



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

JOZOMAR FERREIRA JUNIOR

**TRATAMENTO E GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
EFLUENTE DA PRODUÇÃO DO ÓLEO DE PALMA**

---

Londrina  
2021

JOZOMAR FERREIRA JUNIOR

**TRATAMENTO E GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
EFLUENTE DA PRODUÇÃO DO ÓLEO DE PALMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Estadual de Londrina como requisito à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carmen Luisa Barbosa Guedes

Coorientadora: Dr.<sup>a</sup> Simone Mendonça

Londrina  
2021

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

F383t Ferreira Junior, Jozomar .  
Tratamento e geração de biogás a partir de efluente da produção do óleo de palma / Jozomar Ferreira Junior. - Londrina, 2021.  
64 f. : il.

Orientador: Carmen Luisa Barbosa Guedes.  
Coorientador: Simone Mendonça.  
Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2021.  
Inclui bibliografia.

1. Óleo de palmeira - Resíduos - Tese. 2. Metano - Tese. 3. Biocombustíveis - Tese. 4. Energia renovável - Tese. I. Guedes, Carmen Luisa Barbosa . II. Mendonça, Simone . III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. IV. Título.

CDU 662

JOZOMAR FERREIRA JUNIOR

## **TRATAMENTO E GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE EFLUENTE DA PRODUÇÃO DO ÓLEO DE PALMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Estadual de Londrina como requisito à obtenção do título de Mestre.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carmen Luisa Barbosa  
Guedes  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Waldir Nagel Schirmer  
Universidade Estadual do Centro-Oeste do  
Paraná (Campus Irati) – UNICENTRO

---

Dr. Rossano Gambetta  
EMBRAPA Agroenergia

Londrina, 01 de fevereiro de 2021.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e saúde para poder trilhar o meu caminho;

À minha família, mãe, irmãos e sobrinhos, por todo apoio, amor e compreensão;

À minha orientadora, professora Dr<sup>a</sup>. Carmen Luisa Barbosa Guedes pelos ensinamentos, paciência e atenção;

À toda equipe do mestrado em Bioenergia, professores e alunos, bem como a equipe do laboratório LaQuiBio da UEL, especialmente à mestranda Beatriz Fernanda Crotti;

À toda equipe da Embrapa Agroenergia e dos laboratórios LQB e LPB, especialmente aos pesquisadores, Dr<sup>a</sup>. Simone Mendonça pela coorientação, Dr<sup>a</sup> Sílvia Belém pelo auxílio técnico e Dr. Rossano Gambetta pela colaboração;

À empresa Denpasa – Dendê do Pará S/A, pelo fornecimento dos materiais utilizados neste trabalho;

Às agências de fomento CAPES e CNPQ, que foram fundamentais no incentivo e auxílio financeiro para execução e desenvolvimento deste trabalho;

À minha namorada, pelo apoio, amor e compreensão;

Aos meus amigos Layonn, Luizinho, Trojan, Xachin e Luiz Otávio - Dogão (*in memoriam*), por toda parceria e incentivo durante essa e outras jornadas.

FERREIRA JUNIOR, Jozomar. **Tratamento e geração de biogás a partir de efluente da produção do óleo de palma**. 2020. 64 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## RESUMO

Os resíduos e efluentes gerados durante o processo de extração do óleo de palma ou dendê possuem elevado potencial energético e estão sendo utilizados na geração de energias renováveis através de diversos métodos de aproveitamento energético destes coprodutos. Entre os resíduos gerados nesta cadeia produtiva, tem-se o resíduo líquido conhecido como efluente da extração do óleo de palma ou *Palm Oil Mill Effluent* - POME, caracterizado com um elevado potencial poluidor, além de excessivos volumes de geração devido à alta demanda hídrica nesta cadeia produtiva, acarretando inúmeros impactos ao meio ambiente quando disposto sem tratamento prévio e adequado em corpos hídricos receptores. Para tanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o tratamento e o potencial de geração de biogás a partir do efluente da produção do óleo de dendê da espécie BRS Manicoré ou dendê híbrido, através do processo de digestão anaeróbia. O estudo foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa foi avaliada a melhor faixa de pH (5, 6 e 7), bem como o melhor volume de inóculo (10, 20 e 30%) para o tratamento do efluente, utilizando o planejamento estatístico modelo Box-Behnken, observando redução acima de 29% de sólidos voláteis seguindo padrões estabelecidos pelo *Standard Methods*, em pH igual a 7 e volume de 30% de inóculo, sob temperatura de 35°C, durante 15 dias de incubação. Na segunda etapa do trabalho foi avaliado o potencial de geração de biogás a partir do método BMP ao longo de 10 dias de incubação em estufa incubadora BOD com temperatura de 35°C, variando o volume de inóculo (30, 40 e 50%) em pH igual a 7, observando o volume total de 339 mL de biogás utilizando 30% de inóculo, apresentando 65% de gás metano na composição química do biogás gerado. Além disso, o efluente apresentou redução de DQO de 47%. O estudo mostrou que o volume de 30% de inóculo em pH igual a 7 apresenta-se como melhor faixa para o tratamento do POME e geração de biogás com elevado percentual de metano em sua composição.

**Palavras-chave:** POME; metano; biocombustível; energia renovável.

FERREIRA JUNIOR, Jozomar. **Treatment and biogas generation from effluent from palm oil production**. 2020. 64 p. Dissertation (Master's degree in Bioenergy) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

### ABSTRACT

The wastewater and waste generated during palm oil extraction process have a high energy potential and are being used in the renewable energies generation through various methods of use these co-products. Among the residues generated in this production system, there is the liquid effluent known as effluent from the extraction of palm oil or Palm Oil Mill Effluent - POME, characterized with a high polluting potential, in addition to excessive generation volumes due to the high water demand in this production chain, causing numerous impacts to the environment when disposed without prior and adequate treatment in receiving water bodies. To this end, the present study aimed to evaluate the treatment and the potential of biogas generation from the effluent from the production of palm oil of the species BRS Manicoré or hybrid palm, through the process of anaerobic digestion. The study was developed in two stages. In the first step, the best pH range (5, 6 and 7) was evaluated, as well as the best inoculum volume (10, 20 and 30%) for the treatment of effluent, using the statistical planning model Box-Behnken, observing a reduction above 29% of volatile solids following standards established by Standard Methods, at pH equal to 7 and volume of 30% of inoculum, under temperature of 35°C, during 15 days of incubation. In the second stage of the work, the potential for biogas generation using the BMP method was evaluated over 10 days of incubation in a BOD incubator with a temperature of 35°C, varying the inoculum volume (30, 40 and 50%) in pH equal to 7, observing the total volume of 339 mL of biogas using 30% of inoculum, presenting 65% of methane gas in the chemical composition of the biogas generated. In addition, the effluent showed a COD reduction of 47%. The study showed that the volume of 30% of inoculum at pH equal to 7 is the best range for the treatment of POME and the generation of biogas with a high percentage of methane in its composition.

**Key words:** POME; methane; biofuel; renewable energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Produtos e coprodutos a partir da extração do óleo de palma .....	15
<b>Figura 2</b> – Fluxograma do processo industrial de geração do POME .....	17
<b>Figura 3</b> – Etapas do processo da digestão anaeróbia .....	19
<b>Figura 4</b> – Reatores anaeróbios utilizados no experimento.....	37
<b>Figura 5</b> – Curva de valores previstos x observados nos tratamentos aplicados .....	47
<b>Figura 6</b> – Superfície de resposta resultante da otimização dos processos de tratamentos avaliados em termos de redução de sólidos voláteis (SV) .....	48
<b>Figura 7</b> – Geração diária de biogás a partir do efluente da extração do óleo de dendê. ....	50
<b>Figura 8</b> – Geração acumulada de biogás após 10 dias de incubação do POME em pH igual a 7 e temperatura igual a 35°C. ....	52
<b>Figura 9</b> – Percentual de gás metano na composição química do biogás gerado a partir dos tratamentos aplicados .....	53

