2100,00	2134,00	2420,00	2520,00	mg/kg
DBO	241,00	742,00	216,00	570,00	375,00	670,00	700,00	810,00	660,00	744,00	mg/kg
Condutividade Elétrica	23,51	24,25	26,05	24,51	23,13	23,36	21,36	21,51	21,53	23,20	mS/cm

Legenda: uC - Unidades de cor; NTU – Unidade Nefolométrica de Turbidez; mg/kg – miligrama por quilograma; mS/cm – milisiems por centímetro; pH – Potencial Hidrogeniônico; COT – Carbono Orgânico Total; DQO – Demanda Química de Oxigênio; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; * - Valores correspondentes a análise de absorvância com os comprimentos de onda 385/470; Em negrito azul destaca-se os melhores resultados dentre as amostras de cada parâmetro, e em negrito vermelho, os piores resultados.

Fonte: Autor (2024)

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9 pode-se observar que os valores destacados em azul correspondem aos melhores resultados individuais de cada parâmetro, tendo como referência as 10 amostras tratadas (5 amostras e suas duplicatas). Nela, nota-se que os parâmetros cor e DQO tiveram as melhores taxas de redução em T01; DBO em T03; turbidez, COT, ST e STV em T05; STF em T08; fósforo obteve as melhores taxas de crescimento em T06; potássio em T02; e nitrogênio em T07.

No que diz respeito aos valores destacados em vermelho, tem-se aqueles com piores resultados individuais de cada parâmetro, tendo também como referência as 10 amostras tratadas (5 amostras e suas duplicatas). Onde nota-se que os parâmetros cor, COT, ST e STV tiveram as menores taxas de redução em T03; STF em T04; DBO em T08; turbidez e DQO em T10; nitrogênio obteve menor taxas de crescimento em T04; fósforo em T08; e potássio em T09.

Levando em consideração os resultados apresentados na Tabela 9 e fazendo uma análise com relação a concentração das misturas (efluente + inóculo), observando os melhores e piores resultados individuais, pode-se inferir que T05 é indicado como o melhor tratamento e T03 como o pior tratamento, sendo suas concentrações 700 ml de POME/ 300 ml de inóculo e 1000 ml de inóculo, respectivamente. Essa concentração com 30% de inóculo também foi indicada como melhor resultado no trabalho de Ferreira Júnior *et al.* (2020), onde o autor utilizou condições e características semelhantes ao desta dissertação para avaliar o tratamento do POME, sendo 10 biorreatores, 10 dias de tratamento, temperatura entre 30 a 35°C e volumes de 30, 40 e 50 % de inóculo.

4.1.1 Análise das características físico – químicas e viabilidade da utilização do POME na produção de biofertilizante.

4.1.1.1 pH

O pH inicial das amostras de efluente bruto e inóculo encontravam-se próximo a neutralidade para o primeiro, e ácido para o segundo. Levando em consideração que as 10 amostras eram um composto formado por efluente + inóculo (com exceção das quatro primeiras), o processo inicialmente se encontrava na faixa de 5,2 a 6,3 considerado, para esses casos, uma taxa adequada para o desenvolvimento das bactérias hidrolíticas e acidogênicas (Matias, 2022).

Entretanto, com base nos resultados pós-tratamento, e levando-se em consideração as últimas fases da digestão anaeróbia, processo em que ocorre a presença das bactérias acetogênicas e metanogênicas, é necessário um pH estritamente neutro, na faixa de 6,5 e 8

(Matias, 2022; Poblete, 2019), o que, como pode ser observado, ocorreu apenas para os tratamentos T03, T04 e T08.

Diante disso, pode-se entender que durante o processo de digestão anaeróbia houve um decréscimo na taxa de pH de algumas amostras, que prejudicaram o desenvolvimento das bactérias apontadas acima, como o T01, T02, o que pode ser considerado um prejuízo econômico para o sistema, pois esse decréscimo pode estar relacionado ao acúmulo de ácidos graxos voláteis e condições desfavoráveis no sistema, causando consumo da alcalinidade, queda do pH no sistema e conseqüentemente baixa produção de biogás e biofertilizante (Poblete, 2019).

4.1.1.2 Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK)

Com relação aos nutrientes, entende-se que o bom desempenho do processo de tratamento está associado a presença de alguns deles, como o nitrogênio e o fósforo, haja vista que as bactérias necessitam deles para o processo de digestão anaeróbia (Matias, 2022). Pode-se observar com base nos resultados, que os elevados níveis desses nutrientes foram adquiridos através da presença de bactérias, que em sua maioria se desenvolveram devido a inoculação do sistema (Dias, Rocha; Matos, 2024), uma vez que a taxa de nutrientes contida no efluente bruto e no inóculo isoladamente eram baixas, como pode ser observado nos gráficos 6, 7 e 8.

Outro fator que pode ser observado com relação ao aumento da taxa dos nutrientes é que, devido aos valores encontrados, pode-se considerar que o resíduo é um excelente biofertilizante, uma vez que os mesmos nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) são essenciais para o crescimento das plantas, e promovem melhoras nas qualidades físicas, químicas e biológicas no solo em que for aplicado, visto que eles atuam em inúmeros processos relacionados ao metabolismo das plantas (Siqueira *et al.*, 2019). No entanto, é válido observar que devem ser estudadas as melhores taxas de aplicação desse resíduo no solo, através do entendimento da composição química e da dosagem de nutriente ideal para cada tipo de cultura.

É importante destacar que os níveis de potássio apresentados nos tratamentos T01, T02, T03 e T04 aumentaram consideravelmente após o período de 15 dias de tratamento por meio do sistema de digestão anaeróbia. A hipótese a ser considerada em função do teor elevado de potássio pode estar vinculada à presença de bactérias solubilizadoras de potássio, como bactérias *pseudomonas*, *bacillus mucilaginosus*, *Bacillus edaphicus*, entre outras, as quais possuem capacidade de liberar potássio no meio. No entanto, em função da não caracterização biológica do efluente, não se pode afirmar com certeza essa hipótese, restando a pesquisa para trabalhos futuros.

4.1.1.3 Sólidos totais, Sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis

Os teores de sólidos voláteis, encontrados no tratamento, são representados pela concentração de carga orgânica e conseqüentemente representam um aumento no rendimento do biogás (Poblete, 2019), fator este considerado, portanto, importante para a produção do biogás e biofertilizante. Tais teores, como notado, reduziram em quase todos os tratamentos, visto que o composto é formado pela mistura do efluente + inóculo, com exceção da amostra e duplicata do POME individualmente (T01 e T02) e do inóculo (T03 e T04).

Dessa forma, considera-se que houve um aumento no rendimento do biogás, uma vez que, os microrganismos convertem o substrato em biogás a partir do consumo da fração orgânica do teor de sólidos voláteis (De Lima *et al.*, 2020; Meyer, Ribeiro; Pombo, 2017).

Quando se relaciona STV/ST para o inóculo e o efluente agroindustrial isoladamente, nota-se que o percentual encontrado indica, para o efluente (T01 e T02), alta taxa de mineralização e conseqüentemente pouca quantidade de microrganismos, pois a taxa de degradação orgânica diminui. Já para o inóculo (T03 e T04), indica baixa taxa de mineralização e conseqüentemente alta taxa de microrganismos. No entanto, após o tratamento das 10 amostras, a relação STV/ST encontrada é maior que 50%, indicando elevado potencial para utilização, uma vez que apresenta baixa taxa de mineralização e elevada quantidade de microrganismos (Rodrigues, Blasius; Castro, 2020).

Por fim, com relação ao teor de sólidos totais fixos, observa-se que também houve redução, com exceção da amostra e duplicata do POME individualmente (T01 e T02) e da amostra T04. Destaca-se para este parâmetro, que a sua redução pode estar atribuída a deposição e sedimentação no fundo do biodigestor (Meyer, Ribeiro; Pombo, 2017).

4.1.1.4 Condutividade elétrica

Com relação a condutividade elétrica, nota-se que os valores obtidos são relativamente altos, o que pode ser justificado em função do grau de toxicidade do efluente (Lombardi e Furley, 2015; Lopez, 2013; Maia *et al.*, 2022) sendo necessário estudar os níveis e realizar o tratamento biológico para reduzir os teores. Todavia, cada cultura permite limites máximos de condutividade, sendo necessário, portanto, estudar as culturas que permitem essa taxa de CE para que o material possa ser utilizado sem causar prejuízos à cultura e ao solo.

Deve-se ter cuidado com o biofertilizante, pois os altos teores de condutividade elétrica indicam altos teores de sais, provocando a salinização do solo e conseqüentemente a baixa absorção de água pelas plantas. Vale destacar que a condutividade é o único parâmetro que foi

analisado apenas para o resíduo já tratado, pois é um dos parâmetros que permite avaliar o biofertilizante.

4.1.1.5 Cor e Turbidez

No que diz respeito a cor, em virtude da análise laboratorial para o efluente bruto ter sido feita por metodologia diferente, em que não há possibilidade de conversão da unidade do parâmetro, em função de uma ter sido feita para cor verdadeira e aparente e a outra ter sido feita para comprimento de onda, o parâmetro será analisado apenas para o inóculo e as amostras de T03 a T10.

Considerando que as amostras T03 e T04 são o próprio inóculo tratado e as demais (T05 a T10) são amostras que foram inoculadas, pode-se analisar a cor em função da inóculo bruto. Com base nisso, observa-se que para todas as amostras mencionadas, houve remoção de cor, chegando a máxima redução de 43% e a mínima redução de 4% para o comprimento de onda 385 e máxima de 54% e mínima de 12% para o comprimento de onda 470.

Como pode ser observado, o parâmetro turbidez apresentou reduções da taxa em função do tratamento, no entanto, nota-se que devido a oleaginosa (dendê) ser um material de característica fibrosa e oleosa e, levando em consideração que o efluente foi inoculado com a borra do dendê, a redução foi relativamente pequena, chegando em 59% para a amostra T05 (máxima redução) e 9% para a amostra T01 (mínima redução).

4.1.1.6 DQO e DBO

De acordo com Rodrigues, Blasius; Castro (2020), a eficiência do processo de tratamento se apresenta a partir da redução dos teores de DQO e DBO, haja vista que o processo da biodigestão trata o efluente através da redução da matéria orgânica pela ação microbológica anaeróbia, transformando a carga orgânica contida no efluente em biofertilizante.

Quando se faz a razão entre os parâmetros, DQO/DBO é possível indicar qual tipo de oxidação será mais efetiva para degradar a matéria orgânica do efluente. Observando os valores encontrados e fazendo o cálculo da razão, tem-se que: o efluente bruto e o inóculo se encontram na faixa de valor $< 2,5$, caracterizando um efluente facilmente degradável. Já os demais tratamentos (T01 a T10) se encontram na faixa de entre 2,5 e 5, tendo maior exigência para remoção eficiente de carga orgânica via processos biológicos (Meyer, Ribeiro; Pombo, 2017).

Analisando os gráficos e com base na afirmação e nos resultados encontrados, nota-se que em todos os tratamentos houve redução de ambas as taxas, com exceção da duplicata do

efluente (T02), podendo-se considerar um excelente material para uso como biogás e biofertilizante em virtude da redução da carga orgânica.

4.1.1.7 Carbono Orgânico Total

O COT é um parâmetro que indica indiretamente a remoção de “microcontaminantes orgânicos, substâncias húmicas, agrotóxicos, hormônios, fármacos, microalgas e cianobactérias, cianotoxinas, vírus, bactérias, protozoários, subprodutos orgânicos halogenados” (Dantas *et al.*, 2018), os quais são prejudiciais a saúde humana.

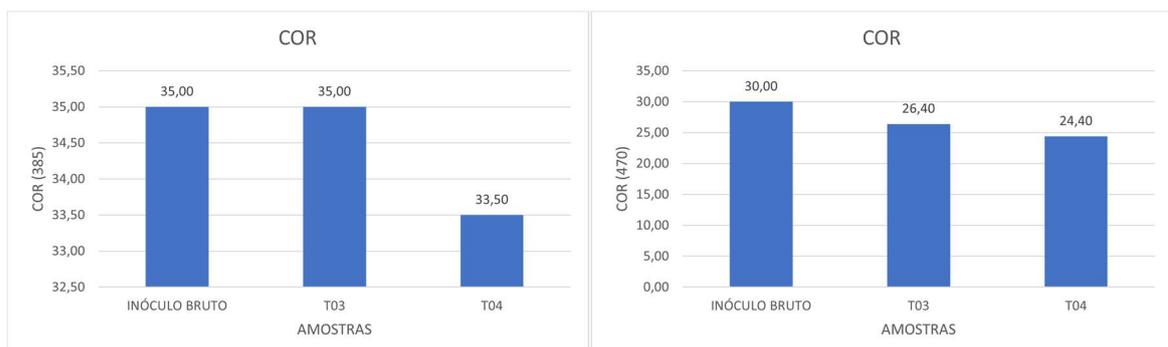
No gráfico acima é possível observar que o parâmetro apresentou taxa de remoção eficiente apenas para as amostras T04 a T10, no entanto, observa-se que ainda se encontram em faixas relativamente elevadas. Tal fato pode estar relacionado devido ser um efluente agroindustrial, onde pode ocorrer, na maioria dos casos, a presença dos compostos apresentados acima.