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	– Matriz energética mundial em 2018 .....	12
<b>Tabela 2</b>	– Matriz energética brasileira em 2019 .....	13
<b>Tabela 3</b>	– Parâmetros físico-químicos do POME em cada etapa de geração .....	16
<b>Tabela 4</b>	– Grupos de bactérias e faixas de temperaturas para o seu desenvolvimento .....	20
<b>Tabela 5</b>	– Legislações estaduais brasileiras sobre lançamento de efluentes a partir do parâmetro DQO e eficiência de tratamento (%) .....	23
<b>Tabela 6</b>	– Gases que compõem o biogás e suas concentrações .....	26
<b>Tabela 7</b>	– Aplicação energética e volume de biogás produzido no Brasil em 2019 .....	27
<b>Tabela 8</b>	– Produção de biogás no Brasil conforme a origem do substrato .....	28
<b>Tabela 9</b>	– Reatores anaeróbios utilizados no tratamento do POME, eficiência e geração de gás metano.....	29
<b>Tabela 10</b>	– Métodos para determinação de parâmetros físico-químicos do POME.....	32
<b>Tabela 11</b>	– Variáveis e níveis do planejamento experimental para a primeira etapa .....	35
<b>Tabela 12</b>	– Matriz de planejamento experimental e modelo Box-Behnken .....	36
<b>Tabela 13</b>	– Planejamento experimental da segunda etapa do trabalho .....	38
<b>Tabela 14</b>	– Resultados das análises físico-químicas para caracterização do efluente líquido da extração do óleo de dendê – POME .....	41
<b>Tabela 15</b>	– Caracterizações de efluente da extração do óleo de palma aplicado no processo de digestão anaeróbia para a geração de biogás.....	44
<b>Tabela 16</b>	– Redução da DQO presente no POME a partir de cada tratamento aplicado após 10 dias de incubação .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABRAPALMA	Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APHA	American Public Health Association
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
ETE	Estação de tratamento de esgoto
IEA	International Energy Agency
LQB	Laboratório de química da biomassa e biocombustíveis
LPB	Laboratório de processos bioquímicos e biotecnologia
pH	Potencial hidrogeniônico
PF	Pressão do frasco
POME	Palm Oil Mill Effluent
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SF	Sólidos fixos
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TDH	Tempo de detenção hidráulica
TF	Temperatura do frasco
VGA	Volume de gás acumulado
VUF	Volume útil do frasco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1	COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL .....	12
1.2	PANORAMA SOBRE A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	13
1.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ÓLEO DE DENDÊ.....	14
1.4	EFLUENTE GERADO DURANTE A EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE DENDÊ .....	15
1.5	FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	18
1.5.1	Temperatura No Processo De Digestão Anaeróbia.....	20
1.5.2	Influência Do Ph No Processo De Digestão Anaeróbia.....	20
1.5.3	Tempo De Detenção Hidráulica (TDH).....	21
1.5.4	Relação Efluente/Inóculo (E/I).....	21
1.5.5	Teor De Água .....	22
1.5.6	Demanda Química De Oxigênio (DQO) .....	23
1.5.7	Teor De Sólidos Durante O Processo De Digestão Anaeróbia .....	24
1.6	CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	26
1.6.1	Geração De Biogás E Metano A Partir Do Efluente Da Extração Do Óleo De Dendê.....	28
1.7	OBJETIVOS.....	30
1.7.1	Objetivos Específicos .....	30
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	31
2.1	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
2.1.1	Análises Físico-Químicas Do Efluente Bruto.....	31
2.1.1.1	Demanda química de oxigênio .....	32
2.1.1.2	PH .....	33
2.1.1.3	Sólidos totais .....	33
2.1.1.4	Sólidos fixos .....	34
2.1.1.5	Sólidos voláteis.....	34
2.2	PRIMEIRA ETAPA DE EXPERIMENTOS.....	35
2.2.1	Planejamento Experimental E Modelo Box-Behnken .....	35
2.2.2	Avaliação Da Digestão Anaeróbia Pelo Monitoramento De Sólidos Voláteis.....	36
2.3	SEGUNDA ETAPA DE EXPERIMENTOS .....	37

2.3.1	Planejamento Experimental.....	38
2.3.2	Monitoramento Da Geração De Biogás.....	38
2.3.3	Determinação Da Composição Do Biogás Produzido .....	39
2.3.4	Avaliação De Redução Da Carga Orgânica Do Efluente A Partir Do Parâmetro DQO.....	40
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
3.1	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	41
3.2	PRIMEIRA ETAPA DE EXPERIMENTOS.....	44
3.3	AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	47
3.4	SEGUNDA ETAPA DE EXPERIMENTOS .....	49
3.4.1	Monitoramento Da Geração De Biogás.....	49
3.4.2	Determinação Da Composição Química Do Biogás .....	53
3.4.3	Avaliação De Redução Da Carga Orgânica Do Efluente Através Do Parâmetro DQO.....	54
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à elevada demanda energética mundial, associada ao crescimento industrial e populacional, a busca por fontes renováveis de energia torna-se indispensável para o desenvolvimento da sociedade atual. Diante disso, os biocombustíveis possuem elevado interesse econômico, social e ambiental.

O Brasil se destaca como um dos líderes mundiais no agronegócio e um setor que possui elevada representatividade na economia do estado do Pará é a agroindústria da produção do óleo de palma ou dendê (*Elaeis guineensis*) (SOUSA; MACEDO, 2019), uma palmácea que se destaca em relação às outras oleaginosas por ser a que possui a maior produtividade de óleo por área (MÜLLER; FURLAN JUNIOR; CELESTINO, 2006).

O óleo de dendê se apresenta como o óleo vegetal mais produzido e consumido em nível global (INDEXMUNDI, 2020), utilizado em diversas áreas industriais como alimentícia, farmacêutica e de cosméticos, sendo aplicado também na produção de biodiesel (SINGH, 2020).

Durante o processo de extração do óleo de dendê são gerados resíduos e efluentes que estão sendo avaliados e utilizados como matérias-primas para a produção de bioprodutos e biocombustíveis através de diversos métodos e processos físico-químicos e biológicos de aproveitamento e recuperação energética destes coprodutos (RIAZ; RHEE; PARK, 2021).

Entre os resíduos gerados durante a extração do óleo de palma, se tem o efluente líquido conhecido como POME - *Palm Oil Mill Effluent*, caracterizado com um elevado potencial poluidor, além de excessivos volumes de geração devido à alta demanda hídrica nesta cadeia produtiva, acarretando inúmeros impactos ambientais para o solo, recursos hídricos e biodiversidade quando disposto sem tratamento prévio e adequado no ambiente (ISKANDAR *et al.*, 2018).

Diante das diferentes tecnologias de tratamento de efluentes e resíduos agroindustriais, a digestão anaeróbia, processo realizado por microrganismos na ausência de oxigênio, se destaca por conciliar a redução da carga poluidora destes por meio da degradação de compostos orgânicos com o aproveitamento energético, através da produção de biogás, destacando-se pela viabilidade econômica e energética (CAMPELLO *et al.*, 2021).

O biogás resultante do processo de digestão anaeróbia contém o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) como componente predominante (50-70%), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (30-50%), além de outros gases como nitrogênio, oxigênio, monóxido de carbono, gás sulfídrico e outros, sendo que, o metano, se apresenta como um gás altamente energético, e após o biogás passar por processos de purificação para remoção de gases indesejáveis como  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$ , possui características combustíveis semelhantes às do gás natural, denominado como biometano, utilizado como biocombustível para conversão em energia elétrica, térmica ou mecânica (NGUYEN *et al.*, 2020).

Assim, o presente trabalho contempla avaliar o tratamento e o potencial de geração de biogás a partir do efluente líquido da extração do óleo de dendê híbrido, através do processo de digestão anaeróbia, conciliando o tratamento com o aproveitamento energético deste efluente através da produção de um biocombustível que é utilizado para a geração de energia renovável, agregando valor à cadeia produtiva do dendê.

### 1.1 COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

A energia assume papel de extrema importância para o desenvolvimento da sociedade atual. E o consumo mundial de energia aumenta cerca de 2% ao ano (MASON, 2017). A matriz energética mundial é composta principalmente por fontes não renováveis de geração de energia como o petróleo, carvão mineral e gás natural. Segundo o IEA - *International Energy Agency*, a matriz energética mundial no ano de 2018, se apresentava conforme Tabela 1.

**Tabela 1** - Matriz energética mundial em 2018.

Fonte de energia	(%)
Petróleo e derivados	31,5
Carvão	26,9
Gás natural	22,8
Biomassa	9,3
Nuclear	4,9
Hidráulica	2,5
Outros	2,0

Fonte: IEA (2020).

Sendo que a exploração e o consumo desenfreado destes combustíveis de origem fóssil são considerados como atividades potencialmente poluidoras e acarretam diversos impactos à saúde humana e ao meio ambiente (CHEN; WU, 2017).

Devido ao expressivo crescimento populacional e da atividade industrial, além do avanço tecnológico, que resultam num aumento significativo da demanda energética global, a busca por novas fontes de energia vem se intensificando gradativamente, e novos estudos têm sido realizados em relação às fontes alternativas e renováveis de geração de energia.

## 1.2 PANORAMA SOBRE A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A matriz energética brasileira consiste em 53,9% de fontes provenientes de origem não renovável e 46,1% de energias renováveis, representado basicamente por biomassa do setor sucroalcooleiro e hidroeletricidade (EPE, 2020), conferindo ao país posição entre os líderes mundiais na utilização de fontes alternativas de energia, conforme apresenta a Tabela 2.

**Tabela 2** - Matriz energética brasileira em 2019.

<b>Renováveis</b>	<b>(%)</b>	<b>Não renováveis</b>	<b>(%)</b>
Biomassa da cana	18,0	Petróleo e derivados	34,4
Hidráulica	12,4	Gás natural	12,2
Carvão e lenha vegetal	8,7	Carvão mineral	5,3
Outras renováveis	7,0	Urânio e outras	2,0

Fonte: EPE (2020).

A diversificação da matriz energética brasileira é de extrema importância para a expansão e consolidação das energias renováveis, além da redução da exploração e consumo de combustíveis fósseis, elevando a disponibilidade e segurança energética nacional, além de contribuir para o progresso do país em relação à preservação ambiental e desenvolvimento sustentável energético (SILVA SANTOS *et al.*, 2018).

### 1.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ÓLEO DE DENDÊ

O Brasil se fundamenta economicamente na agroindústria. Um setor que assume papel importante para a economia da região norte do Brasil, principalmente no estado do Pará, é a agroindústria do óleo de palma, ou óleo de dendê (OLIVEIRA ALVES, 2011). Devido aos fatores climáticos favoráveis desta região para a produção desta palmácea como elevada incidência solar e umidade, além de precipitação pluviométrica sem déficits hídricos e qualidade do solo adequada (ABRAPALMA, 2018; VENTURIERI *et al.*, 2013).

A Indonésia e a Malásia são os maiores produtores de óleo de palma, responsáveis por cerca de 90% da produção mundial em 2020, com produção de mais de 43 e 19 milhões de toneladas, respectivamente. Sendo o décimo lugar ocupado pelo Brasil, com mais de 540 mil toneladas de óleo produzido, que juntamente com outros países como Colômbia e Tailândia estão emergindo neste ramo agroindustrial (INDEXMUNDI, 2020).

O dendezeiro (*Elaeis guineensis*) é uma palmeira originária da África, já a espécie (*Elaeis oleífera*) é de origem Sul-Americana, também denominado de Caiaué. A Embrapa Amazônia Oriental (Manaus/AM) desenvolveu uma espécie de dendê híbrido, a partir do cruzamento, ou hibridação interespecífica entre estas duas espécies mencionadas, obtendo o chamado BRS Manicoré, que apresenta vantagens em relação à produtividade, resistência a pragas e ao amarelecimento fatal, além de porte baixo, que facilita a colheita manual dos cachos (HOMMA, 2016).

O dendê híbrido desenvolvido pela Embrapa encontra-se entre os três únicos lançados no mundo entre o cruzamento do caiaué e o dendezeiro africano (RIOS *et al.*, 2012).

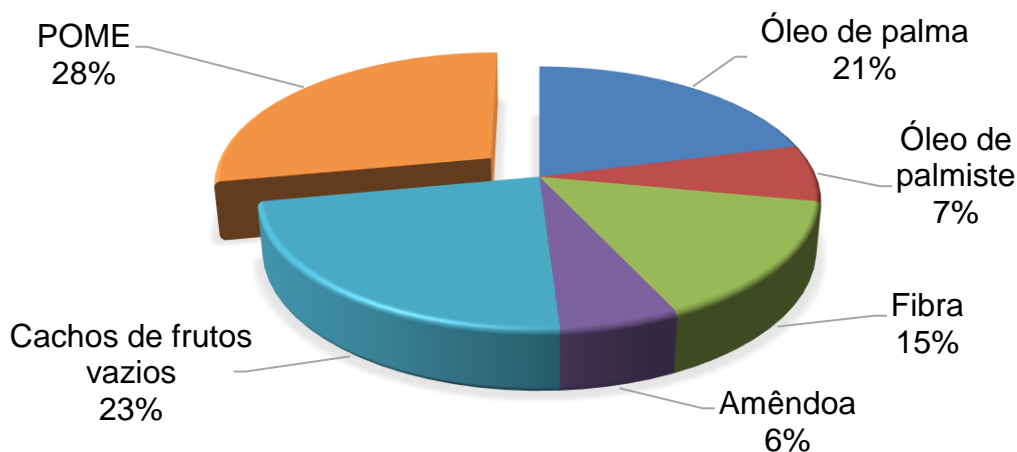
O dendê é considerado a oleaginosa que apresenta o maior potencial de produção de óleo por área, podendo chegar a 6 toneladas de óleo por hectare ano<sup>-1</sup> e expressa inúmeras vantagens ambientais e energéticas, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e socioeconômico local, regional e mundial (HOMMA; FURLAN, 2001).

Do fruto do dendê, são extraídos dois tipos de óleo vegetal, de palma e palmiste, da polpa e da amêndoa, respectivamente. O óleo de palma é o óleo comestível mais produzido e consumido mundialmente, utilizado como matéria-prima na indústria alimentícia e farmacêutica, já o óleo de palmiste é utilizado principalmente

na indústria de cosméticos, sendo ambos, utilizados também na produção de biodiesel (HARSONO; GRUNDMANN; SOEBRANTO, 2014).

A Figura 1 apresenta o percentual de geração de cada produto e coproduto a partir da extração de uma tonelada de cachos de frutos frescos.

**Figura 1** - Produtos e coprodutos gerados a partir da extração do óleo de palma.



Fonte: (ZHANG *et al.*, 2019)

O setor agroindustrial do óleo de dendê merece destaque nos últimos anos devido à elevada demanda global por óleos vegetais em substituição da gordura animal. O avanço de tecnologias de produção com custos reduzidos, entre outros, são aspectos que estimulam a ampliação deste setor (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

Devido ao aumento expressivo da população e da demanda global por alimentos, além da busca por fontes alternativas de energia, a produção deste óleo tende a aumentar significativamente acarretando elevadas gerações de resíduos deste sistema produtivo (AHMED *et al.*, 2015; VILLELA, 2014).

Os resíduos e efluentes oriundos da extração de óleo de dendê quando descartados de forma indevida no meio ambiente, sem tratamento e disposição final adequada, acarreta diversos impactos ao meio aquático, solo e biodiversidade. Sendo que, os resíduos gerados neste sistema produtivo estão sendo avaliados e reutilizados para a geração de energias renováveis e biocombustíveis (ISKANDAR *et al.*, 2018).

#### 1.4 EFLUENTE GERADO DURANTE A EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE DENDÊ

O efluente da extração do óleo de dendê ou palma – POME apresenta um alto potencial poluidor devido sua elevada carga orgânica, sendo que sua composição e

características físico-químicas variam conforme a planta de processamento, condições e uso do solo, plantio e manejo da matéria-prima utilizada, entre outros (CORATO *et al.*, 2018). Além disso, quanto mais avançado e desenvolvido tecnologicamente o processo produtivo, maior será o rendimento de extração do óleo e conseqüentemente menor será a carga poluidora do efluente gerado (MADAKI; SENG, 2013).

O POME é um líquido viscoso, comumente de coloração marrom escuro que apresenta características como pH ácido (4 - 5) e elevadas temperaturas no final do processo (80 - 90° C), alto valor de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além de altas concentrações de óleos e graxas, entre outras que conferem uma potencial carga poluidora a este efluente (AHMAD; SUMATHI; HAMEED, 2006).

O efluente do óleo de dendê é gerado durante três etapas do processo de extração: esterilização dos cachos (0,9 ton), hidrociclone (0,1 ton) e clarificação, sendo esta última, responsável pela maior geração do efluente, aproximadamente 1,5 toneladas para cada tonelada de óleo bruto produzido (AHMED *et al.*, 2015). Conforme o exemplo que apresenta a Figura 2, bem como as características físico-químicas do POME gerado em cada etapa do processo, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3** - Parâmetros físico-químicos do POME em cada etapa de geração.

Parâmetros	Esterilização	Hidrociclone	Clarificação
DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	47.000	15.000	64.000
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	23.000	5.000	29.000
Sólidos dissolvidos (mg L <sup>-1</sup> )	34.000	100	22.000
Sólidos em suspensão (mg L <sup>-1</sup> )	5.000	7.000	23.000
Nitrogênio total (mg L <sup>-1</sup> )	500	100	1.200
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	4.000	300	7.000
pH	5,0	-	4,5

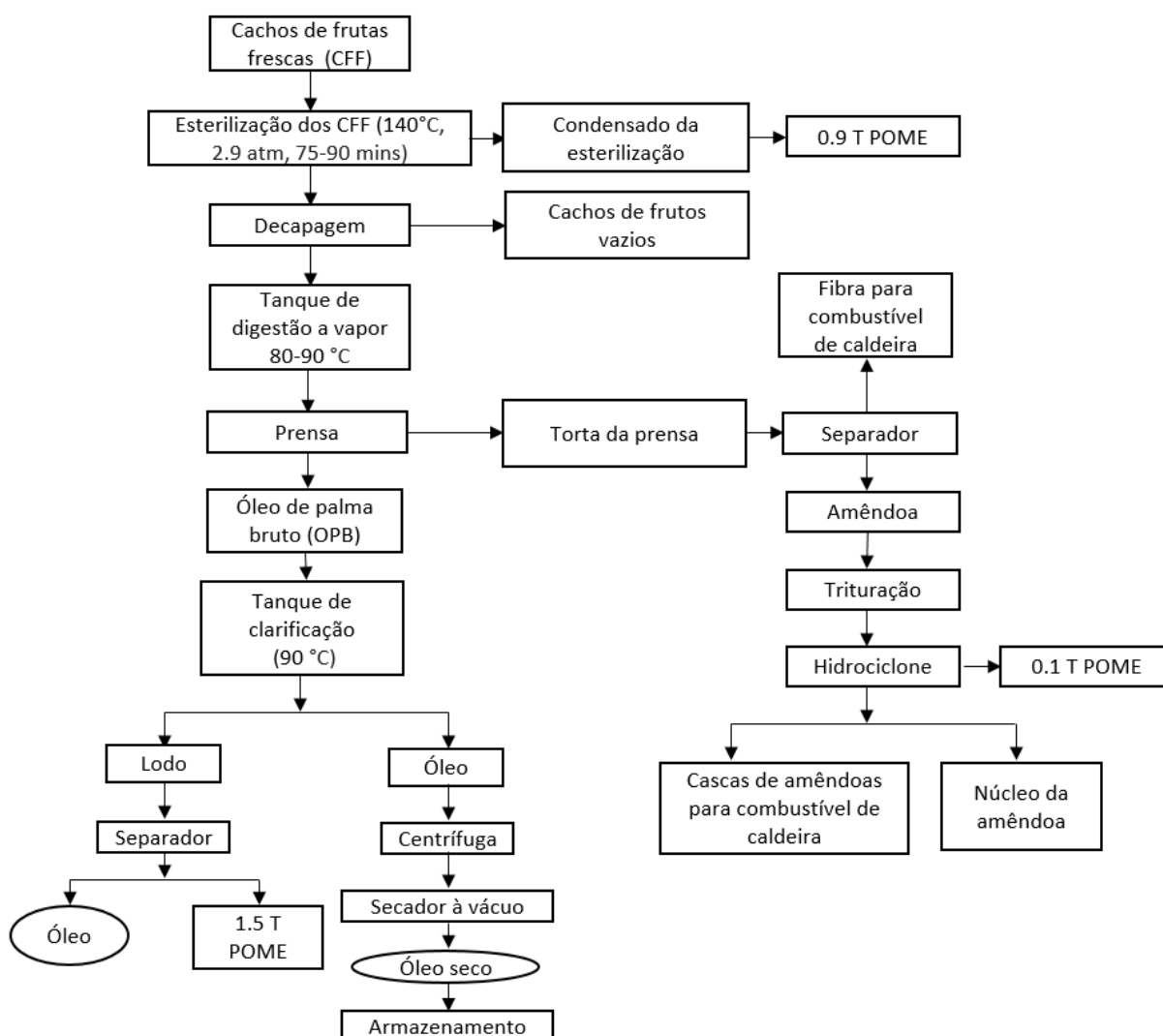
Fonte: (AHMED *et al.*, 2015).