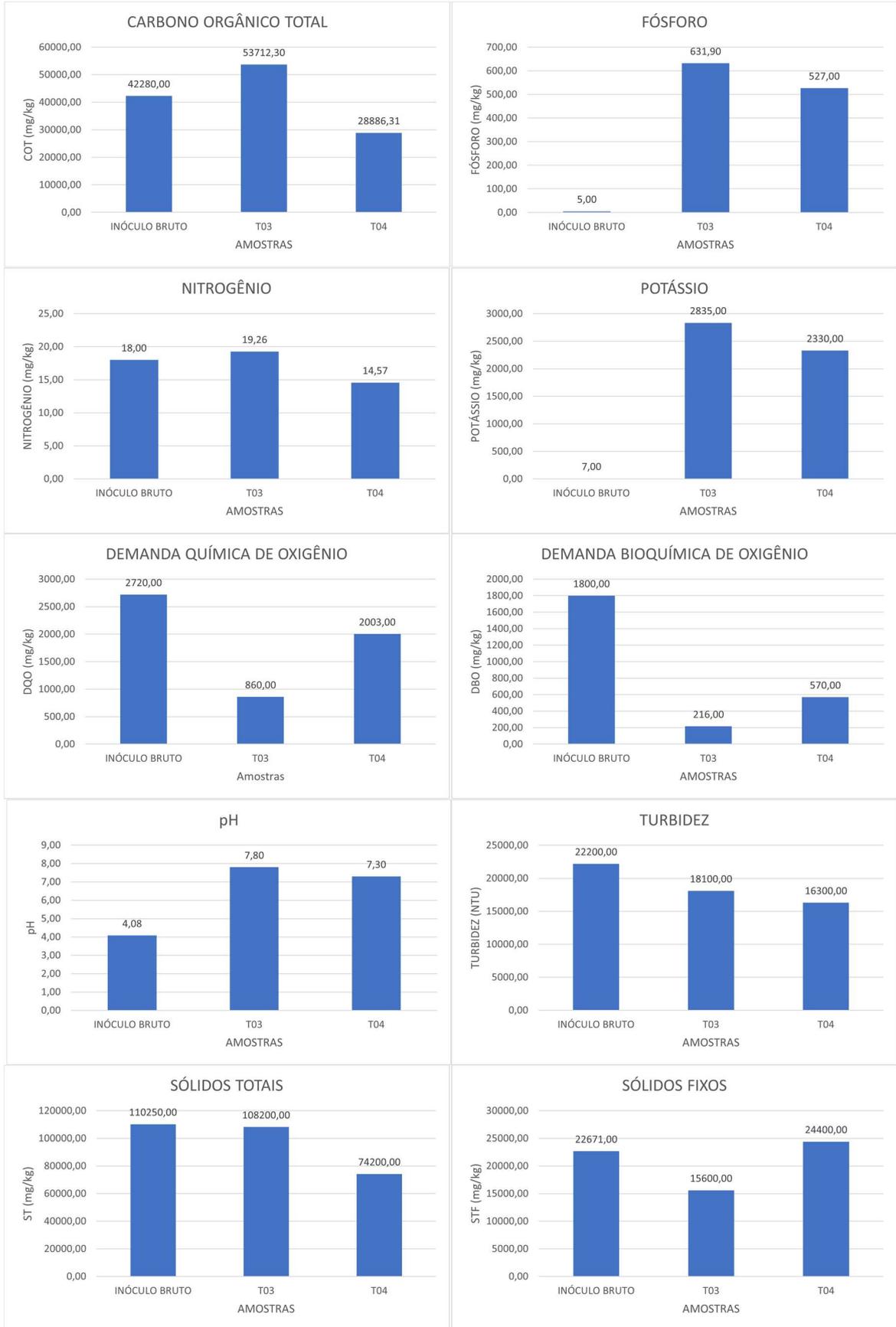
No geral, com base na análise individual de cada um dos parâmetros, nas informações acima apresentadas e na observação dos resultados, pode-se afirmar que o material tratado pode ser viável no uso como biofertilizante, em função das características necessárias a esse tipo de produto. Podendo ser considerado um ponto de partida para a realização de outras pesquisas relacionadas à inoculação e a eficiência do biofertilizante nas culturas, através da análise da melhor dosagem do produto, em função da cultura e das características do solo em que este será adicionado, para a promoção da eficiência de produção.

4.1.2 Análise individual do POME e inóculo

Quando se analisa isoladamente o tratamento dos resíduos POME e inóculo (borra do dendê), observa-se que o efluente do dendê não apresenta eficiência de tratamento para todos os parâmetros, contudo, o inóculo, apresenta melhores resultados, conforme apresentado nas Figuras 37 e 38.

Figura 37 - Gráficos comparativos dos parâmetros do inóculo bruto e tratado (T03 e T04)





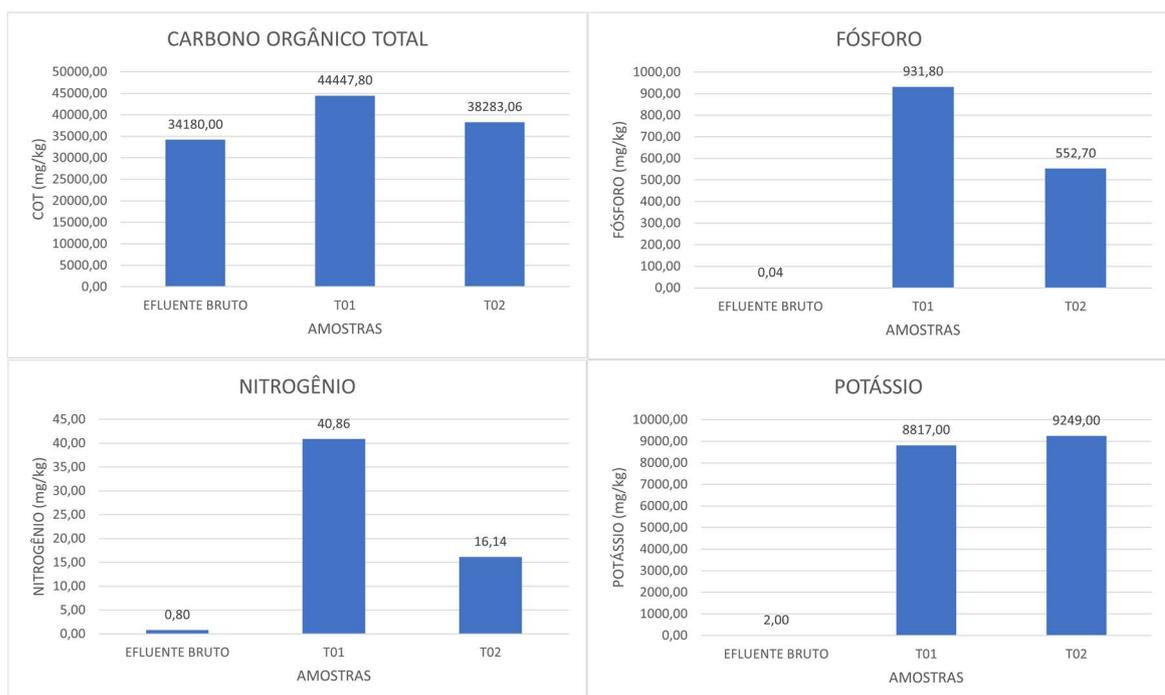


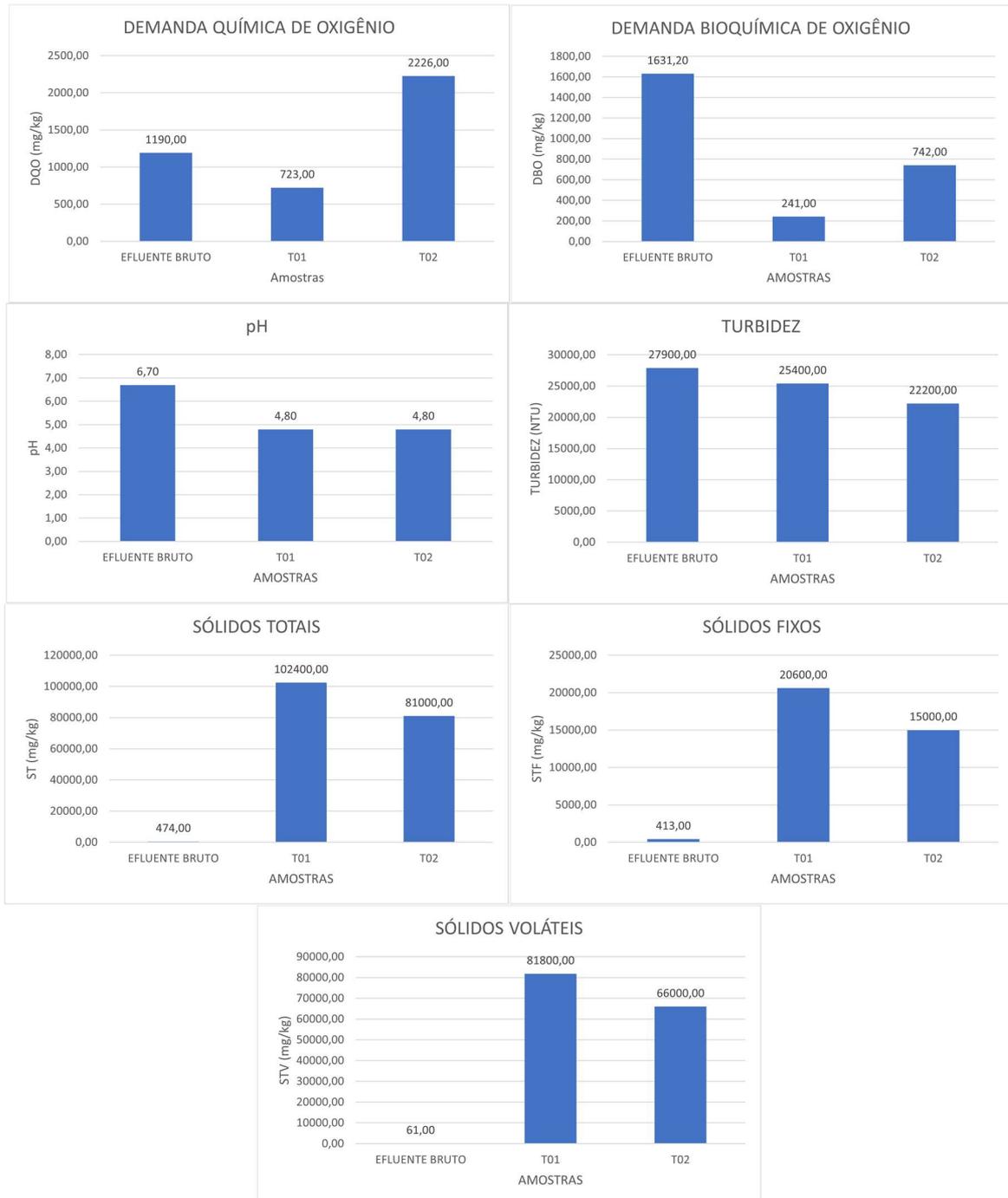
Fonte: Autor (2024)

A partir do momento que se analisa apenas o inóculo, observa-se que houve melhoras em função do tratamento em praticamente todos os parâmetros, compreendendo redução de taxa dos parâmetros cor (19%), DQO (26%), DBO (88%), COT (32% - T04), turbidez (27%), ST (33%), STF (31% - T03) e STV (54%) e aumento da taxa do nitrogênio (19%), fósforo (126,38 vezes maior), potássio (340,71 vezes maior) e pH (neutralizou-se). Como exceção, observa-se os valores de COT (27% - T03) e de STF (8% - T04), os quais apresentaram aumento da taxa, com relação ao resíduo em sua forma bruta.

De modo geral, a duplicata T03 apresentou-se mais eficiente no que diz respeito ao tratamento do inóculo isoladamente, uma vez que teve melhores resultados para os parâmetros fósforo, nitrogênio, potássio, DQO, DBO e STF, em comparação a amostra T04 que apresentou os melhores resultados para cor, COT, pH, turbidez, ST e STV, haja vista que os melhores resultados se apresentam em função da redução de carga orgânica e do aumento dos nutrientes.

Figura 38 - Gráficos comparativos dos parâmetros do efluente bruto e tratado (T01 e T02)





(k)

Fonte: Autor (2024)

A análise individual do POME apresenta alguns resultados pouco eficientes, como é o caso dos parâmetros COT (30% - T01/ 12% - T02), pH (acidificou-se), ST (216 vezes maior – T01/ 170 vezes maior – T02), STV (1.340,98 vezes maior – T01/ 1.081,97 vezes maior – T02), STF (50 vezes maior – T01/ 36,32 vezes maior – T02) e DQO (87% - T02). Para estes, pode-se observar que houve um aumento na taxa dos parâmetros mencionados (com exceção do pH), o que pode ser justificado pela análise laboratorial realizada, uma vez que as amostras foram analisadas em laboratórios diferentes e por metodologias diferentes, além disso, o tempo de

análise das amostras foi superior ao indicado, pois quando o material foi enviado ao laboratório particular contratado, a empresa responsável pelo transporte “perdeu” as caixas de isopor contendo as amostras e foi encontrá-las apenas um (1) dia e meio depois do envio, provavelmente causando alterações nas características iniciais do resíduo a ser analisado.

A respeito dos parâmetros nutrientes (NPK), DQO, DBO e turbidez, observa-se que apresentaram bons resultados, haja vista que houve aumento na taxa do fósforo (23.295 vezes maior), nitrogênio (51,075 vezes maior) e potássio (4.624,50 vezes maior) e redução na taxa da DQO (39% - T01), DBO (85%) e turbidez (20%). O parâmetro cor foi analisado, entretanto, não está apresentado na Figura 38, pois foi analisado por metodologias diferentes que por consequência apresentaram resultados totalmente diferentes e discrepantes, uma vez que um deles foi analisado em função dos comprimentos de onda (378 e 470) e o outro foi analisado em função da cor verdadeira e aparente, não sendo possível assim identificar a eficiência do tratamento.

A análise da duplicata T02 demonstra que ela se apresentou mais eficiente para o tratamento do efluente isoladamente, pois, obteve melhores resultados (até mesmo para aqueles parâmetros sem eficiência) para os parâmetros COT, potássio, turbidez, ST, STV e STF, em comparação a amostra T01 que apresentou os melhores resultados para fósforo, nitrogênio, DQO e DBO.

De modo geral, pode-se perceber que os melhores resultados são apresentados para aqueles tratamentos em que houve a inoculação do POME com a borra do dendê, assim como observado em Ferreira Júnior *et al.* (2020, pág. 147), “Destacando a importância da relação efluente/inóculo no processo de digestão anaeróbia”, haja vista que a inoculação tende a elevar os níveis de nutrientes e a produção de microrganismos que vão promover a decomposição da matéria orgânica e consequentemente produzir o biogás e o biofertilizante.

4.2 VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO POME NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

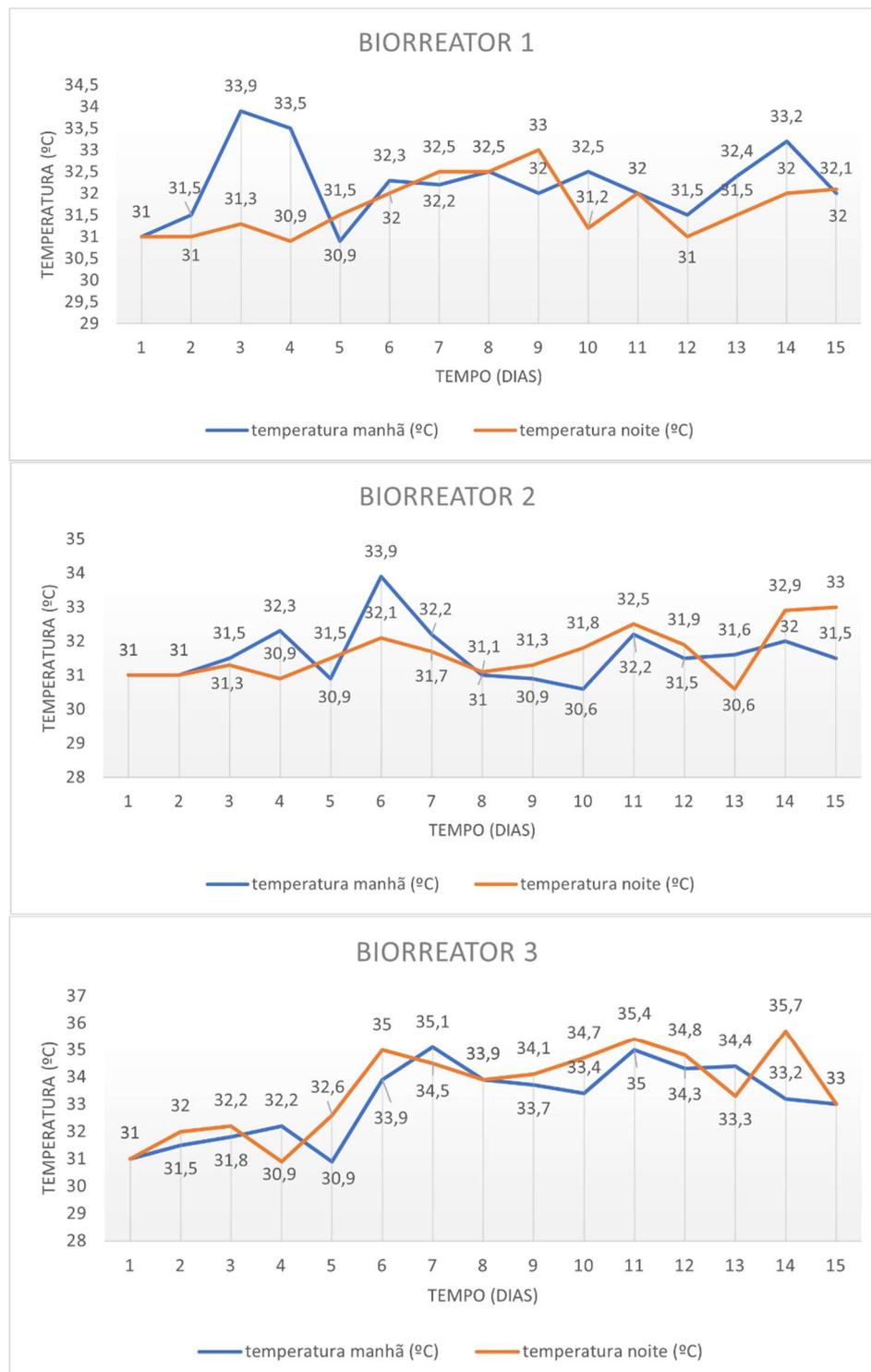
No tópico abaixo serão apresentadas as variáveis de temperatura (°C), pressão (Pa) e concentração de metano (ppm) que foram medidas através de sensores, no sistema de digestão anaeróbia. As tabelas referentes as figuras dos gráficos apresentadas abaixo podem ser consultadas no Anexo III desta dissertação.