Atualmente, o tratamento do POME é realizado por processos biológicos como lagoas anaeróbias, aeradas e facultativas, coagulação, floculação e filtração, entre outros, para posterior descarte em corpos hídricos receptores (AHMAD; SUMATHI; HAMEED, 2006). No entanto, estas metodologias não se apresentam eficientes com relação à redução da carga orgânica do efluente e atendimento aos valores máximos

permissíveis estipulados pela legislação (ISKANDAR *et al.*, 2018). Sendo necessária aplicação de sistemas de tratamento integrados que combinam dois ou mais processos como biológicos anaeróbios e aeróbios, físico-químicos e filtração, processos avançados como membranas, adsorção e outros métodos (SAAD; WIRZAL; PUTRA, 2021; CHENG *et al.*, 2021).

Em relação à legislação nacional sobre efluentes, foi estabelecida a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), complementada e alterada pela Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (BRASIL, 2011).

**Figura 2** - Fluxograma do processo industrial de extração do óleo de dendê e geração do POME a partir de 1 tonelada de cachos de frutas frescas (CFF).



Fonte: (Ahmed *et al.*, 2015, tradução nossa)

Dessa forma, torna-se indispensável o tratamento e disposição final adequada deste efluente para atender os valores estipulados pela legislação vigente, além de minimizar impactos ambientais principalmente aos recursos hídricos.

Diante disso, pesquisas recentes estão sendo realizadas na utilização de reatores anaeróbios ou biodigestores, os quais apresentam diferentes configurações e formas de operação, para o tratamento e produção de biogás a partir do POME por meio do processo de digestão anaeróbia, para posteriormente ser encaminhado a outros processos de tratamento de efluentes e finalmente descartado em corpos hídricos (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018; OHIMAIN; IZAH, 2016).

## 1.5 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é o processo de decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Consiste em um processo bioquímico, pela ação de microrganismos, por meio de interações enzimáticas e metabólicas, na qual populações bacterianas interagem estreitamente para converter compostos orgânicos em efluente líquido com reduzida carga orgânica, resíduo sólido (lodo) estabilizado e um conjunto de gases denominado biogás (EDUARDO de SOUZA, 1984).

A matéria orgânica é constituída principalmente por compostos como carboidratos, proteínas e lipídeos que podem ser degradados em compostos mais simples por microrganismos em situação de anaerobiose a partir das seguintes etapas que contemplam o processo de digestão anaeróbia: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 2007).

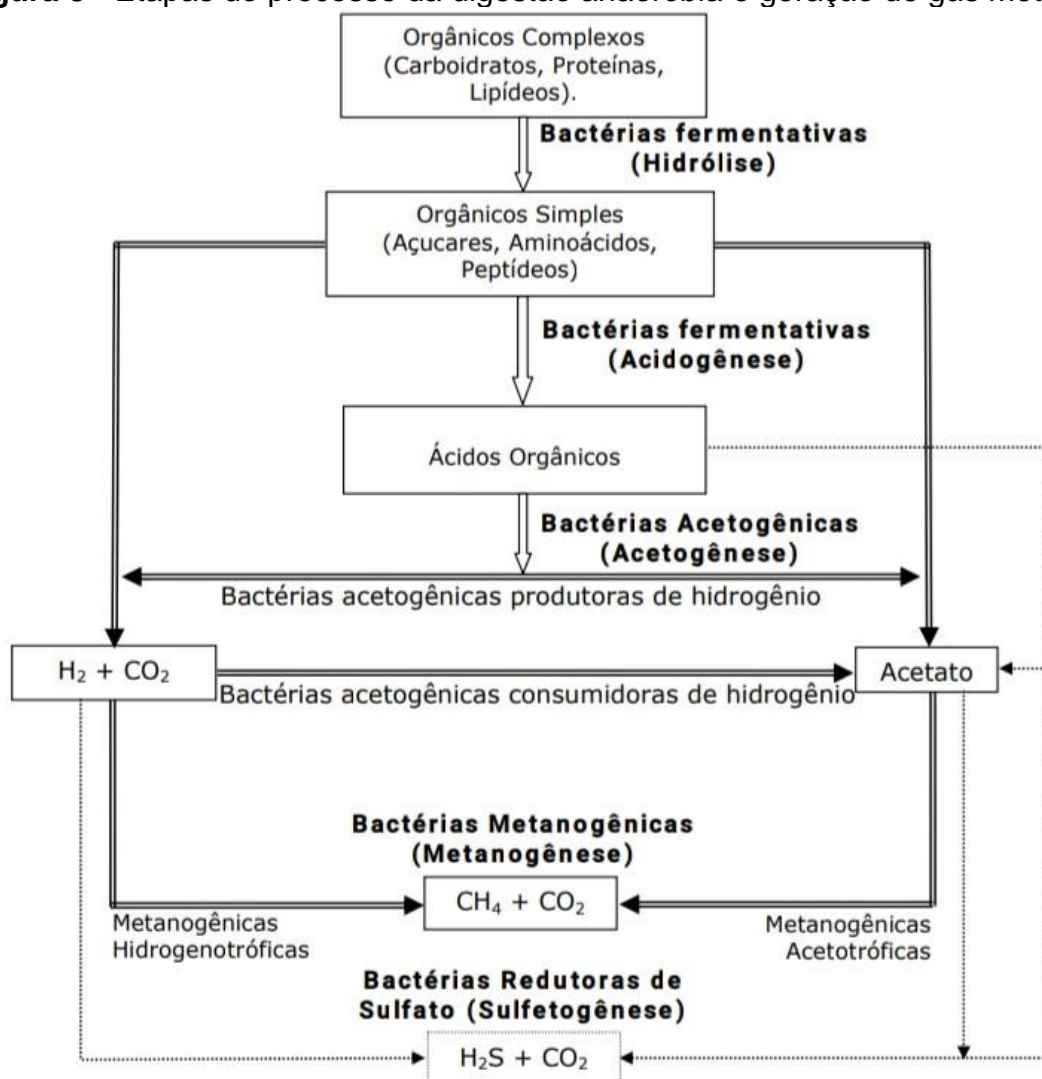
A hidrólise é a etapa onde ocorre a quebra das ligações de moléculas complexas com alto peso molecular em compostos solúveis, pela ação das bactérias hidrolíticas, sendo que a velocidade de degradação é dependente de diversos fatores, como o tipo de substrato, pH do meio reacional, temperatura e outros. Na acidogênese os produtos da hidrólise passam por processo fermentativo gerando ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, óxidos de nitrogênio e outros como acetato, amônia e dióxido de carbono (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

As reações na etapa de acetogênese são em geral endotérmicas onde ocorre a formação de ácidos com um ou dois átomos de carbono na cadeia, como ácido acético e fórmico, além de hidrogênio e dióxido de carbono que são os substratos para a metanogênese (COELHO *et al.*, 2018).

Na metanogênese ocorre a formação de gás metano, processo exotérmico que acontece através de duas vias metabólicas, as metanogênicas acetoclásticas (*methanosarcina*) produzem metano a partir do acetato gerado na acetogênese, já as bactérias metanogênicas hidrogenotróficas (*methanobacterium e methanospirillum*) a partir do hidrogênio e dióxido de carbono (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Ocorre também o processo da sulfetogênese onde há produção de sulfeto de hidrogênio, a partir da redução de sulfatos (Figura 3).

Por ser um processo complexo de reações bioquímicas, realizadas por diversas comunidades de bactérias, que trabalham em consórcio para realizar cada etapa do processo em equilíbrio com a outra, o sucesso da digestão anaeróbia é dependente de parâmetros e condições ambientais favoráveis para o desenvolvimento destas espécies bacterianas (NURLIYANA *et al.*, 2015; TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

**Figura 3** - Etapas do processo da digestão anaeróbia e geração de gás metano.



Fonte: (CHERNICHARO, 2007).

### 1.5.1 Temperatura no processo de digestão anaeróbia

A temperatura influencia a cinética do metabolismo das reações e a velocidade de crescimento dos microrganismos, ou seja, a dinâmica populacional do processo de biodegradação, além de contribuir na eliminação de organismos patogênicos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

É um parâmetro que afeta diretamente a eficiência do processo, devido à presença de espécies bacterianas específicas em cada faixa de temperatura (TANIKKUL *et al.*, 2016). Além disso, mudanças bruscas nas faixas ideais de temperatura podem prejudicar o processo de digestão anaeróbia, comprometendo a produção e as características do biogás gerado como a presença de gás metano (CHOORIT; WISARNWAN, 2007).