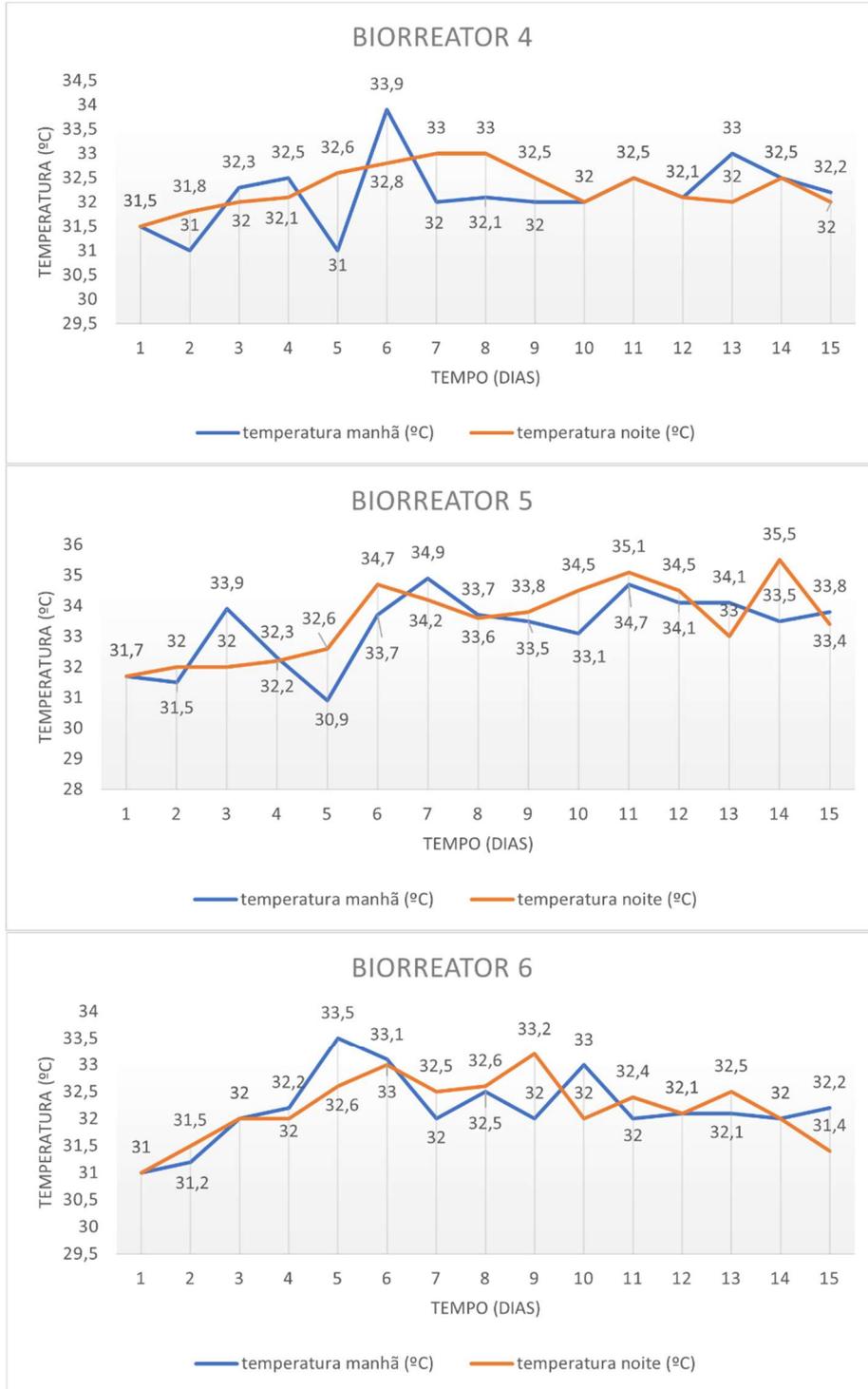
4.2.1 Temperatura

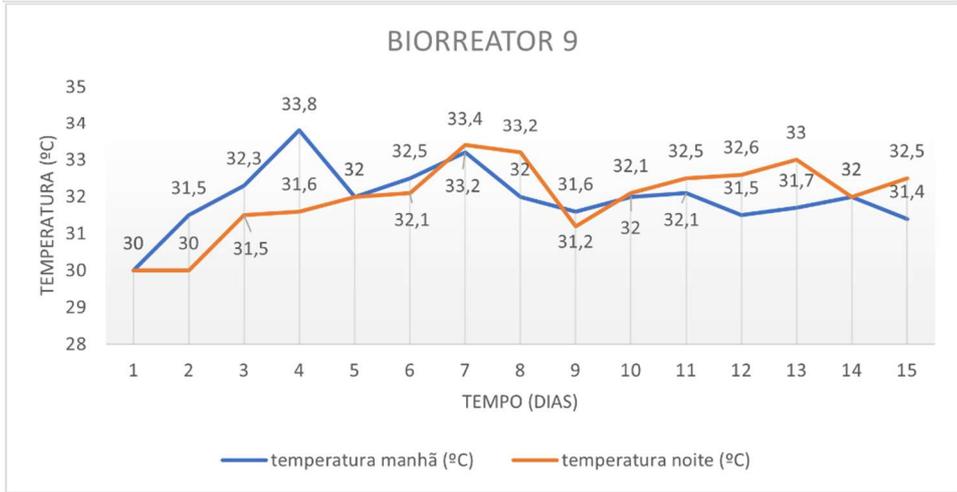
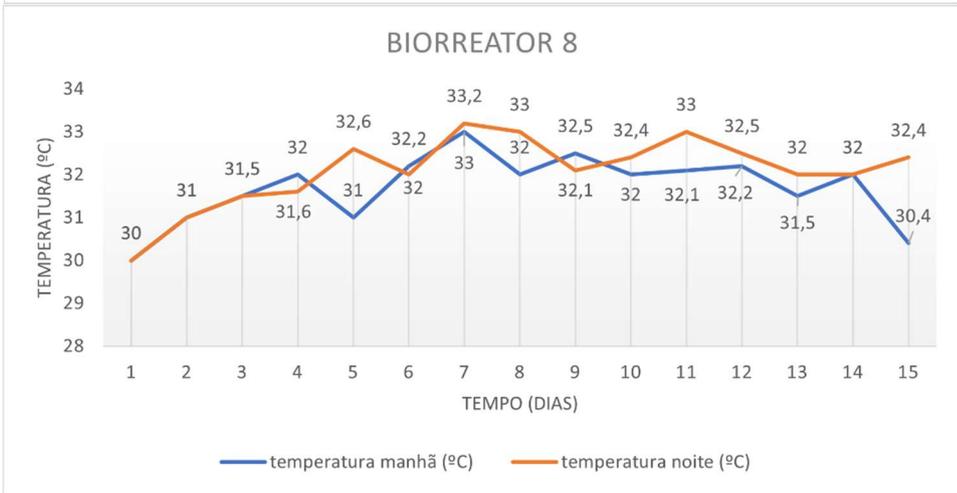
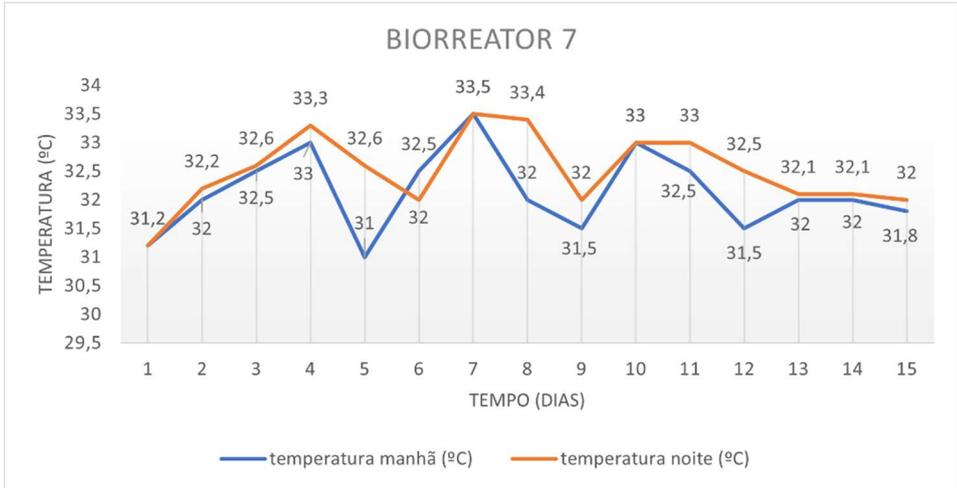
A temperatura no sistema de tratamento através da digestão anaeróbia deve ser controlada e se apresentar na faixa de 20 a 45 °C, pois nessa faixa se desenvolvem as bactérias

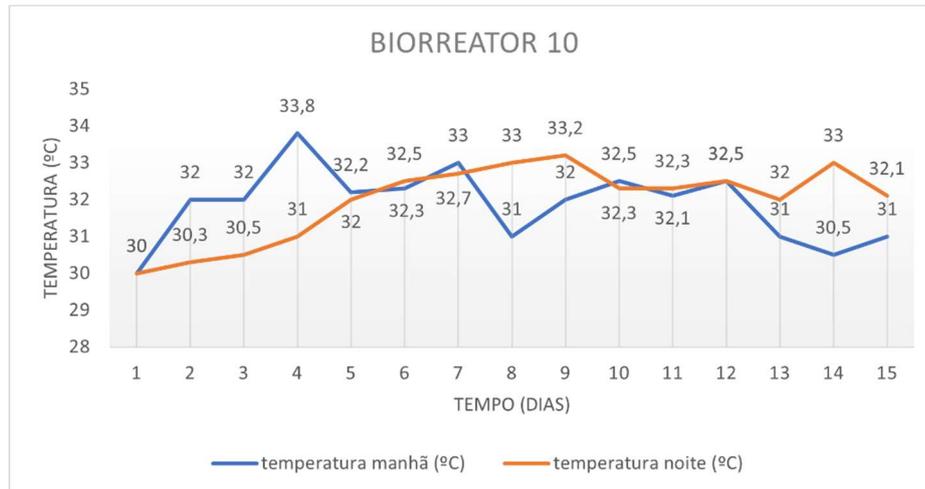
mesofílicas e a combinação das melhores condições para o bom desempenho do processo (De Lima *et al.*, 2020; Poblete, 2019), conforme apresentado na Figura 39, onde observa-se a variação da temperatura no período da manhã (9 horas) e noite (21 horas), ao longo de 15 dias de tratamento.b

Figura 39 - Gráficos de temperatura dos biorreatores









Fonte: Autor (2024)

Conforme pode-se observar, a temperatura se manteve na faixa mencionada anteriormente tanto no período da manhã, quanto no período da noite, sem que fosse necessária a utilização de alternativas para o controle dela, como também foi observado por Tschoeke *et al.* (2016) e sua medição se deu através de sensores de pressão-temperatura.

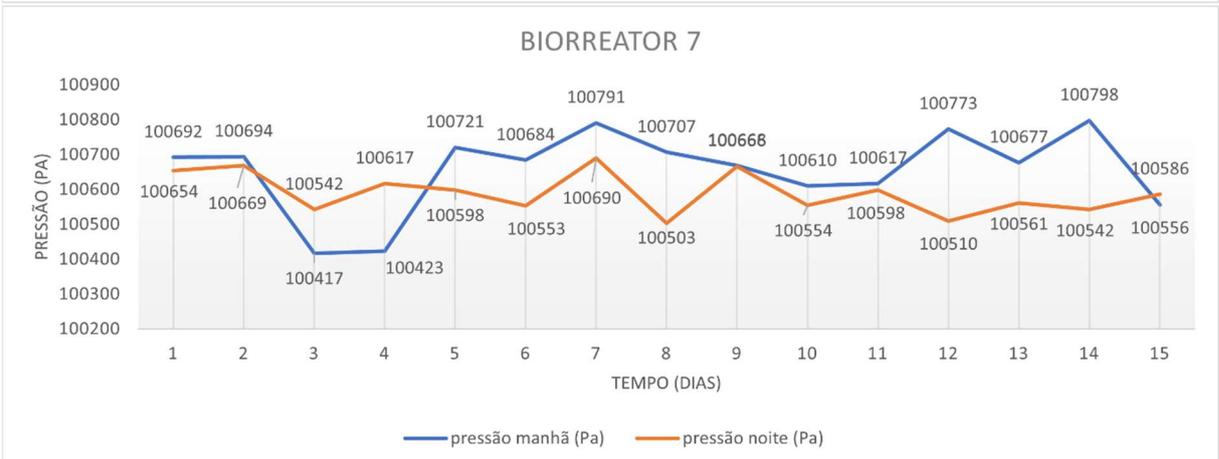
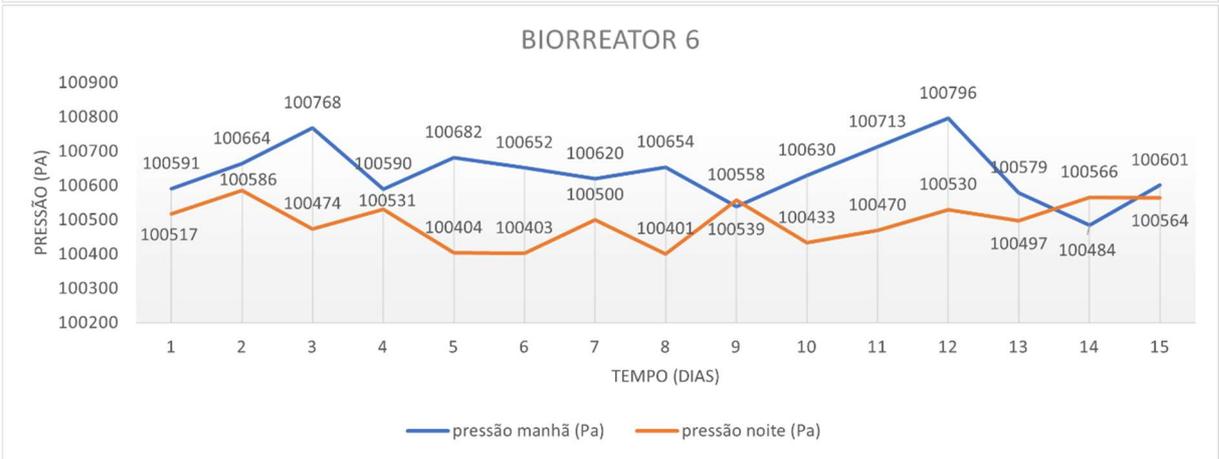
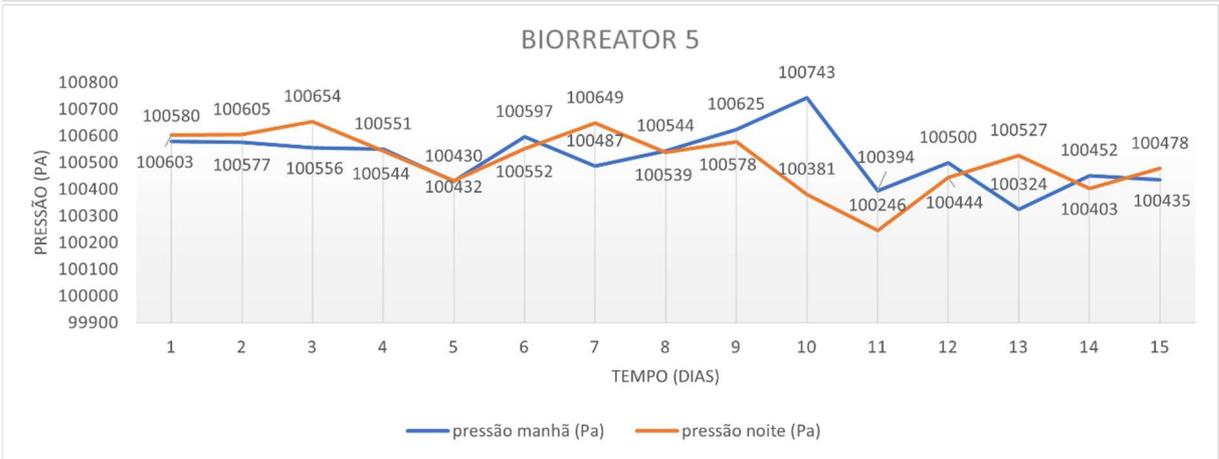
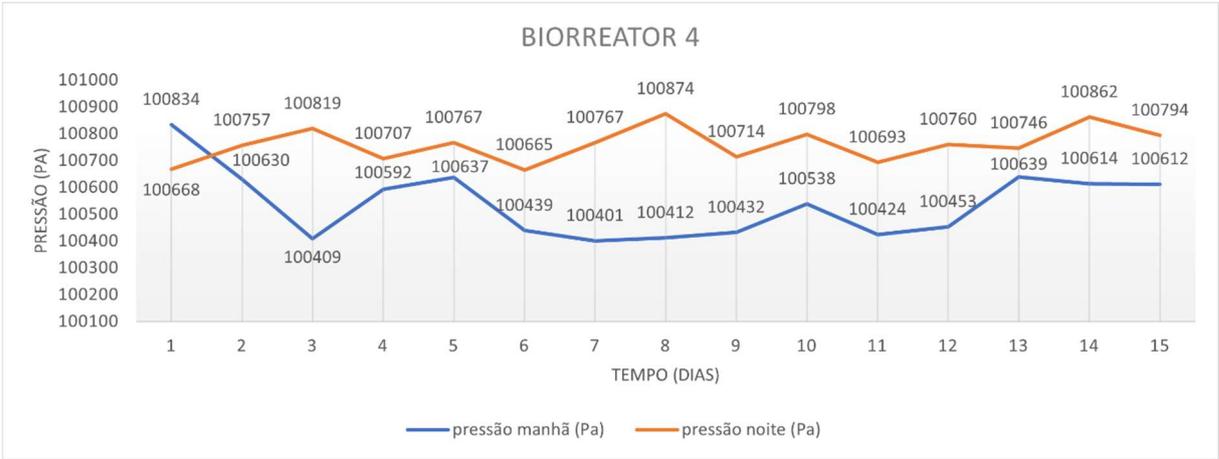
É importante lembrar que o tratamento através do sistema de digestão anaeróbia foi realizado no município de Tucuruí-PA, onde as faixas de temperatura se apresentam entre 28 °C e 40 °C, tornando-se mais fácil manter o controle da temperatura do sistema na faixa estabelecida. Para municípios com temperaturas muito diferentes dessa faixa, possivelmente será necessária a utilização de alternativas externas, como exemplo: controladores de temperatura, estufas, entre outros.

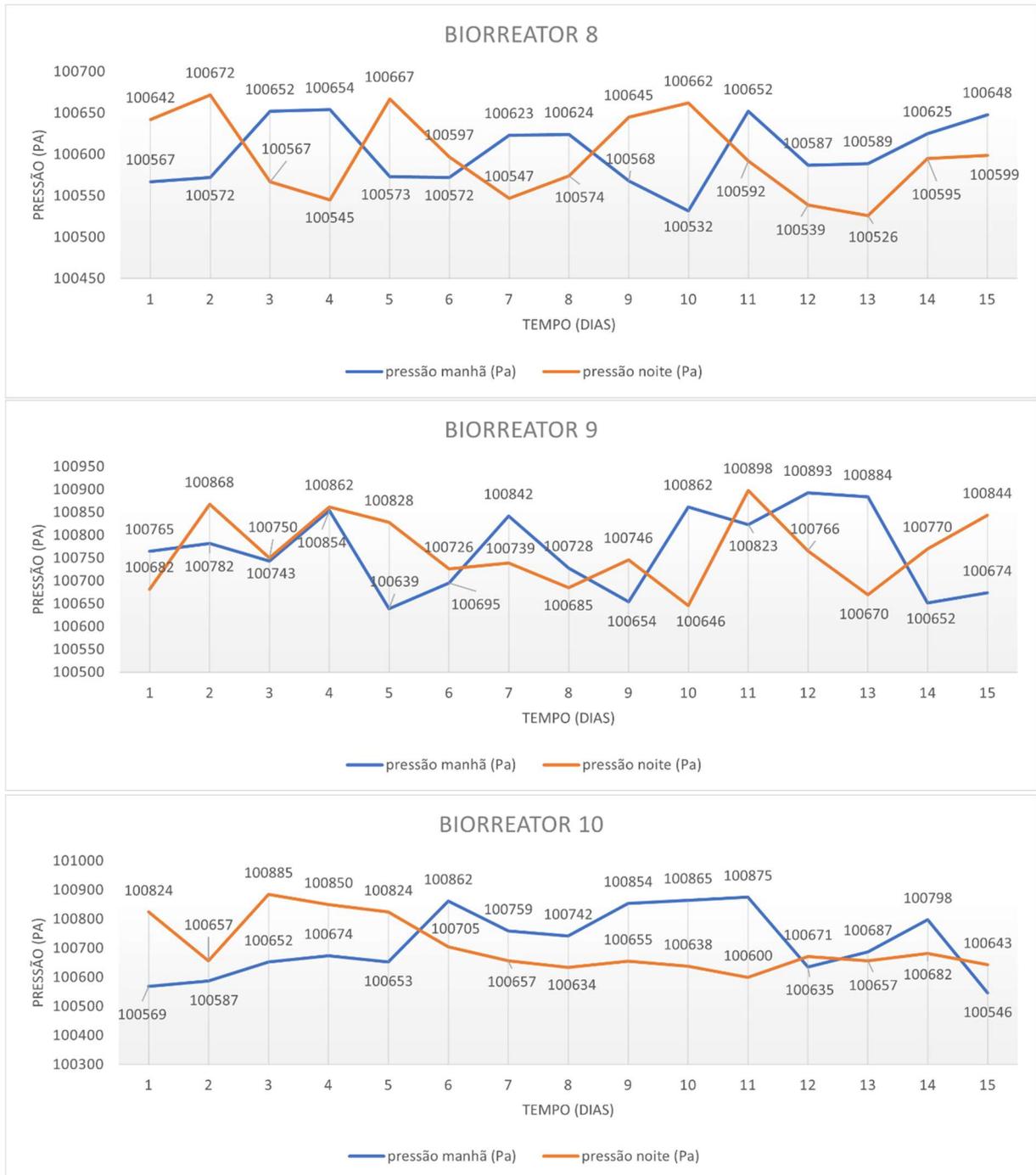
4.2.2 Pressão

A pressão no sistema apresentou uma variação, porém se manteve próxima a atmosfera, sendo na maioria dos casos, considerada ideal para o sistema, como é possível observar na Figura 40, onde nota-se a variação da pressão no período da manhã e noite, ao longo de 15 dias.

Figura 40 - Gráficos de pressão dos biorreatores







Fonte: Autor (2024)

Conforme pode-se observar, a pressão se manteve em função da pressão atmosférica ao longo do período da manhã e noite, como também observado por Tschoeke *et al.* (2016) e sua medição se deu através de sensores de pressão-temperatura. A pequena variação na pressão pode ser justificada também pela perda de pressão no sistema, haja vista que durante a produção do biogás ocorre um aumento da pressão interna do biorreator.

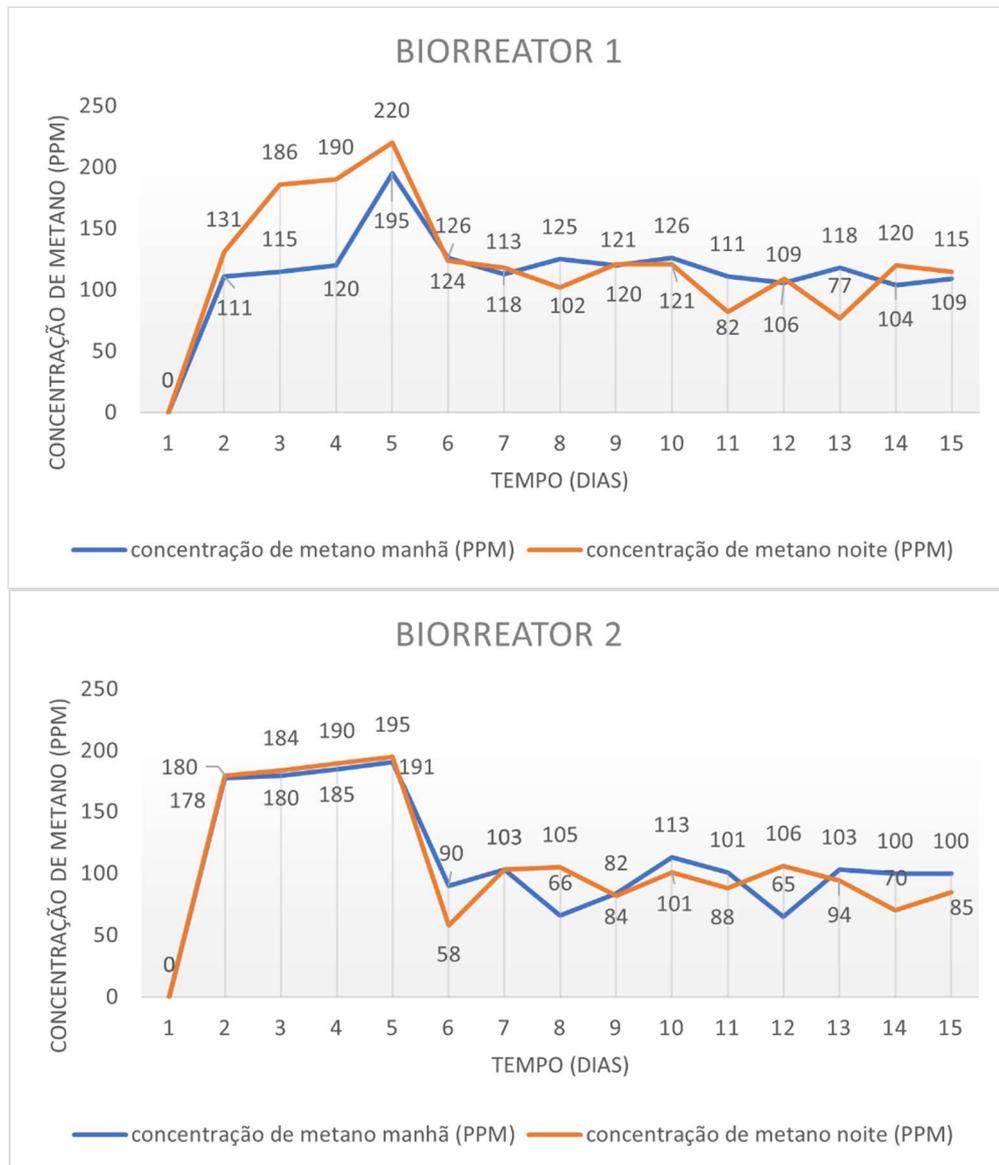
Quando se fala em pressão em um sistema de digestão anaeróbia, deve-se observar que as variações vão ocorrer em detrimento do resíduo utilizado e do tipo de sistema (biorreator)