Os grupos de comunidades bacterianas são relacionados de acordo com a faixa de temperatura do processo, conforme apresenta a Tabela 4.

**Tabela 4** - Grupos de bactérias e faixas de temperaturas para o seu desenvolvimento.

<b>Grupo</b>	<b>Temperatura</b>
Psicrofílicos	inferior a 20°C
Mesofílicos	de 20 - 45°C
Termofílicos	de 45 - 60°C

**Fonte:** (Coelho *et al.*, 2018).

No estudo realizado por Trisakti e colaboradores (2017), foi verificado o tratamento do POME através da digestão anaeróbia, sendo avaliada a influência da temperatura no processo, observando uma redução de sólidos voláteis no valor de 51% em condições mesofílicas (30-42°C) e 67% para faixas termofílicas (43-55°C). Evidenciando a influência deste parâmetro, bem como a importância de seu controle e monitoramento no processo de tratamento de efluentes a partir da digestão anaeróbia.

### 1.5.2 Influência do pH no processo de digestão anaeróbia

Assim como na temperatura, o pH também apresenta faixas ótimas que podem variar conforme as comunidades de bactérias presentes. Nas primeiras etapas da

digestão anaeróbia, prevalece um pH de valor entre 6 e 7, devido à formação de compostos orgânicos voláteis, já nas etapas seguintes, um pH mais próximo da neutralidade (7) é predominante, onde há presença de bactérias metanogênicas produtoras de metano, que apresentam de forma geral, faixa ótima de pH entre 6,8 e 7,2 sendo que, valores muito distintos e fora desta faixa podem prejudicar ou mesmo inibir o processo de digestão anaeróbia e geração de biogás e metano (CHERNICHARO, 2007).

### 1.5.3 Tempo de detenção hidráulica (TDH)

Apresenta-se como o período suficiente para a decomposição da matéria orgânica, ou o tempo de permanência de um efluente ou resíduo (substrato) dentro do biodigestor (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). As comunidades bacterianas necessitam de um período de aclimatação do meio para início do processo fermentativo e adaptação dos agentes envolvidos para que possam se desenvolver (COELHO *et al.*, 2018).

Malakahmad e Lahin (2014) avaliaram o tratamento de POME a partir da digestão anaeróbia, operando com tempo de detenção hidráulica de 4 e 6 dias, observando redução de 79 e 83% de DQO, respectivamente. Além disso, a literatura aborda elevadas produções de biogás nos primeiros dias de digestão anaeróbia através de diversos resíduos e efluentes orgânicos. Isto ocorre devido ao fato de compostos orgânicos mais suscetíveis à biodegradação presentes no substrato (PARAWIRA *et al.*, 2004).

### 1.5.4 Relação efluente/inóculo (E/I)

Indica a relação de matéria-prima utilizada como substrato com o concentrado de microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica. A quantidade de nutrientes tem que estar balanceada com a proporção de microrganismos (AMANI *et al.*, 2010).

As características físico-químicas do substrato interferem no processo de digestão anaeróbia como por exemplo materiais lignocelulósicos, os quais são mais resistentes ao processo de hidrólise, necessitando muitas vezes de um pré-tratamento

para posteriormente ser encaminhado à biodigestão (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

Além disso, a origem do inóculo se apresenta como um fator determinante no processo de digestão anaeróbia de efluentes e resíduos orgânicos, como no estudo realizado por Nabarlatz e colaboradores (2013) que avaliaram o tratamento de POME a partir da digestão anaeróbia durante 20 dias de reação em pH igual a 7 e temperatura de  $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ , utilizando reatores de bancada com 300 mL de volume de operação. Observando uma redução de sólidos voláteis de 13,4% quando utilizado uma relação de E/I de (50/50) avaliando inóculo proveniente de reator anaeróbio de ETE municipal, e 35,8% ao avaliar a mesma relação E/I com inóculo oriundo de biodigestor da suinocultura. Verificando a importância da origem do inóculo utilizado para o tratamento do efluente da extração do óleo de dendê a partir do processo de digestão anaeróbia devido a diferença significativa dos dados observados.

#### 1.5.5 Teor de água

Para a digestão anaeróbia de efluentes líquidos, torna-se indispensável o teor de água acima de 60% para uma efetiva degradação de compostos orgânicos e conseqüentemente, elevada produção de biogás com altos teores de gás metano em sua composição (COELHO *et al.*, 2018). Além disso, a USEPA (1991) recomenda uma faixa de 60 a 90% de teor de água para a digestão anaeróbia, uma vez que, a movimentação de nutrientes e substratos, além do transporte de enzimas durante o processo de biodigestão é totalmente dependente deste parâmetro que exerce papel fundamental na eficiência e velocidade de degradação de compostos orgânicos, influenciando diretamente o tratamento do efluente e conseqüentemente a geração de biogás.

O teor de água em efluentes da extração de óleo de palma, varia de acordo com diversos fatores como espécie de dendê, manejo e cultivo, condições climáticas, além da tecnologia do processo produtivo de extração do óleo, bem como a utilização de água no processo, que são essenciais nas características físico-químicas do óleo produzido bem como do efluente final gerado (MADAKI; SENG, 2013).

### 1.5.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Parâmetro que está relacionado às características do substrato utilizado para o processo de digestão anaeróbia, sendo que, um resíduo ou efluente com valores elevados de DQO necessitam de alternativas como um pré-tratamento, devido às bactérias serem suscetíveis à altas cargas orgânicas (CHERNICHARO, 2007).

A DQO é um parâmetro amplamente utilizado no controle e monitoramento da qualidade de águas e efluentes, por ser uma análise química que mede a quantidade de matéria orgânica existente em uma amostra líquida com resposta rápida e de baixo custo, indicando o potencial poluidor do efluente analisado (VALENTE; PADILHA; SILVA, 1997). Porém, não se encontra estipulada na legislação nacional vigente, CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011).

O valor de DQO no Brasil para lançamento de efluentes, varia conforme a legislação de cada estado. O Instituto Ambiental do Paraná (IAP) atual Instituto Ambiente e Terra (IAT), por meio da Resolução nº 021 de 2009, da Secretaria de Meio Ambiente (SEMA), estabelece o padrão de 225 mg L<sup>-1</sup> de DQO em relação aos efluentes líquidos a serem lançados em corpos de água podendo este valor ser alterado conforme a origem industrial do efluente e a classe do corpo hídrico receptor (PARANÁ, 2009).

É possível verificar através da Tabela 5 as legislações estaduais e seus respectivos valores de DQO para o lançamento de efluentes em corpos hídricos receptores. Já os estados do Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Pernambuco, abordam também a eficiência (%) em termos de DQO que as estações e processos de tratamento de efluentes têm que cumprir para o descarte final adequado destes. Não sendo observado valores para o estado do Pará, um dos estados Brasileiros que mais gera efluente da extração de óleo de dendê.

**Tabela 5** - Legislações estaduais brasileiras sobre lançamento de efluentes a partir do parâmetro DQO e eficiência de tratamento (%).

Estado	Legislação vigente	DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	Eficiência (%)
Paraná	Resolução SEMA nº 21/2009	200 - 225 <sup>(a)</sup>	-
Rio Grande do Sul	Resolução CONSEMA nº 355/2017	150 - 330 <sup>(b)</sup>	90 - 95 <sup>(b)</sup>

Rio de Janeiro	Deliberação CECA nº 4887/2007	150 - 450 <sup>(b)</sup>	-
Minas Gerais	Deliberação Copam/CERH nº 01/2008	180 - 250 <sup>(a)</sup>	55 - 75 <sup>(a)</sup>
Mato Grosso	Resolução CONSEMA nº 55/2012	120 <sup>(c)</sup>	-
Goiás	Resolução CG nº 068/2009	450 <sup>(c)</sup>	-
Rondônia (Porto Velho)	Resolução COMDEMA nº 04/2016	150 <sup>(c)</sup>	-
Amazonas (Manaus)	Resolução COMDEMA nº 34/2012	100 - 150 <sup>(a)</sup>	-
Alagoas	Decreto Estadual nº 6.200/1985	150	-
Ceará	Resolução COEMA nº 02/2017	200 - 600 <sup>(b)</sup>	-
Pernambuco	Norma Técnica CPRH nº 2001 e 2002/2003	60 - 360 <sup>(d)</sup>	60 - 90 <sup>(a)</sup>

**Fonte:** Adaptado de Moraes; Bezerra (2017).

<sup>(a)</sup>: varia conforme o tipo de indústria.

<sup>(b)</sup>: varia conforme a vazão do corpo hídrico receptor.

<sup>(c)</sup>: para ETE municipal.

<sup>(d)</sup>: varia conforme a carga orgânica.

É possível observar variações de DQO entre 60 e 600 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>, bem como os diversos fatores que interferem nos valores estipulados pelas respectivas normas, como tipo de empreendimento, características do rio que irá receber o efluente, além da carga orgânica da fonte emissora. O que implica a necessidade de se estabelecer padrões mínimos a nível nacional levando em consideração aspectos como as características físico-químicas do efluente a ser lançado, tipo da indústria, carga orgânica, local, classe do recuso hídrico receptor e outros. Além da eficiência de tratamento que é abordada por apenas três estados brasileiros.

#### 1.5.7 Teor de sólidos durante o processo de digestão anaeróbia

A presença de sólidos no processo de digestão anaeróbia é um parâmetro que varia conforme as características físico-químicas do efluente ou resíduo orgânico utilizado como substrato para a biodigestão. Sendo que, elevadas concentrações de sólidos interferem de tal modo que podem inibir o processo de conversão da matéria orgânica em biogás (EDUARDO de SOUZA, 1984).