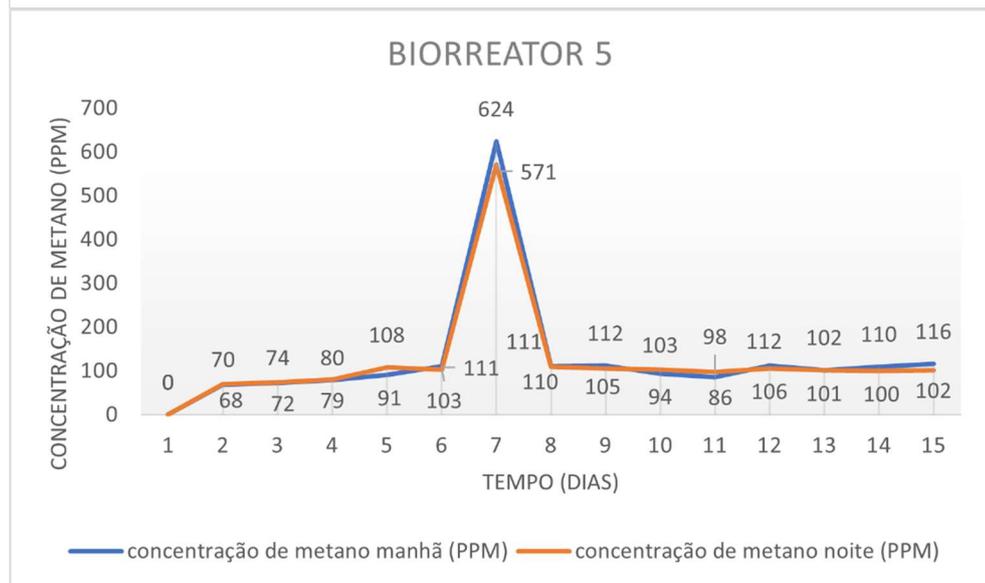
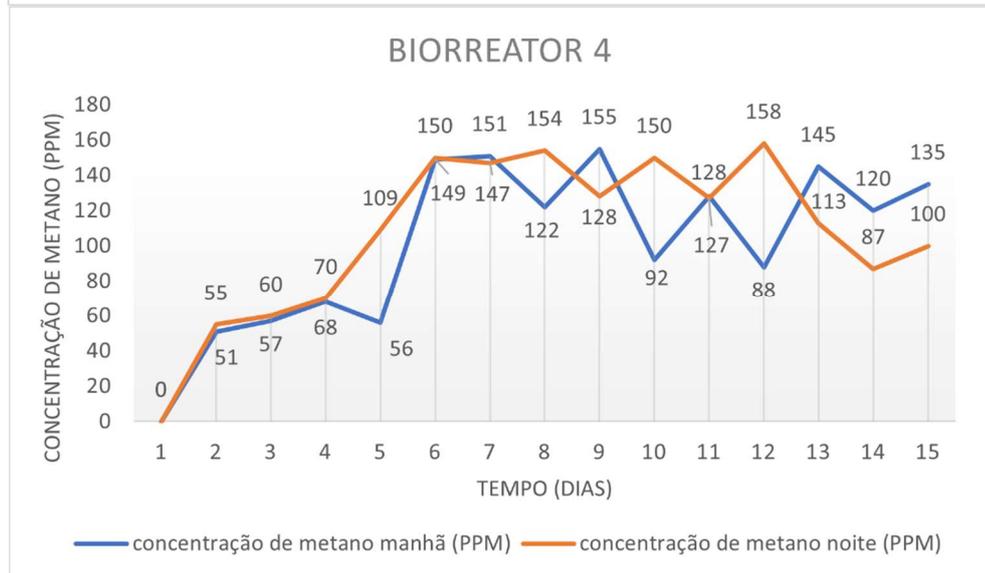
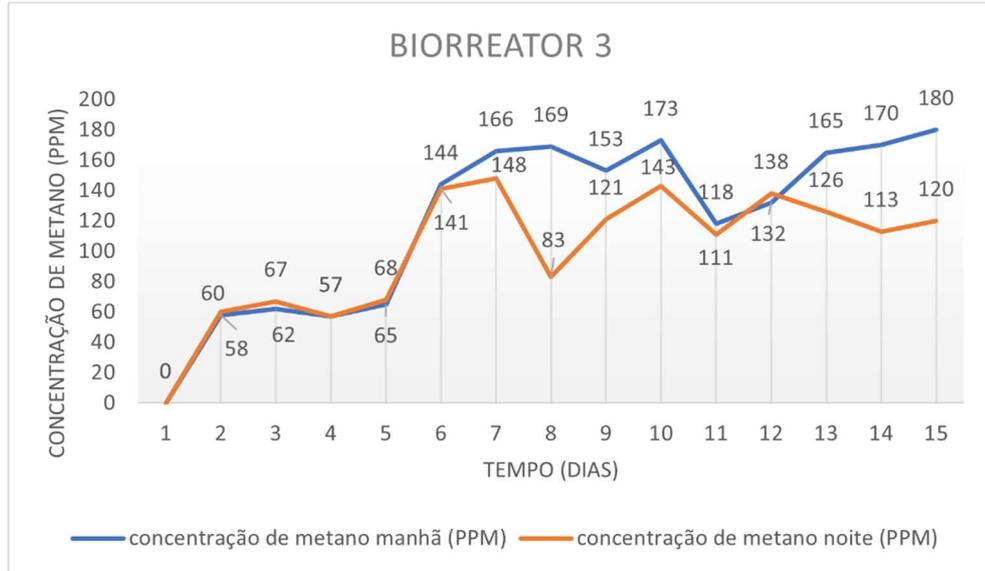
que está sendo utilizado, visto que enquanto em alguns sistemas a pressão se mantém constante, em outros ela é variável (Dos Santos, 2017). Cabe destacar também que a pressão interna do sistema se manteve constante devido o sistema ser fechado e em batelada, ou seja, não havia fatores externos que pudessem e permitissem a alteração da pressão, a não ser a própria produção de gás.

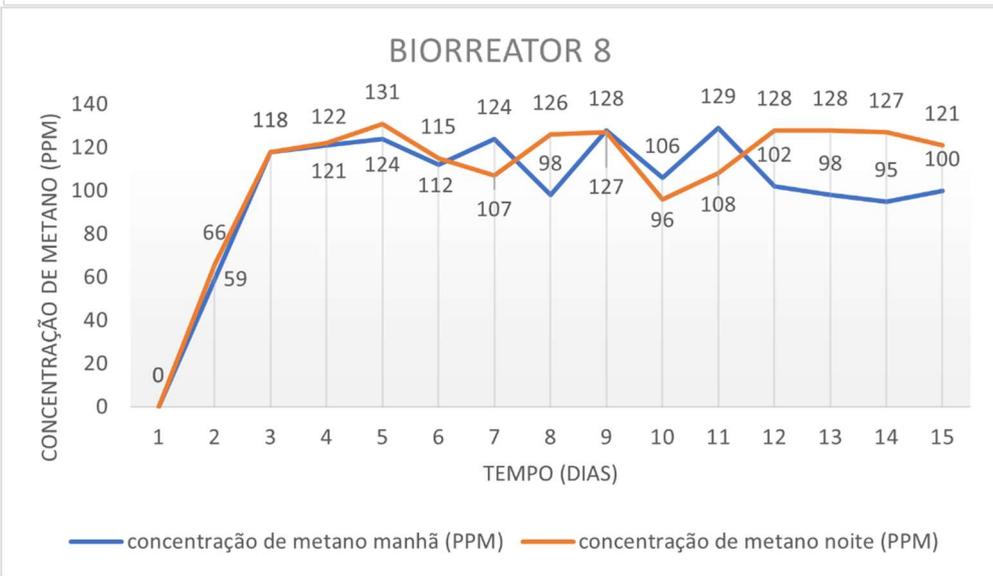
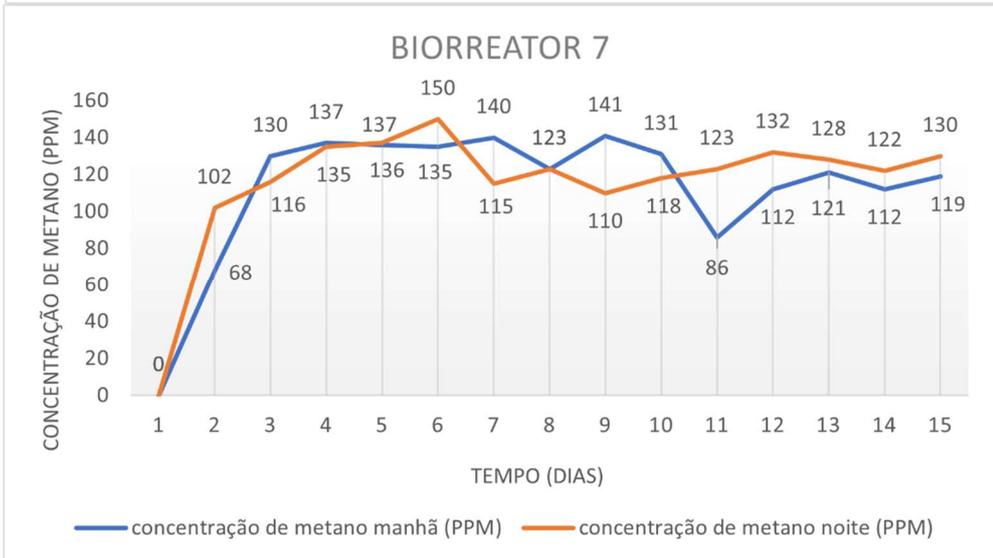
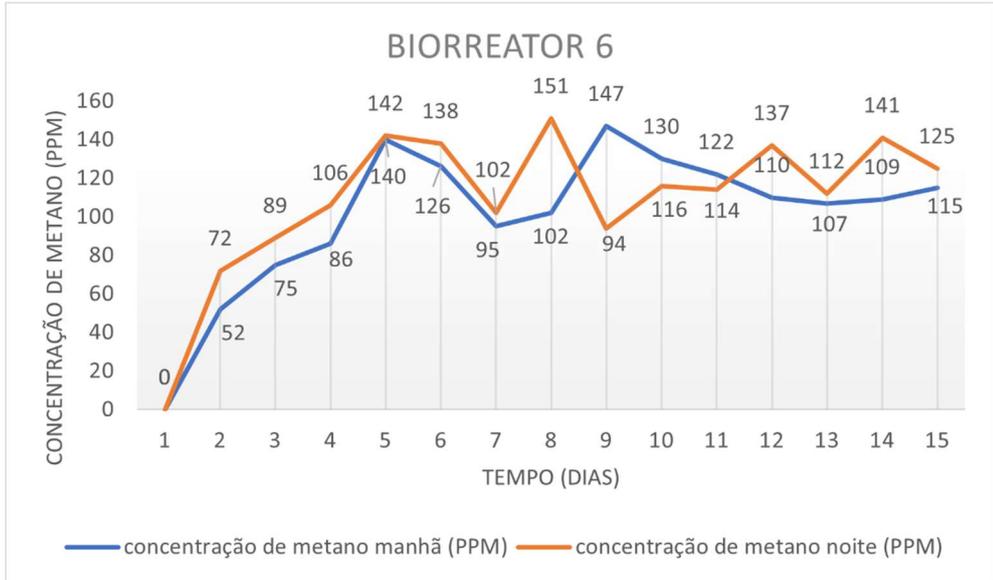
4.2.3 Concentração de metano

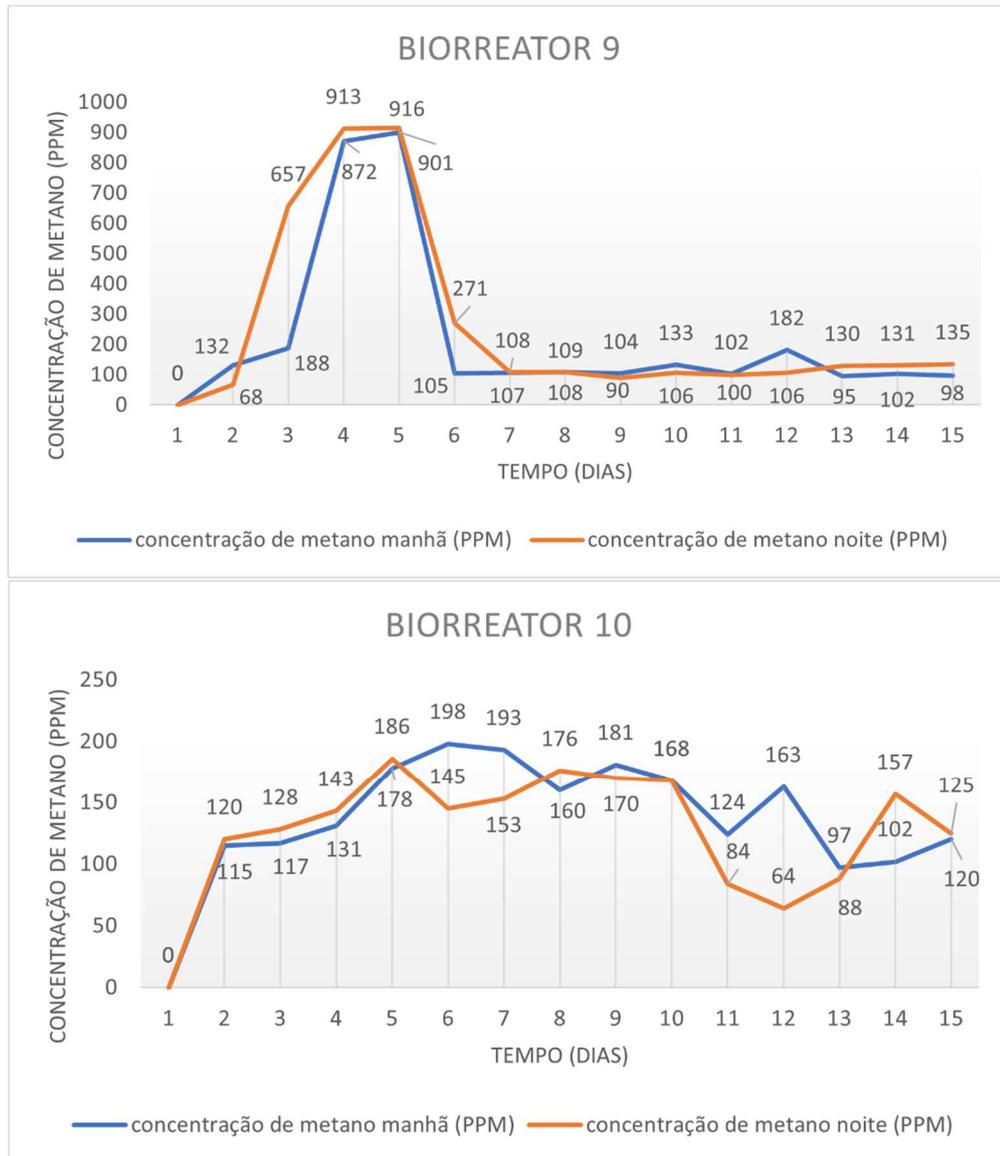
A concentração de metano no sistema foi registrada através de um sensor acoplado ao biorreator, onde, durante um período de 15 dias foram feitos registros de manhã e de noite, dos valores de metano produzidos, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Gráficos de concentração de metano dos biorreatores









Fonte: Autor (2024)

De modo geral, após analisar os gráficos, e levando também em consideração os gráficos de temperatura e a análise dos parâmetros físico-químicos, haja vista que todos esses fatores influenciam na produção de biogás no sistema, pode-se afirmar que o período de produção de gás metano se manteve em crescimento em torno de 10 dias nos biorreatores 1, 3, 4, 5, 7 e 10, e em torno de 5 dias nos biorreatores 2, 6, 8 e 9.

Nota-se que o crescimento da produção do gás aconteceu no período de maiores temperaturas, bem como no período de ocorrência das bactérias hidrolíticas e acidogênicas (pH 5,2 a 6,3), que, como já justificado anteriormente, são fatores essenciais e condições ideais para a produção de metano.

Nota-se que em alguns dias a produção de gás chegou a valores discrepantes com relação ao todo, sendo considerado para esses dias que houve problema com a calibração do sensor,

haja vista que a recomendação do fabricante afirmava que após conectado a uma fonte de energia, era necessário aguardar 24 horas para a calibração total. Além disso, após o período de crescimento, embora exista a ocorrência de variação da produção, em nenhum momento ela foi totalmente zero, com exceção do primeiro dia e, justifica-se a variação com uma possível perda de gás através das saídas do gasômetro construído e acoplado ao biorreator.

Considerando os valores de concentração de metano encontrados, pode-se dizer que as maiores concentrações foram de: 195 ppm (biorreatores 1 e 2); 173 ppm (biorreator 3); 158 ppm (biorreator 4); 116 ppm (biorreator 5); 151 ppm (biorreator 6); 141 ppm (biorreator 7); 129 ppm (biorreator 8); 188 ppm (biorreator 9) e 198 ppm (biorreator 10). Levando em consideração esses valores e a necessidade de se estabelecerem em função do volume, definiu-se a seguinte equação (Eq. 05):

$$\text{Vol. metano} = \text{volume do gasômetro (m}^3\text{)} \times \text{conc. do metano } \left(\frac{\text{ml}}{\text{m}^3}\right) \text{ (Equação 5)}$$

De posse dessas informações, calculou-se o volume correspondente ao maior valor de concentração de metano de cada biorreator e obteve-se as respectivas porcentagens de produção, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Volume de metano produzido nos biorreatores

Biorreator	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume (ml)	0,43	0,43	0,38	0,35	0,26	0,33	0,31	0,28	0,41	0,44
Porcentagem (%)	0,019	0,019	0,017	0,016	0,012	0,015	0,014	0,013	0,019	0,020

Fonte: Autor (2024)

De modo geral, pode-se observar que as melhores produções de concentração de metano ocorreram nos biorreatores 1, 2, 7, 8, 9 e 10 levando em consideração os 15 dias de tratamento, e não apenas os maiores valores individuais de cada biorreator, demonstrando novamente que a inoculação do efluente promove melhores resultados em relação a produção de biogás e biofertilizante.

É importante destacar que, embora não se tenha encontrado outros trabalhos utilizando a borra do dendê como inoculante, nota-se que a produção de metano foi relativamente baixa, comparada as porcentagens de biogás produzido encontradas em outros trabalhos a nível laboratorial, como observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação da produção de biogás em outros trabalhos

Autor (es)	Volume produzido
Furman <i>et al.</i> , (2016)	0,068 l/d
Tschoeke <i>et al.</i> , (2016)	1,5 l/d
Ferreira Júnior <i>et al.</i> , (2019)	0,30 l/d
Ferreira Júnior <i>et al.</i> , (2020)	0,34 l/ d
Dos Santos (2022)	0,25 l/d

Fonte: Autor (2024)

Quando se compara o resultado com os demais trabalhos, observa-se que devem ser levadas em consideração as características de cada um, o tamanho do biorreator, o tempo de tratamento, o volume de material, o tipo de inoculante, as características físico-químicas do material etc. Dessa forma, com base nos resultados, pode-se considerar que o POME é um resíduo viável para a produção de metano, haja vista que foi possível mensurar a produção, embora pequena, demonstrando-se a viabilidade do uso do POME, aliado ao inóculo, para a produção de biogás.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou entender e avaliar a viabilidade do tratamento do efluente agroindustrial do dendê (POME) e seu uso para produção de biogás e biofertilizante.

Para se atingir a compreensão dessa viabilidade, definiram-se quatro objetivos. Para o primeiro, após o tratamento das 10 amostras, pode-se concluir que o efluente do dendê (POME) isoladamente não apresenta tanta eficiência quanto o inóculo (borra do dendê) e as amostras inoculadas (POME + inóculo), haja vista que os resultados individuais do efluente demonstraram aumento nas taxas de Carbono Orgânico Total, DBO, Sólidos Totais, Fixos e Voláteis e redução no pH. Em contrapartida, a borra do dendê e as demais amostras inoculadas apresentaram viabilidade ambiental de tratamento para quase todos os parâmetros, com exceção da amostra T03 para Carbono Orgânico Total, e a amostra T04 para Sólidos Fixos. De modo geral, as amostras que demonstraram maior viabilidade ambiental foram: T03 para o inóculo isoladamente, T02 para o POME isoladamente e T05 para POME + inóculo.

Com relação ao segundo e terceiro objetivos, a análise das características físico-químicas após tratamento apresentou um pH com uma faixa entre 5,2 a 6,3 para todo o sistema, considerado, para esses casos, uma taxa adequada para o desenvolvimento das bactérias hidrolíticas e acidogênicas, com exceção das amostras T01 e T02; para os nutrientes NPK, observou-se um crescimento em todas as amostras, o que caracteriza o bom desempenho do processo de tratamento e a possibilidade de uso como biofertilizante; os teores de sólidos totais, fixos e voláteis encontrados caracterizam uma redução significativa na carga orgânica (com exceção das amostras T01 e T02), que representa um aumento no rendimento do biogás; a condutividade elétrica no sistema pode ser considerada relativamente alta, sendo necessário avaliar as características da cultura e do solo que vão receber o biofertilizante, para que não haja prejuízos às culturas; os parâmetros de turbidez e cor apresentaram boa remoção e redução de taxa, chegando a 53% de remoção de cor e 59% de remoção de turbidez; o Carbono Orgânico Total do sistema, embora tenha reduzido nas amostras T04 a T10, ainda se apresenta numa faixa alta, o que pode ser justificado pelo tipo de efluente estudado; e por fim, como a eficiência do processo de produção de biogás e biofertilizante se apresenta pela redução dos teores de DQO e DBO, pode-se considerar que tem-se um excelente produto em virtude da redução da carga orgânica.

Para o último objetivo, os indicadores de temperatura, pressão e concentração de metano do sistema de digestão anaeróbia demonstraram boas condições de operação no sistema, onde

a temperatura se manteve na faixa de 20 a 45°C (mesofílica), pressão próxima a atmosférica e produção de gás metano diária entre 0,26 e 0,44 ml.

Durante a produção da pesquisa, alguns fatores acabaram prejudicando o tempo de execução e a melhor eficiência do sistema, como por exemplo a demora de 6 meses para a liberação da coleta do efluente; a dificuldade em analisar os parâmetros físico-químicos em um só lugar, sendo necessário enviar para laboratório particular uma parte das amostras; o problema com a “perda” da amostra, por parte da companhia de transporte, que prejudicou na análise inicial do efluente bruto, passando do tempo mínimo necessário para a primeira análise; as quedas de energia que acabaram desligando o sistema automático do biorreator algumas vezes, que prejudicou a calibração dos sensores; a opção por utilizar a borra do dendê como inóculo, haja vista que praticamente inexistem referências na área; e uma possível perda de gás no sistema através das extremidades do biorreator e do gasômetro.

Como sugestões de melhoria tem-se o cuidado em analisar os parâmetros físico-químicos em um só lugar; a produção em escala maior dos biorreatores; o tempo de biodigestão; na possibilidade de haver tempo, o uso do biogás e do biofertilizante em alguma cultura.

Diante de todos os fatores observados, com base na análise dos parâmetros, nos resultados do tratamento e no funcionamento do sistema de digestão anaeróbia compreende-se a viabilidade ambiental do uso do POME para a produção de biofertilizante e biogás, permitindo uma possibilidade ambientalmente adequada ao resíduo, do ponto de vista da cadeia produtiva e ambiental.

REFERÊNCIAS

ALCATARA, R. M. M. Óleo de palma e biodiesel no brasil impactos sobre a originação para alimentos. Dissertação de mestrado. Escola de Economia de São Paulo. Fundação Getúlio Vargas – EESP – FGV. 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/33140>. Acesso em: 02/01/2023

BANDEIRA, F. J. S.; RIBEIRO JUNIOR, J. A. S.; MESQUITA, A. L. A.; MESQUITA, A. L. A.; TORRES, E. A. Potential use of palm oil and cocoa waste biomasses as sources of energy generation by gasification system in the state of Pará, Brazil. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.43, special issue, e20220151, 2023. ISSN: 1809-4430 (on-line)

BEZERRA, D. E. L.; FILHO, P. L.; JÚNIOR, E. B. P.; AZEVEDO, P. R. L.; SILVA, E. A. Reuso de água na irrigação de mudas de mamoeiro no Semiárido brasileiro. **Revista Verde**. v.14, n.1, jan.-mar, p.05-11. Pombal, Paraíba, Brasil 2019. ISSN 1981-8203. DOI: 10.18378/rvads.v14i1.5942

BLEY JUNIOR, C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da Biomassa Residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2ª ed. rev. – Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009. Disponível em: ISBN 978-85-62313-02-8

BONATTO, H. **Caderno 01 – Estudo de Viabilidade**. Coletânea Cadernos Orientadores. Contratação de Obras e Serviços de Engenharia – Edificações. Secretaria de Infraestrutura e Logística. Procuradoria Geral Do Estado Do Paraná. Curitiba – Paraná. NJA-PGE/SEIL, 2012. Disponível em: https://www.crea-pr.org.br/ws/phocadownload/cadernos/caderno_01_estudo_de_viabilidade.pdf. Acesso em: 02/01/2023

BRASIL. **Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Câmara Setorial da Cadeia Produtiva da Palma de Óleo. – Brasília. MAPA/ACE, 2018. ISBN 978-85-7991-098-2

BRASIL. **Fertilidade do solo e biofertilizante. Coordenação de Agroecologia**. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/fichas->

[agroecologicas/arquivos-fertilidade-do-solo/4-biofertilizante.pdf](#). 2006. Acesso em: 20/11/2023

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. **Biogás- Biocombustíveis ANP. Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas**. C. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014, v. 1, p. 136-167. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281411162_CASSINI_S_T_COELHO_S_T_PECORA_V_Biogas-Biocombustiveis_ANP_In_Carlos_Augusto_G_Perlingeiro_Org_Biocombustiveis_no_Brasil_-_Fundamentos_Aplicacoes_e_Perspectivas_C_Rio_de_Janeiro_Synergia_Editora_2014. Acesso em: 02/01/2023

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Nota técnica: N° 002/2010 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, abr. 2020. Disponível em: <https://biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-nobrasil-em-2019.pdf>. Acesso em: 12/03/2024.

COSTA, L. S. **Utilização do caroço de açaí como leito filtrante no tratamento de água de abastecimento**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Engenharia Civil (PPGEC/UFPA). Belém,Pará. 2014. Disponível em: <https://www.ppgec.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2014/leticia.pdf>. Acesso em: 02/01/2023

COSTA, D. A.; MENDONÇA R. H.; JUNIOR, M. M. W. Avaliação da remoção de cromo (III) por materiais compósitos porosos adsorventes de PE-g-MA, fibra de coco e quitosana, usando planejamento experimental. **Eng. Sanit Ambient**, v.22, n.6, nov./dez 2017, pg. 1203- 1213. DOI:10.1590/S1413-41522017119214

CRUZ, V. A. A. **Codigestão de lodo de laticínios e leite de descarte para geração de energia com biogás**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campus Londrina. Curso De Engenharia Ambiental. Londrina, 2019. Disponível em: efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11889/1/LD_COEAM_2019_2_18.pdf. Acesso em: 21/02/2024

DANTAS, A. D. B.; DI BERNARDO, L.; VOLTAN, P. E. N.; KOYAMA, M. H. **Eficiência de remoção de carbono orgânico total em ETA de ciclo completo no tratamento de água**

superficial contaminada – estudo de caso. Congresso ABES FENASAN. 2018. Disponível em: [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/36_Download/TrabalhosCompletoPDF/I-120.pdf](https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/36_Download/TrabalhosCompletoPDF/I-120.pdf). Acesso em: 21/02/2024

DAMASCENO, F. R. **Aplicação de Preparado Enzimático e Biossurfactante no Tratamento Anaeróbio de Efluentes com Alto Teor de Gordura.** Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: <http://epqb.eq.ufrj.br/download/biossurfactante-no-tratamento-anaerobio-de-efluente-com-alto-teor-de-gordura.pdf>. Acesso em: 02/01/2023

DE LIMA, H.Q. Avaliação dos modelos "Hashimoto e AMS-III. D" para produção de metano com dejetos de suínos. Dissertação de Mestrado. UFABC. 2011. Disponível em: http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=15237. Acesso em: 02/01/2023

DE LIMA, E. J.; DA SILVA, R. M.; TELES, R. DA S.; DIAS, F. F. DA S. Avaliação do funcionamento de um biodigestor de baixo custo. **DIVERSITAS JOURNAL**. Santana do Ipanema/AL. vol. 5, n. 4, p.2394-2407, out./dez. 2020. ISSN 2525-5215. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v5i4-1262

DIAS, G. H. B.; ROCHA, G. O.; MATOS, M. F. Influência da inoculação com uso de nutrientes no desenvolvimento e estabelecimento de soja (*glycine max*). **Ciências Agrárias**, Volume 28 – Edição 131/FEV 2024 SUMÁRIO / 03/02/2024. DOI: 10.5281/zenodo.10613889

DOMINIC, D.; BAIDURAH, S. Recent Developments in Biological Processing Technology for Palm Oil Mill Effluent Treatment—A Review. **Biology** 2022, 11, 525. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biology11040525>

DOS SANTOS, D. R. **Aproveitamento energético do resíduo de óleo de palma.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/255826>. Acesso em: 17/04/2024

DOS SANTOS, J. E. O. **Análise de viabilidade econômica da implantação de biodigestores em confinamento bovino.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Grande Dourados. Faculdade de Engenharia de Produção. DOURADOS-MS 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/2399>. Acesso em: 20/02/2024

ECKERT, C. T.; FRIGO, E. P.; MARI, A. G.; JUNIOR, A. M.; CABRAL, A. C.; GRZESIUCK, A. E.; DIERINGS, L. S. Construção De Biodigestores De Batelada Para Escala

Laboratorial. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.4, p. 65-82, 2015. Disponível em: DOI:10.5380/rber.v4i2.42429

EDWIGES, T. **Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Vegetais Provenientes de Central de Abastecimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. Agosto. 2017. 81 f. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/3029> Acesso em: 20/11/2023

EMBRAPA. Valorização de Coprodutos da Cadeia do Dendê. **Embrapa Agroindústria Tropical**. Fortaleza, CE. 2013. Disponível em: ISSN 2179-8184

EMERICK, T. **Processo eletroquímico combinado com ultrassom: um tratamento alternativo para efluentes agroindustriais**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Sul de Santa Catarina. 103 f. Santa Catarina, 2019. Disponível em: https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/2498/1/Dissertação_TUANE%20EMERICK_2019.pdf Acesso em: 20/11/2023

FERNANDES, G. L.; SANTOS, I. F. S.; SILVA, H. L. C.; BARROS, R. M. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. Artigo Técnico • **Eng. Sanit. Ambient.** 27 (1). Jan-Feb 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200210>.