O teor de sólidos influencia na escolha da tecnologia a ser utilizada para o processo de digestão anaeróbia, como os biodigestores com agitação contínua,

também denominados de CSTR – *Continuos Stirred Tank Reactor*, os quais suportam elevadas concentrações de sólidos presentes no POME para o processo de biodigestão (KHEMKHAO; TECHKARNJANARUK; PHALAKORNKULE, 2015).

Além disso, o tamanho das partículas também interfere no processo de biodigestão, uma vez que, quanto menor o tamanho destas, maior contato da matéria orgânica com as bactérias, além de contribuir para a fermentação devido à área superficial da partícula, acelerando o tempo de degradação e conseqüentemente maior eficiência no tratamento do substrato avaliado e geração de biogás (EDUARDO de SOUZA, 1984).

Os sólidos totais (ST) representam todos os sólidos compreendidos entre os sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV). Os sólidos fixos correspondem ao teor de sólidos que ficam retidos numa amostra após calcinação a 550°C, que representam os sólidos inorgânicos presentes na amostra, também denominado de resíduo fixo (PIVELI, 2005).

Já os sólidos voláteis representam a fração orgânica que volatiliza de uma amostra após calcinação a 550°C da mesma. Este parâmetro é usualmente utilizado no controle de processos biológicos de tratamento de efluentes e geração de biogás, pelo fato de expressar a matéria orgânica de uma amostra, expressando o potencial de biogás que pode ser gerado devido ao seu potencial de biodegradabilidade. Por este motivo, quanto maior o valor de sólidos voláteis presentes numa amostra, de acordo com o seu valor de sólidos totais, maior a fração orgânica presente neste substrato e conseqüentemente maior possibilidade de esta ser utilizada no processo de digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007).

Outros parâmetros como velocidade de agitação e relação carbono/nitrogênio, exercem papel fundamental na eficiência do processo de digestão anaeróbia, assim como a presença de metais pesados e compostos tóxicos, entre outros agentes inibidores, como o teor de óleos e graxas, onde elevadas concentrações destes compostos podem prejudicar o equilíbrio do processo de biodigestão (MAO *et al.*, 2015).

Diante disso, efluentes da extração de óleo de dendê merecem uma atenção especial no que diz respeito ao teor de óleos e graxas, uma vez que, a agroindústria deve obter o maior rendimento possível na extração do óleo, para que não seja observada elevadas concentrações deste parâmetro no efluente final do processo de produção, visto que, prejudica o processo de biodigestão, além de inibir o processo

de conversão da matéria orgânica em biogás, sendo necessário tratamento prévio para separação do óleo como por exemplo caixas de gordura, separadores tipo decanter e flotadores por ar dissolvido (PIVELI, 2005).

Como o processo de digestão anaeróbia engloba o tratamento de efluentes e resíduos orgânicos com a geração de energia renovável, através da produção de biogás, este se enquadra no conceito de biorrefinaria, o qual tem por objetivo integrar processos de conversão e aproveitamento de coprodutos agroindustriais através de diferentes métodos físicos, químicos e biológicos de recuperação energética, e aplicação em diversas áreas como na produção de bioprodutos e biocombustíveis, otimizando os recursos e minimizando impactos, além de se obter lucro (SAWATDEENARUNAT *et al.*, 2016).

## 1.6 CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa combustível, produzido pela decomposição bioquímica da matéria orgânica, por grupos específicos de microrganismos na ausência de oxigênio molecular, em condições ambientais favoráveis e específicas para um efetivo desenvolvimento deste processo (COELHO *et al.*, 2018; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Apresentando-se como uma fonte renovável de geração de energia, permitindo ainda, que o efluente final seja reutilizado como biofertilizante na agricultura (LIN *et al.*, 2018).

A composição do biogás varia conforme diversos parâmetros operacionais e características como o tipo de substrato utilizado, volume de inóculo e condições da digestão anaeróbia, sendo constituído basicamente por metano, dióxido de carbono, e uma mistura de gases como sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, monóxido de carbono, hidrogênio e outros (ZHANG; HU; LEE, 2016), conforme mostra a Tabela 6, a composição típica observada no biogás.

**Tabela 6** - Gases que compõem o biogás e suas concentrações.

Gás	Fórmula	Concentração média
Metano	CH <sub>4</sub>	50 - 70%
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	40 - 60%
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	2 - 5%

Oxigênio	O <sub>2</sub>	0,1 - 1,0%
Sulfeto de hidrogênio	H <sub>2</sub> S	0 -700 ppm
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	0 - 0,2%
Monóxido de carbono	CO	0 - 0,2%

**Fonte:** (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993).

As vantagens relacionadas ao biogás incluem a mitigação e redução de impactos ambientais causados por resíduos orgânicos através do processo de digestão anaeróbia, além de ser um combustível limpo devido suas características renováveis, podendo ampliar as fontes de geração de energia alternativa em relação à matriz energética nacional (CHEN; WU, 2017; SILVA SANTOS *et al.*, 2018).

O biogás pode ser utilizado através de diferentes formas de aproveitamento energético, sendo que os processos de purificação irão depender da finalidade deste biocombustível, podendo ser empregado na forma de combustível veicular, injeção em redes de gás natural, geração de energia elétrica, queima para geração de calor, entre outros (ZHANG; HU; LEE, 2016).

Em relação ao biogás produzido no Brasil através de diversas plantas de operação, a partir das aplicações energéticas no ano de 2019, cerca de 86% da produção anual foi destinada para a geração de energia elétrica e apenas 3% foi utilizado como biometano, conforme Tabela 7.

**Tabela 7** - Aplicação energética e volume de biogás produzido no Brasil em 2019.

<b>Aplicação energética do biogás</b>	<b>Quantidade de plantas</b>		<b>Volume de biogás (Nm<sup>3</sup>/ano)</b>	
Energia elétrica	439	84%	1.168.138.811	86%
Energia térmica	70	14%	132.094.572	10%
GNR/Biometano	6	1%	37.739.175	3%
Energia mecânica	6	1%	7.526.112	1%

**Fonte:** CIBiogás (2020).

Para ser enquadrado como biometano, o biogás necessita passar por processos de purificação para que gases como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S sejam removidos, para aumentar o poder calorífico deste. Sendo que diferentes métodos de tratamento químico e biológico são empregados variando conforme o uso final deste biocombustível (COELHO *et al.*, 2018; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) através da Resolução nº 8/2015, especifica parâmetros relacionados ao biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrosilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações comerciais e residenciais (ANP, 2015), bem como a Resolução nº 685/2017, estabelece as regras para aprovação do controle de qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgotos destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais (ANP, 2017).

De modo geral, as origens dos substratos utilizados para a produção de biogás são classificadas em três grupos: agropecuária; indústria; aterro sanitário, ou seja, a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e estação de tratamento de esgoto (ETE).

A Tabela 8 apresenta o total de plantas de produção de biogás no Brasil no ano de 2019. Sendo possível observar que mesmo com 80% do total das plantas, o setor agropecuário contribui com apenas 12% da produção total anual de biogás.

**Tabela 8** - Produção de biogás no Brasil conforme a origem do substrato.

Origem do substrato	Quantidade de unidades		Volume de biogás (Nm <sup>3</sup> /ano)	
Agropecuária	426	80%	165.112.571	12%
Indústria	62	12%	153.858.569	12%
RSU e ETE	43	8%	1.026.527.529	76%

Fonte: CIBiogás (2020).

#### 1.6.1 Geração de biogás e metano a partir do efluente da extração do óleo de dendê

Diversos trabalhos evidenciam a utilização do processo de digestão anaeróbia para o tratamento e geração de biogás e metano a partir de efluente da extração do óleo de palma. Os países asiáticos lideram a produção do óleo de palma, e conseqüentemente a geração de POME. Com isto, os estudos voltados para esta temática, se concentram nesta região (ZHANG *et al.*, 2019).

Wang e colaboradores (2015) avaliaram a produção de biogás a partir de efluente da extração do óleo de dendê a partir do processo de digestão anaeróbia, em reator expandido de lodo granular com alimentação contínua em escala piloto, a partir do tempo de detenção hidráulica de 9,8 dias, obtendo um volume de 27 m<sup>3</sup> de biogás para cada m<sup>3</sup> de efluente tratado.

A Tabela 9 apresenta trabalhos relacionados ao tratamento e geração de gás metano a partir do efluente da extração do óleo de palma, através de diferentes tipos de reatores anaeróbios que utilizam o processo de biodigestão e seus respectivos valores de eficiência de remoção de DQO, porcentagem de metano gerado e tempo de detenção hidráulica.

**Tabela 9** - Reatores anaeróbios utilizados no tratamento do POME, eficiência e geração de gás metano.

Reatores anaeróbios	Remoção de DQO (%)	CH <sub>4</sub> (%)	TDH <sup>(e)</sup> em dias	Referência
Filtração anaeróbia	73	57	7	(VIJAYARAGHAVAN; AHMAD, 2006)
UASB <sup>(a)</sup>	65	58	5	FANG <i>et al.</i> (2011)
EGSB <sup>(b)</sup>	53	59	5	FANG <i>et al.</i> (2011)
CSTR <sup>(c)</sup>	77	63	8	IRVAN <i>et al.</i> (2012)
CSTR <sup>(c)</sup>	83	70	7	(POH; CHONG, 2010)
UASFF <sup>(d)</sup>	80	56	6	ZINATIZADEH <i>et al.</i> , (2006)

Fonte: Adaptado de AHMED *et al.* (2015).

(a): UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket;

(b): EGSB – Expanded Granular Sludge Bed;

(c): CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor;

(d): UASFF – Upflow Anaerobic Sludge Fixed Film;

(e): TDH – Tempo de Detenção Hidráulica.

É possível observar que diferentes reatores anaeróbios utilizados apresentam valores semelhantes de remoção de DQO na faixa de 50 - 80%, com concentrações de metano em média 60%, bem como no intervalo de 5 - 8 dias de tempo de detenção hidráulica para o processo de digestão anaeróbia no tratamento e geração gás metano a partir do efluente POME.

Diversos aspectos demonstram os benefícios ambientais e energéticos que podem ser obtidos através do biogás e metano produzidos pela digestão anaeróbia.

Porém, estudos são necessários para otimização do processo no tratamento e geração de biogás, visando aumento da produção com elevados teores de metano

em sua composição, além de eficiência do tratamento na redução da carga orgânica do efluente. Destacando a importância do presente trabalho, bem como a necessidade de outros estudos relacionados ao tema, além de ferramentas técnicas, políticas públicas, linhas de crédito e de incentivo para expandir a utilização dessa fonte alternativa de geração de energia na matriz energética nacional.

## 1.7 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral, avaliar o tratamento e o potencial de geração de biogás a partir do efluente da extração do óleo de dendê híbrido através do processo de digestão anaeróbia.

### 1.7.1 Objetivos Específicos

- Analisar as características físico-químicas do POME de dendê híbrido;
- Determinar a melhor faixa de pH e volume de inóculo para o tratamento do efluente a partir do modelo de planejamento experimental Box-Behnken;
- Determinar o volume de biogás gerado a partir do POME durante a digestão anaeróbia;
- Verificar o percentual de gás metano na composição do biogás gerado;
- Avaliar a redução da carga orgânica do efluente após os tratamentos a partir do parâmetro DQO.

## 2 METODOLOGIA

A parte experimental deste trabalho foi realizada em duas etapas: A primeira etapa de experimentos foi executada nos Laboratórios de Processos Bioquímicos (LPB) e Química da Biomassa e Biocombustíveis (LQB) da EMBRAPA Agroenergia, Brasília (DF), para estabelecer condições mais favoráveis no processo de digestão anaeróbia do POME, como faixa de pH do meio e volume de inóculo a ser utilizado.

A segunda etapa de experimentos foi realizada no Laboratório de Química da Biomassa, Biocombustíveis e Bioenergia (LaQuiBio) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina (PR), para determinar o potencial de geração de biogás, assim como, o percentual de metano na mistura de gases durante o período de incubação do efluente.

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O POME e o inóculo, foram fornecidos pela empresa DENPASA – Dendê do Pará S/A localizada no município de Santa Bárbara do Pará, PA. O efluente líquido é proveniente de processamento do dendê híbrido, BRS Manicoré, que é uma cultivar desenvolvida pela EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias a partir do cruzamento entre o dendezeiro de origem africana (*Elaeis guineensis*) e o dendezeiro originário da região Amazônica caiaué (*Elaeis oleífera*) (EMBRAPA, 2016).

A coleta do efluente bruto para tratamento em laboratório foi realizada no final do processo produtivo, antes de ser encaminhado para a lagoa de tratamento.

O inóculo, constituído principalmente por microrganismos anaeróbios, foi coletado ao fundo da lagoa de estabilização da estação de tratamento do efluente.

#### 2.1.1 Análises físico-químicas do efluente bruto

Foram realizadas análises físico-químicas do POME, como demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV), bem como, foram realizadas medidas do potencial hidrogeniônico (pH), seguindo padrões estabelecidos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005) de acordo com as normas apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10** - Métodos para determinação de parâmetros físico-químicos do POME.

<b>Parâmetro</b>	<b>Método analítico (APHA, 2005)</b>	<b>Descrição sucinta do método</b>
Demanda química de oxigênio (DQO)	Espectrofotométrico 5220-D	Oxidação por dicromato de potássio em meio de ácido sulfúrico (Digestão a 150°C por 2 h e leitura a 600 nm).
Potencial hidrogeniônico (pH)	Potenciométrico 4500-H	Medida direta através de eletrodo específico.
Sólidos totais (ST)	Gravimétrico 2540-B	Secagem da amostra em estufa a 105±2°C até massa constante.
Sólidos fixos (SF)	Gravimétrico 2540-E	Calcinação em mufla a 550±2°C após secagem da amostra.
Sólidos voláteis (SV)	Gravimétrico 2540-E	Diferença de massa entre sólidos totais e sólidos fixos.

**Fonte:** Autor (2021).

#### 2.1.1.1 Demanda química de oxigênio (DQO)

O método padrão para determinar a demanda química de oxigênio (DQO) a partir do método colorimétrico em refluxo fechado se fundamenta na oxidação química da matéria orgânica, uma metodologia que quantifica indiretamente a matéria orgânica presente em águas e efluentes, utilizando o dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) como agente oxidante em meio ácido ( $H_2SO_4$ ) (APHA, 2005).

Uma amostra do efluente foi adicionada (2,5 mL) em tubos de ensaio tipo HACH juntamente com o dicromato de potássio (1,5 mL) e ácido sulfúrico (3,5 mL). Os tubos contendo as soluções permaneceram durante 2 horas sob temperatura de 150°C em reator da marca biotech modelo BT 750. Após a digestão em refluxo fechado das amostras, foi efetuada a leitura em espectrofotômetro na faixa de 600 nm após obtenção da curva analítica, sendo os valores obtidos expressos em  $mg O_2 L^{-1}$ .

### 2.1.1.2 pH

O pH do efluente bruto foi determinado utilizando pHmetro de bancada da marca Metrohm modelo 827.

O pH nos meios de cultivo contendo o efluente e o inóculo nos respectivos tratamentos (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J e K) foi ajustado em três valores distintos: 5, 6 e 7 utilizando uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1M através de pHmetro de bancada da marca Metrohm modelo 827.

### 2.1.1.3 Sólidos totais

O método para a determinação da série sólidos consiste em análises gravimétricas, onde se obtém a quantidade de sólidos presentes numa amostra de efluente líquido através de secagem e calcinação em temperaturas e intervalos de tempo específicos (APHA, 2005).

Cápsulas de porcelana foram previamente secas em estufa à 105° C por uma hora, após este período, as cápsulas permaneceram em um dessecador para atingir a temperatura ambiente, posteriormente a massa da cápsula seca foi verificada em balança analítica anotando o valor observado como (P0).

10 mL de amostra do efluente foi adicionado em cada cápsula, que foram levadas à estufa por duas horas à 105° C, após este período e atingir temperatura ambiente, as cápsulas contendo o material seco foram pesadas e os valores observados anotados como (P1).

O valor de sólidos totais (mg L<sup>-1</sup>) presente numa amostra líquida é obtido através da Equação 1 (APHA, 2005).

$$\text{Sólidos totais} = [(P1 - P0) / \text{vol. amostra}] \times 1000 \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

(P0) = valor obtido da cápsula seca;

(P1) = valor obtido da cápsula após secagem;

Vol. amostra = volume de 10 mL do efluente.

#### 2.1.1.4 Sólidos fixos

Sólidos fixos retratam os valores obtidos na cápsula, após calcinação à 550° C durante 24 horas, ou seja, após secagem e obtido o valor de sólidos totais, esta mesma cápsula contendo o material seco é levado à calcinação em forno tipo mufla, e o material restante dessa operação corresponde ao valor de sólidos fixos. A massa da cápsula após calcinação e temperatura ambiente é verificada e anotado o valor como (P2). A partir da Equação 2 se obtém o valor de sólidos fixos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) (APHA, 2005).

$$\text{Sólidos fixos} = [(P2 - P0) / \text{vol. amostra}] \times 1000 \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

(P0) = valor obtido da cápsula seca;

(P2) = valor obtido da cápsula após calcinação;

Vol. amostra = volume de 10 mL do efluente.

#### 2.1.1.5 Sólidos voláteis

O valor de sólidos voláteis é obtido através da diferença entre sólidos totais e sólidos fixos, correspondendo ao teor de matéria orgânica que volatilizou durante o processo de calcinação da amostra. Conforme Equação 3, em ( $\text{mg L}^{-1}$ ) (APHA, 2005).

$$\text{Sólidos voláteis} = \text{ST} - \text{SF} \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

ST = sólidos totais ( $\text{mg L}^{-1}$ );

SF = sólidos fixos ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

## 2.2 PRIMEIRA ETAPA DE EXPERIMENTOS

Foram utilizados 12 balões de vidro de borossilicato com capacidade de 500 mL. O processo de incubação das amostras contendo 200 mL da mistura de efluente bruto e inóculo foi realizado em batelada através de banho termostatizado, sem agitação e monitorado por termopar a  $35\pm 2^\circ\text{C}$  durante 15 dias.

### 2.2.1 Planejamento experimental e modelo Box-Behnken

Os experimentos foram realizados segundo um planejamento modelo Box-Behnken ( $3^2$ ), avaliando duas variáveis em três níveis (-1, 0, 1) através do software *Statistica* versão 7.0.