FERREIRA JUNIOR, J.; CROTTI, B. F.; GONÇALVES, S. B.; MENDONÇA, S.; GUEDES, C. L.B. Avaliação do tratamento de efluente da extração do óleo de dendê e potencial de produção de biogás. **ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA**, 6., 2020, Brasília, DF. p. 144-151. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218536/1/Avaliac807a771o-do-tratamento-de-efluente-2020.pdf> Acesso em: 20/11/2023

FERREIRA JUNIOR, J.; GONCALVES, S. B.; MENDONCA, S.; GUEDES, C. L. B.; CROTTI, B. F. **Produção de biogás a partir do efluente da extração do óleo de palma (POME)**. 7º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel. Florianópolis, Santa Catarina. Novembro de 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1120264/producao-de-biogas-a-partir-do-efluente-da-extracao-do-oleo-de-palma-pome>. Acesso em: 20/11/2023

FURMAN, L. P.; BARTMER, L.; SOUZA, T. R.; LIENDO, M. A. **Produção de biogás a partir de um biodigestor caseiro**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. XVI Encontro Brasileiro sobre o Ensino de Engenharia Química. Fortaleza - CE. 2016. Disponível em: ISSN: 21785600

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo 2022. **Produção Agrícola Municipal de dendê (2022)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/dende/pa>. Acesso em: 12/03/2024

IIBA. **Um guia para o Corpo de Conhecimento de Análise de Negócios (TM) (Guia BABOK®)**. Canadá. International Institute of Business Analysis. 2011. ISBN: 9780981129242.

INOUE, K. R. A. **Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira**. Dissertação. Mestrado em Construções rurais e ambiência; Energia na agricultura; Mecanização agrícola; Processamento de produtos. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 92 f. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3508> Acesso em: 20/11/2023

KÜHL, R. M. **Geração de energia elétrica a partir dos resíduos do processo de beneficiamento do óleo de palma: uma abordagem sustentável para a recuperação de áreas degradadas no Estado do Pará**. Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA. Belém, Pará, 2017. Disponível em: https://ppgee.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/DM%2003_2017%20Ricardo%20Marino%20Kuhl.pdf. Acesso em: 20/11/2023

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A.C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Sociedade Brasileira dos Especialistas em Resíduos das Produções Agropecuária e Agroindustrial – Sbera. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Suínos e Aves. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2ª Edição. Concórdia, SC. 2022. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1141618/1/final9894.pdf> Acesso em: 20/11/2023

LAPICCIRELLA, J. Do N. et al. O uso de Biofertilizantes na Agricultura Orgânica. In: Anais... 2º Congresso Online Internacional de Sementes Crioulas e Agrobiodiversidade, Dourados, de 01 a 04 de dezembro de 2021, 2022.

LIMA, M. **Produção de biogás a partir do lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Dezembro. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17420>. Acesso em: 20/11/2023

LIMA, L. P.; FERREIRA, A. G.; VAZ, L. R. L.; ANDRADE, W. R.; FERREIRA, C. F. S. Método para seleção de sistemas de tratamento de efluentes em agroindústrias de micro e pequeno porte. **REVENG – Revista Engenharia na Agricultura.** n.04, p.334-342, 2018. Viçosa, MG, DEA/UFV - DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i4.964>.

LOMBARDI, J. B.; FURLEY, T. H. Avaliação do efeito da condutividade no tratamento biológico de um efluente de fábrica de celulose. **O PAPEL** vol. 76, num. 12, pp. 91 - 96 DEC 2015. Disponível em: [//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1450099901_2333c6fcc07f3b9be3a28ef53504c5f5_689665492.pdf](http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1450099901_2333c6fcc07f3b9be3a28ef53504c5f5_689665492.pdf). Acesso em: 17/04/2024

LOPEZ, M. A. R. **Comportamento químico e microbiológico no biofertilizante tipo supermagro.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. BRASÍLIA/DF MARÇO/2013. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://icts.unb.br/jspui/bitstream/10482/13730/1/2013_MiguelAlfredoRuizLopez.pdf](http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://icts.unb.br/jspui/bitstream/10482/13730/1/2013_MiguelAlfredoRuizLopez.pdf). Acesso: 20/02/2024

LORENTZ, J. F. **Tratamento de efluentes da bovinocultura leiteira e produção de biofertilizante para aplicação em pastagem.** Tese apresentada a Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa, MG, 2019. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/26807/1/texto%20completo.pdf> Acesso em: 20/11/2023

LOW, S.S.; Bong, K.X.; MUBASHIR, M.; CHENG, C.K.; LAM, M.K.; LIM, J.W.; HO, Y.C.; LEE, K.T.; MUNAWAROH, H.S.H.; SHOW, P.L. Microalgae Cultivation in Palm Oil Mill

Effluent (POME) Treatment and Biofuel Production. *Sustainability* **2021**, 13, 3247. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13063247>

LUOSTARINEN, S.; KULIGOWSKI, K. **Examples of Good Practices on Existing Manure Energy Use: Biogas, Combustion and Thermal Gasification**. Baltic MANURE WP6 Energy potentials-KNOWLEDGE REPORT. Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. 2011. Disponível em: DOI:10.13140/RG.2.2.33585.12649

MACÊDO, D. O.; TEIXEIRA, J. P. P. **Estudo de caso: análise de viabilidade ambiental da implantação da BR-101 no Estado do Paraná (ligação entre a BR-277, Morretes/PR, e a BR-376, Garuva/SC)**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Construção Civil Curso de Engenharia Civil. Curitiba, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8026/1/CT_COECI_2017_2_16.pdf Acesso em: 20/11/2023

MAIA, H. M. DE C.; MARTINS, V. C. R.; BRASIL, T. B.; MARTINS, R. J.; ARAÚJO, K. S.; DE SOUZA, F. G.; DA SILVA, J. A.; CHAVES, J. DA S.; LEITE, A. F. Cultivo de rúcula (*ERUCA SATIVA L.*) em ambiente protegido sob diferentes concentrações de solução nutritiva. *Rev. Agr. Acad.*, v. 5, n. 1, Jan/Fev (2022). DOI: 10.32406/v5n1/2022/29-37/agrariacad. Acesso em: 20/02/2024

MARDER, M. **Avaliação da geração de biogás a partir de resíduos agroindustriais e emprego do biofertilizante na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Univates. Curso de Engenharia Ambiental. Lajeado. 2015. Disponível em: <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/64d038f7-c70e-48dd-b882-b1e7840ce4ac/content> Acesso em: 20/11/2023

MARINHO, F. A. **Biogás: uso de dejetos do beneficiamento do dendê**. Canal Bioenergia. Goiânia. 2016. Disponível em: <https://www.canalbioenergia.com.br/biogas-uso-de-dejetos-do-beneficiamento-dodende/> Acesso em: 20/11/2023

MARTINEZ, D. G.; BÜHRING, G. M. B.; MÜLLER, R. **Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano**. Biogás Brasil. Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás. Foz do Iguaçu, Dezembro, 2019. Disponível em:

https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFDJvEBPFIQQQA64Tz6Qt.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzQEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1711503813/RO=10/RU=https%3a%2f%2fwww.unido.org%2fsites%2fdefault%2ffiles%2ffiles%2f2020-04%2fPanorama%2520de%2520tecnologias%2520aplicadas%2520no%2520agroneg%25C3%25B3cio%2520de%2520biog%25C3%25A1s%2520e%2520biometano.pdf/RK=2/RS=xoIwvWDXL5JHKoC3kp9ehBmwjE4-. Acesso em: 12/03/2024

MATIAS, K. C. **Produção de Biogás a partir de resíduos orgânicos visando aplicação em aquecimento e cocção de alimentos em substituição ao gás natural.** Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Petróleo – CEP/CT/UFRN. NATAL/RN. Fevereiro, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/46186>. Acesso em: 21/02/2024

MEYER, B. E.; RIBEIRO, J. E.; POMBO, V. **Análise de viabilidade técnica de um sistema de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Química. Curso de Engenharia Química. Ponta Grossa. 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16540/1/PG_COENQ_2017_2_07.pdf. Acesso em: 20/11/2023

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA. **INSTRUÇÃO NORMATIVA No 6 , DE 08 DE JULHO DE 2020.** Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, tolerâncias, registro, garantias, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Disponível em: [//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf)

MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. S.; GUIMARÃES, D. D. **Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil.** BNDES Set., Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar. 2021. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20801>. Acesso em: 12/04/2024

MIRANDA, A. F. **AValiação de óleo de palma usando métodos físico-químicos e instrumentais.** Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Tecnologia de Alimentos – PPGTA, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná –

UTFPR. CAMPO MOURÃO/PR 2023. Disponível em: https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFDQ0j3B5mmAQAqrfz6Qt.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAziEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1714508068/RO=10/RU=http%3a%2f%2friut.utfpr.edu.br%2fjspui%2fbitstream%2f1%2f31769%2f1%2favaliacaooleopalma.pdf/RK=2/RS=8sW Om2Wgg23SN8jVPOE5151NshE-. Acesso em: 16/04/2024

MOHAMMAD, S.; BAIDURAH, S.; KOBAYASHI, T.; ISMAIL, N.; LEH, C. P. Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. **Processes** 2021, 9, 739. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr9050739>

MORAIS, K. S. **Subprodutos da agroindústria do óleo de palma (dendê): produção de cogumelos comestíveis e insumos para ração de peixes**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Vitória da Conquista, BA. 122 f. 2016. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1065482> Acesso em: 20/11/2023

NETO, D. L. **Formulação de Projetos para o Setor Privado**. 2009. ISBN: 9781450514538

NOTARI, C. A.; GAMBINI, R.; BRANDALISE, L. T.; JOHANN, J. A.; BERTOLINI, G. R. F. Tratamento de efluentes em um polo agroindustrial do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade** (2020): 7(16): 937-951. ISSN 2359-1412 [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071630](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071630)

OKOLI, I. F. Oil Palm Tree Wastes 7: The composition and treatment of the palm oil mill effluente. **TROPICAL RESEARCH REFERENCE PLATFORM**. 2020. Disponível em: <https://researchtropica.com/oil-palm-tree-wastes-7-the-composition-and-treatment-of-the-palm-oil-mill-effluent/>. Acesso em: 16/04/2024

OLIVEIRA, F. M.; COELHO, L. M.; MELO, E. I. Avaliação de processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante azul de metileno. **Matéria (Rio J.)** 23 (04). 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0557>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 16/04/2024

POBLETE, I. B. DE S. **Simulação e análise de produção e condicionamento de biogás**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ

– Brasil. Abril de 2019. Disponível em: <http://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://186.202.79.107/download/simulacao-e-analise-de-producao-e-condicionamento-de-biogas.pdf>. Acesso em: 04/09/2023

REIS, A. R. **Digestibilidade aparente da torta de dendê na alimentação do pirarucu (*arapaima gigas* SCHINZ, 1822) durante a fase de juvenil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais. Universidade Federal Rural Da Amazônia. Belém. 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1135/4/Digestibilidade%20aparente%20da%20torta%20de%20dendê%20na%20alimentação%20do%20Pirarucu%20%28Arapirama%20gigasSCHINZ%2C%201822%29%20durante%20a%20fase%20de%20juvenil.pdf>
Acesso em: 02/01/2023

REZENDE, M. J. C; DE LIMA, A. L.; SILVA, B. V.; MOTA, C. J. A.; TORRES, E. A.; DA ROCHA, G. O.; CARDOZO, I. M. M.; COSTA, K. P.; GUARIEIRO, L. L. N.; PEREIRA, P. A. P.; MARTINEZ, S.; DE ANDRADE, J. B. Biodiesel: An Overview II. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. 32 (7) • July 2021 • Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210046>. Acesso em: 12/03/2024

RPEOTTA. Estudo de Viabilidade. Disponível em: <https://www.rpeotta.com.br/estudo-de-viabilidade>. Acesso em: 02/01/2023

RODRIGUES, E. S. O. **Torta de dendê em dietas para vacas lactantes em pastejo**. Tese e doutorado. Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia – UESB. Programa De Pós-Graduação Em Zootecnia – PPZ. 2018. Disponível em: <http://www2.uesb.br/ppg/ppz/wp-content/uploads/2018/09/Tese-final-TORTA-DE-DENDÊ-EM-DIETAS-PARA-VACAS-LACTANTES-EM-PASTEJO-corrigida.pdf>. Acesso em: 02/01/2023

RODRIGUES, L. S.; SILVA, I. J.; OLIVEIRA, P. R.; CAMPOS, C. M. M.; SILVA, F. L. Avaliação in vitro da eficiência de inóculos no tratamento anaeróbio de efluentes líquidos de suinocultura. **Medicina Veterinária • Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.** 56 (5) • Out 2004 • <https://doi.org/10.1590/S0102-09352004000500012>.

RODRIGUES, V. BLASIU, J. P; CASTRO, M. C. A. A. ESTRATÉGIA DE ADAPTAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO MESOFÍLICO COMO FONTE DE INÓCULO PARA BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES. **Revista Gestão e Sustentabilidade**

Ambiental. Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 372-390, out/dez. 2020.
DOI:10.19177/rgsa.v9e42020372-390

ROMERA, C. M. **Partida do processo de digestão anaeróbia visando o tratamento de efluente da indústria de óleo de palma. Trabalho de Conclusão de Curso.** Universidade de Brasília. Instituto de Química. Curso de Bacharelado em Química Tecnológica. Brasília, DF 2020. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/23873> Acesso em: 20/11/2023

SAAD, M. S.; WIRZAL, M. D. H.; ADI PUTRA, Z. Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system. **Journal of Environmental Management.** Volume 286, 15 May 2021, 112209. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112209>.

SANTA ROSA, C. E. A. S. **Análise econômica da utilização de silagem de casca de mandioca com torta de dendê para uso na alimentação animal.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Zootecnia, Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 34 f. 2022. Disponível em: <http://www.bdta.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2321/1/Análise%20econômica%20da%20utilização%20de%20silagem%20de%20casca%20de%20mandioca%20com%20torta%20de%20dendê%20para%20uso%20na%20alimentação%20animal.pdf> Acesso em: 20/11/2023

SANTOS, L. A.; SANTOS, A. F. M. S; VALENÇA, R. B; JUCÁ, J. F. T; OLIVEIRA, C. R. M. Produção de biogás a partir de bagaço de laranja. **Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia.** 4 (3): 022-027, Set 2018. ISSN: 2447-0740

SANTOS, R. A. R. Estimativa da produção de biogás em aterro sanitário municipal no oeste do Paraná. Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira. 2019. Disponível em: [//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/20499/1/estimativabiogasaterroparana.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/20499/1/estimativabiogasaterroparana.pdf).

SANTOS, A. M. **Biorreatores Heterotróficos Microalgais aplicados ao tratamento de Efluentes Agroindustriais.** Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, RS, 2020. Disponível em:

https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/22938/TES_PPGCTA_2020_SANTOS_ALINE.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20/11/2023

SHAHBANDEH, M. Vegetable oils: global consumption 2013/14 to 2022/23, by oil type. **Statista**. Janeiro 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/>. Acesso em: 04/09/2023

SILVA, T.; BARBOSA, C.; GAMA, B.; NASCIMENTO, G.; DUARTE, M. Agregação de valor à resíduo agroindustrial: remoção de fenol utilizando adsorvente preparado a partir de casca de amendoim. **Matéria (Rio J.)** 23 (1). 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0283>

SIMAS, J. P.; PEREIRA, C. L. C. Energia e sustentabilidade: análise da viabilidade do cultivo de dendê para o desenvolvimento regional endógeno da Amazônia. **Bol. geogr.**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 184-198, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i1.39256>

SIQUEIRA, M. T. L.; COSTA, M. G.; DA CUNHA, A. S.; FERREIRA, E. V. DE O.; GURGEL, F. DE L. **Teores de NPK no solo em cultivo de laranjeira ‘pera’ em combinação com porta-enxertos**. IV Congresso Internacional de Ciências Agrárias. COINTER PDVAgro. 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/226760/1/TEORES-DE-NPK-NO-SOLO-EM-CULTIVO-DE-LARANJEIRA-PERA-EM-COMBINACAO-COM-PORTA-ENXERTOS1.pdf>. Acesso em: 20/02/2024

SOARES, C. S. G. C.; PAES, J. L.; ALVES, T. B. S. **UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO COMO INÓCULO PARA PARTIDA DE BIODIGESTORES ABASTECIDOS COM DEJETOS BOVINOS**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado. 17 a 20 de abril de 2022. Disponível em: https://r.search.yahoo.com/_ylt=Awrhdp21QvZkpsIBbk3z6Qt.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1693889333/RO=10/RU=https%3a%2f%2fanaiscbens.emnuvens.com.br%2fcbens%2farticle%2fdownload%2f615%2f615%2f/RK=2/RS=TL9ZPKcKEb62_5GaOY7f92qnyXk-. Acesso em: 04/09/2023

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. **Nativa**, Sinop, v.5, esp., p.522-528, dez. 2017. Disponível em: ISSN: 2318-7670 DOI: 10.31413/nativa.v5i7.5155

- SOUSA, J. L. O. **Uso de biofertilizantes provenientes da cana energia e da cana-de-açúcar como alternativa para produção de crotalaria e soja**. 2018. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/10821> Acesso em: 04/09/2023
- TEIXEIRA, M. A. Energia e Emissões na Produção de Óleo de Palma / Dendê (*Elaeis guineensis*): geração e cogeração na indústria de Óleo de Palma. **Revista Ambiência**. Guarapuava (PR). v.15. n.1. p. 257 – 278. Jan/Abr 2019. Disponível em: ISSN 1808 – 0251
- TICKLE-DEGNEN, L. Nuts and bolts of conducting feasibility studies. **American Journal of Occupational Therapy**. 67(2), 171-176. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5014/ajot.2013.006270>
- TSCHOEKE, I. C. P.; SOUZA, T. C. P.; SANTOS, A. F. M. S.; CAVALCANTE, J. V. F. L.; SILVA, J. P.; DIAS, F. F. S. **Sistema de controle automático para biodigestor**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. XVI Encontro Brasileiro sobre o Ensino de Engenharia Química. Fortaleza - CE. 2016. Disponível em: ISSN: 21785600
- TUNES, C. R. **Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos em reator UASB**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia da Universidade Federal do Tocantins. Gurupi – TO. 2017. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/381/1/Caroline%20Ribeiro%20Tunes%20-%20Dissertação.pdf> Acesso em: 04/09/2023
- USDA. United States Department of Agriculture. Relatórios sobre Dendê 2022. Disponível em: <https://usdabrazil.org.br/relatorios/>. Acesso em: 20/07/2023
- VÁSQUEZ CARRILLO, M. C. **Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção de biocombustível de aviação a partir do hidrocessamento dos óleos de dendê e soja nas condições brasileiras**. Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2426>. Acesso em: 04/09/2023
- VIDAL, R. S. **Extração de óleo de dendê e produção de biodiesel em processo integrado a alta pressão: estudo do efeito das variáveis de processo**. Dissertação. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Processos Da Universidade Tiradentes. Aracaju, SE. Março de 2016. Disponível em: <https://openrit.grupotiradentes.com/xmlui/handle/set/3332> Acesso em: 04/09/2023

WOJCIECKOWSKI, F. O.; MARQUES, R. M.; BASTOS, J. A.; VIGNA, G. de S.; GAMBETTA, R. **Desafios da operacionalização do biorreator com inóculo mesofílico**. ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 7., 2023, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF. Embrapa, 2023. p. 93. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1158284/1/Desafios-da-operacionalizacao.pdf>

ZAWATSKI, A. P. M. Análise de viabilidade técnica e ambiental de estação de tratamento de efluentes de bovinocultura leiteira. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí. 2018. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/5359/Ana%20Paula%20Mertins%20Zawatski.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 04/09/2023

ZEFERINO, M; RAMOS, S. de F. Mercado Mundial de Óleos Vegetais: panorama e perspectivas. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 18, n. 5, p. 1-8, maio 2023. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/ftp/iea/AIA/AIA-17-2023.pdf>. Acesso em: 04/09/2023

ANEXO I – CÓDIGO DO SENSOR DE CONCENTRAÇÃO DE METANO

```

#define pinS0 4
#define pinS1 5
#define pinS2 6
#define pinS3 7
#define pinAnalog A0
int valor = 0;

void setup() {
  pinMode(pinS0, OUTPUT);
  pinMode(pinS1, OUTPUT);
  pinMode(pinS2, OUTPUT);
  pinMode(pinS3, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  for (byte nL = 0; nL <= 9; nL++) {
    int valorLido = analogMultiplexerRead(nL);

    if (valorLido < 50) {
      Serial.print(" ");
    } else {
      Serial.print("Concentração de Metano no Bioreator ");
      Serial.print( nL );
      Serial.print(" é de: ");
      Serial.print( valorLido );
      Serial.println(" PPM. ");
      delay(5000);
    }
  }
  Serial.println();
}

//Função de Leitura de Uma porta Analógica do Multiplexador
int analogMultiplexerRead(byte portRead) {
  //Seleciona a porta
  digitalWrite(pinS0, bitRead(portRead, 0));
  digitalWrite(pinS1, bitRead(portRead, 1));
  digitalWrite(pinS2, bitRead(portRead, 2));
  digitalWrite(pinS3, bitRead(portRead, 3));

  //Lê o valor da porta
  return analogRead(pinAnalog);
}

```

ANEXO II - CÓDIGO DO SENSOR DE TEMPERATURA E PRESSÃO

```

#include <Wire.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
#include <Adafruit_BMP085.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA

Adafruit_BMP085 bmp; //OBJETO DO TIPO Adafruit_BMP085 (I2C)

void setup(){
  Serial.begin(9600); //INICIALIZA A SERIAL
  if (!bmp.begin()){ //SE O SENSOR NÃO FOR INICIALIZADO, FAZ
    Serial.println("Sensor BMP180 não foi identificado! Verifique as conexões.");
  } //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
  while(1){} //SEMPRE ENTRE NO LOOP
}

void loop(){

  Serial.println("Temperatura e Pressão no Bioreator");

  Serial.print("Temperatura: "); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
  Serial.print(bmp.readTemperature()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A
TEMPERATURA
  Serial.println(" *C (Grau Celsius)"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL

  Serial.print("Pressão: "); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
  Serial.print(bmp.readPressure()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A PRESSÃO
  Serial.println(" Pa (Pascal)"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL

  Serial.println("-----"); //IMPRIME UMA LINHA
NO MONITOR SERIAL
  delay(8000); //INTERVALO DE 2 SEGUNDOS
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ");
}

```

ANEXO III – TABELAS DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA, PRESSÃO E CONCENTRAÇÃO DE METANO DOS BIORREATORES

Biorreator 1 - Manhã				Biorreator 1 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31	100513	0	1	31	100574	0
2	31,5	100570	111	2	31	100548	131
3	33,9	100519	115	3	31,3	100600	186
4	33,5	100527	120	4	30,9	100449	190
5	30,9	100621	195	5	31,5	100407	220
6	32,3	100446	126	6	32	100570	124
7	32,2	100481	113	7	32,5	100459	118
8	32,5	100663	125	8	32,5	100516	102
9	32	100546	120	9	33	100434	121
10	32,5	100483	126	10	31,2	100513	121
11	32	100564	111	11	32	100429	82
12	31,5	100465	106	12	31	100558	109
13	32,4	100656	118	13	31,5	100583	77
14	33,2	100616	104	14	32	100518	120
15	32	100610	109	15	32,1	100459	115

Biorreator 2 - Manhã				Biorreator 2 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31	100519	0	1	31	100557	0
2	31	100529	178	2	31	100435	180
3	31,5	100627	180	3	31,3	100498	184
4	32,3	100528	185	4	30,9	100542	190
5	30,9	100450	191	5	31,5	100548	195
6	33,9	100463	90	6	32,1	100481	58
7	32,2	100433	103	7	31,7	100600	103
8	31	100492	66	8	31,1	100490	105
9	30,9	100569	84	9	31,3	100526	82
10	30,6	100694	113	10	31,8	100318	101
11	32,2	100335	101	11	32,5	100186	88
12	31,5	100459	65	12	31,9	100387	106
13	31,6	100448	103	13	30,6	100476	94
14	32	100347	100	14	32,9	100339	70
15	31,5	100532	100	15	33	100422	85

Biorreator 3 - Manhã				Biorreator 3 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31	100804	0	1	31	100836	0
2	31,5	100805	58	2	32	100752	60
3	31,8	100811	62	3	32,2	100654	67
4	32,2	100714	57	4	30,9	100743	57
5	30,9	100732	65	5	32,6	100682	68
6	33,9	100787	144	6	35	100778	141
7	35,1	100722	166	7	34,5	100873	148
8	33,9	100773	169	8	33,9	100761	83
9	33,7	100845	153	9	34,1	100806	121
10	33,4	100968	173	10	34,7	100613	143
11	35	100620	118	11	35,4	100473	111
12	34,3	100738	132	12	34,8	100667	138
13	34,4	100550	165	13	33,3	100750	126
14	33,2	100512	170	14	35,7	100626	113
15	33	100542	180	15	33	100668	120

Biorreator 4 - Manhã				Biorreator 4 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31,5	100834	0	1	31,5	100668	0
2	31	100630	51	2	31,8	100757	55
3	32,3	100409	57	3	32	100819	60
4	32,5	100592	68	4	32,1	100707	70
5	31	100637	56	5	32,6	100767	109
6	33,9	100439	149	6	32,8	100665	150
7	32	100401	151	7	33	100767	147
8	32,1	100412	122	8	33	100874	154
9	32	100432	155	9	32,5	100714	128
10	32	100538	92	10	32	100798	150
11	32,5	100424	128	11	32,5	100693	127
12	32,1	100453	88	12	32,1	100760	158
13	33	100639	145	13	32	100746	113
14	32,5	100614	120	14	32,5	100862	87
15	32,2	100612	135	15	32	100794	100

Biorreator 5 - Manhã				Biorreator 5 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31,7	100580	0	1	31,7	100603	0
2	31,5	100577	68	2	32	100605	70
3	33,9	100556	72	3	32	100654	74
4	32,3	100551	79	4	32,2	100544	80
5	30,9	100430	91	5	32,6	100432	108
6	33,7	100597	111	6	34,7	100552	103
7	34,9	100487	624	7	34,2	100649	571
8	33,7	100544	111	8	33,6	100539	110
9	33,5	100625	112	9	33,8	100578	105
10	33,1	100743	94	10	34,5	100381	103
11	34,7	100394	86	11	35,1	100246	98
12	34,1	100500	112	12	34,5	100444	106
13	34,1	100324	102	13	33	100527	101
14	33,5	100452	110	14	35,5	100403	100
15	33,8	100435	116	15	33,4	100478	102

Biorreator 6 - Manhã				Biorreator 6 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31	100591	0	1	31	100517	0
2	31,2	100664	52	2	31,5	100586	72
3	32	100768	75	3	32	100474	89
4	32,2	100590	86	4	32	100531	106
5	33,5	100682	140	5	32,6	100404	142
6	33,1	100652	126	6	33	100403	138
7	32	100620	95	7	32,5	100500	102
8	32,5	100654	102	8	32,6	100401	151
9	32	100539	147	9	33,2	100558	94
10	33	100630	130	10	32	100433	116
11	32	100713	122	11	32,4	100470	114
12	32,1	100796	110	12	32,1	100530	137
13	32,1	100579	107	13	32,5	100497	112
14	32	100484	109	14	32	100566	141
15	32,2	100601	115	15	31,4	100564	125

Biorreator 7 - Manhã				Biorreator 7 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	31,2	100692	0	1	31,2	100654	0
2	32	100694	68	2	32,2	100669	102
3	32,5	100417	130	3	32,6	100542	116
4	33	100423	137	4	33,3	100617	135
5	31	100721	136	5	32,6	100598	137
6	32,5	100684	135	6	32	100553	150
7	33,5	100791	140	7	33,5	100690	115
8	32	100707	123	8	33,4	100503	123
9	31,5	100668	141	9	32	100666	110
10	33	100610	131	10	33	100554	118
11	32,5	100617	86	11	33	100598	123
12	31,5	100773	112	12	32,5	100510	132
13	32	100677	121	13	32,1	100561	128
14	32	100798	112	14	32,1	100542	122
15	31,8	100556	119	15	32	100586	130

Biorreator 8 - Manhã				Biorreator 8 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	30	100567	0	1	30	100642	0
2	31	100572	59	2	31	100672	66
3	31,5	100652	118	3	31,5	100567	118
4	32	100654	121	4	31,6	100545	122
5	31	100573	124	5	32,6	100667	131
6	32,2	100572	112	6	32	100597	115
7	33	100623	124	7	33,2	100547	107
8	32	100624	98	8	33	100574	126
9	32,5	100568	128	9	32,1	100645	127
10	32	100532	106	10	32,4	100662	96
11	32,1	100652	129	11	33	100592	108
12	32,2	100587	102	12	32,5	100539	128
13	31,5	100589	98	13	32	100526	128
14	32	100625	95	14	32	100595	127
15	30,4	100648	100	15	32,4	100599	121

Biorreator 9 - Manhã				Biorreator 9 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	30	100765	0	1	30	100682	0
2	31,5	100782	132	2	30	100868	68
3	32,3	100743	188	3	31,5	100750	657
4	33,8	100854	872	4	31,6	100862	913
5	32	100639	901	5	32	100828	916
6	32,5	100695	105	6	32,1	100726	271
7	33,2	100842	107	7	33,4	100739	108
8	32	100728	108	8	33,2	100685	109
9	31,6	100654	104	9	31,2	100746	90
10	32	100862	133	10	32,1	100646	106
11	32,1	100823	102	11	32,5	100898	100
12	31,5	100893	182	12	32,6	100766	106
13	31,7	100884	95	13	33	100670	130
14	32	100652	102	14	32	100770	131
15	31,4	100674	98	15	32,5	100844	135

Biorreator 10 - Manhã				Biorreator 10 - Noite			
dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)	dia	temperatura (°C)	pressão (Pa)	Concentração de Metano (PPM)
1	30	100569,00	0	1	30	100824	0
2	32	100587,00	115	2	30,3	100657	120
3	32	100652,00	117	3	30,5	100885	128
4	33,8	100674,00	131	4	31	100850	143
5	32,2	100653,00	178	5	32	100824	186
6	32,3	100862,00	198	6	32,5	100705	145
7	33	100759,00	193	7	32,7	100657	153
8	31	100742,00	160	8	33	100634	176
9	32	100854,00	181	9	33,2	100655	170
10	32,5	100865,00	168	10	32,3	100638	168
11	32,1	100875,00	124	11	32,3	100600	84
12	32,5	100635,00	163	12	32,5	100671	64
13	31	100687,00	97	13	32	100657	88
14	30,5	100798,00	102	14	33	100682	157
15	31	100546,00	120	15	32,1	100643	125