Houve variação na relação efluente/inóculo (E/I) (90/10, 80/20 e 70/30) para determinar a melhor faixa de concentração do inóculo na redução da carga orgânica do efluente em 10, 20 e 30% (v/v), ou seja, 20, 40 e 60 mL, respectivamente. Além das medidas de pH que variou entre 5, 6 e 7, conforme Tabela 11.

**Tabela 11** - Variáveis e níveis do planejamento experimental para a primeira etapa.

Variáveis	Níveis		
	(-1)	0	(1)
pH	5,0	6,0	7,0
Relação efluente/inóculo (v/v)	90/10	80/20	70/30

O planejamento experimental foi desenvolvido considerando 8 amostras (A, B, C, D, H, I, J e K) para tratamento de acordo com a variação de pH e relação efluente/inóculo em três níveis com repetições no ponto central (E, F e G) de acordo com a Tabela 12.

**Tabela 12** - Matriz de planejamento experimental e modelo Box-Behnken.

Planejamento experimental			Modelo Box-Behnken			
Tratamento	Volume de POME (mL)	Volume de inóculo (mL)	pH inicial do meio reacional	Relação (E/I)	Níveis das variáveis	
Controle	200	-	5	100/0	-1	1
A	180	20	5	90/10	-1	-1
B	160	40	5	80/20	-1	0
C	140	60	5	70/30	-1	1
D	180	20	6	90/10	0	-1
E	160	40	6	80/20	0	0
F	160	40	6	80/20	0	0
G	160	40	6	80/20	0	0
H	140	60	6	70/30	0	1
I	180	20	7	90/10	1	-1
J	160	40	7	80/20	1	0
K	140	60	7	70/30	1	1

Fonte: Autor (2021).

### 2.2.2 Avaliação da digestão anaeróbia pelo monitoramento de sólidos voláteis

A avaliação da digestão anaeróbia foi realizada através da variação do parâmetro sólidos voláteis (SV) analisados em triplicata antes e após o processo, conforme apresenta a Equação 4 (APHA, 2005).

$$\text{Redução de sólidos voláteis (\%)} = [(SV)_i - (SV)_f / (SV)_i] \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo:

(SV)<sub>i</sub> = sólidos voláteis inicial (mg L<sup>-1</sup>);

(SV)<sub>f</sub> = sólidos voláteis final (mg L<sup>-1</sup>).

### 2.3 SEGUNDA ETAPA DE EXPERIMENTOS

Para avaliar a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia do POME, foram empregados 10 reatores de bancada, equipados com tampa de teflon com uma válvula de saída de gás para análises periódicas da composição do biogás gerado e outra acoplada a um manômetro para monitoramento da pressão interna do sistema e verificação do volume de biogás gerado, conforme apresenta a Figura 4.

**Figura 4** - Reatores anaeróbios utilizados no experimento.



Fonte: Autor (2021).

Os reatores anaeróbios de bancada possuem capacidade para 250 mL, sendo utilizado o volume de 100 mL para a mistura de POME e inóculo, operando em regime de batelada, durante 10 dias de incubação, variando o volume de inóculo em 30, 40 e 50%, ou seja, a relação efluente/inóculo (E/I) em (70/30, 60/40 e 50/50).

O pH das misturas POME e inóculo foi ajustado para valor igual a 7 utilizando solução de hidróxido de sódio NaOH 1M.

A temperatura foi controlada ( $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) através de uma estufa incubadora BOD, modelo 315D, verificando assim, o potencial de produção de biogás em faixa de temperatura mesofílica (SOARES ALVES, 2008). Sendo circulada uma corrente de gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) no *headspace* dos reatores por 5 minutos para assegurar uma condição de anaerobiose no meio (MSHANDETE *et al.*, 2004).

### 2.3.1 Planejamento experimental

Para determinar o potencial de produção de biogás a partir do efluente de dendê híbrido, o pH das misturas foi ajustado para valor inicial igual a 7, e variou-se a relação efluente/inóculo (E/I) em 70/30, 60/40 e 50/50, aplicando-se os tratamentos em duplicatas, além dos controles contendo 100% de POME e 100% inóculo, conforme apresenta a Tabela 13.

**Tabela 13** - Planejamento experimental da segunda etapa do trabalho.

Planejamento experimental			
Tratamento	Volume de POME (mL)	Volume de inóculo (mL)	Relação E/I
L	100	-	100/0
M	100	-	100/0
N	-	100	0/100
O	-	100	0/100
P	70	30	70/30
Q	70	30	70/30
R	60	40	60/40
S	60	40	60/40
T	50	50	50/50
U	50	50	50/50

Fonte: Autor (2021).

### 2.3.2 Monitoramento da geração de biogás

Para a determinação do volume de biogás produzido foi utilizado o método denominado como potencial bioquímico de metano PBM ou *Biochemical Methane Potential – BMP* em condições normais de temperatura e pressão - CNTP (HANSEN *et al.*, 2004).

A pressão interna dos reatores foi monitorada diariamente através da leitura dos manômetros ( $\text{kgf cm}^{-2}$ ). Após a leitura, era realizada a purga do sistema para a próxima medição, sendo que, os dados de pressão observados foram convertidos para unidade de pressão em (milibar) para que esta pressão exercida pelo biogás nos reatores possa ser convertida em termos de volume de biogás em (mL), conforme apresenta a Equações 5 e 6 (OWEN *et al.*, 1979; ANGELIDAKI *et al.*, 2009).

$$V_b \text{ gerado entre } t \text{ e } (t + 1) = [(PF \times VUF \times 22,41) / (83,14 \times TF)] \times 10000 \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo:

$V_b$  = volume de biogás (mL);

$t$  = tempo (dias);

PF = pressão do frasco (milibar);

VUF = volume útil do frasco em litros (L);

TF = temperatura do frasco em Kelvin (K).

Foi realizada uma análise referente a geração de biogás, conforme apresenta a Equação 6, que analisa o volume acumulado de biogás, levando em consideração o volume de biogás obtido no dia anterior, para que assim, seja possível mensurar o volume total de biogás.

$$VB \text{ acumulado} = [V_b \text{ gerado entre } t \text{ e } (t + 1)] + VGA \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

$V_b$  = volume de biogás (mL);

$t$  = tempo (dias);

VGA = volume de biogás acumulado do dia anterior (mL).

### 2.3.3 Determinação da composição do biogás produzido

A análise para determinação da composição química do biogás foi desenvolvida com metodologia adaptada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa suínos e aves. Esta metodologia consiste na norma

estipulada pela *Environmental Protection Agency - EPA. Emissions Measurement Center*, Método 3B CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> Orsat (EPA, 2017).

O biogás produzido nos reatores é coletado através de saco amostrador pela válvula de saída de gases, para determinação da porcentagem de gases como metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através do método volumétrico, sendo o metano detectado indiretamente através da diferença de volume, processo que envolve absorção e oxidação seletiva. As análises seguiram o manual do kit (ALFAKIT, 2015).

O método analítico consiste em adicionar 10 mL de solução pré-tratamento 2, hidróxido de potássio KOH, incolor e inodoro, à uma cubeta e em seguida transfere-se 5 mL desta solução para uma seringa que será conectada ao suporte analítico de vidro para verificar o volume de metano (%). O saco amostrador com biogás é acoplado ao suporte analisador através da mangueira para transferir o biogás. Após o biogás estar contido dentro do suporte, este é transferido para a seringa com a solução pré-tratamento 2 agitando o conjunto por 2 minutos. Finalmente, o biogás é inserido no suporte novamente e então mensurado o percentual de CO<sub>2</sub> através da leitura da escala lateral da seringa (%), o metano é determinado pela diferença de concentração obtida para a amostra analisada (EMBRAPA, 2007).

#### 2.3.4 Avaliação de redução da carga orgânica do efluente a partir do parâmetro DQO

Para avaliar a eficiência do tratamento do POME a partir da digestão anaeróbia nesta segunda etapa, foi verificada a variação da carga orgânica segundo dados observados nas análises do parâmetro DQO antes e após cada tratamento, em triplicata, conforme Equação 7 (APHA, 2005).

$$\text{Eficiência de redução de DQO (\%)} = [(DQO)_i - (DQO)_f / (DQO)_i] \times 100 \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo:

(DQO)<sub>i</sub> = demanda química de oxigênio inicial (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>);

(DQO)<sub>f</sub> = demanda química de oxigênio final (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Os resultados relativos às análises físico-químicas para caracterização do efluente líquido da extração do óleo de dendê – POME, utilizado como substrato para o tratamento e geração de biogás através do processo de digestão anaeróbia, se encontram listados na Tabela 14. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

**Tabela 14** - Resultados das análises físico-químicas para caracterização do efluente líquido da extração do óleo de dendê – POME.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	4,77 ± 0,02
Demanda química de oxigênio (DQO)	mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	23.241,2 ± 1,1
Teor de água	%	92,27 ± 0,03
Sólidos totais (ST)	%	7,73 ± 0,03
Sólidos fixos (SF)	%	1,04 ± 0,09
Sólidos voláteis (SV)	%	6,68 ± 0,02

Fonte: Autor (2021).

Considerando os resultados da Tabela 14, se observa na medida do pH de aproximadamente 4,8 para o efluente, apresentando caráter ácido, sendo que, valores de pH em torno de 4 e 5 são comumente encontrados na literatura em estudos realizados com efluentes líquidos resultantes do processo de extração do óleo de dendê, valores que podem inibir o processo de digestão anaeróbia e geração de biogás (SAAD; WIRZAL; PUTRA, 2021).

Os valores de pH para efluentes da extração de óleo de palma apresentam características ácidas devido principalmente ao teor de ácidos graxos presentes no fruto do dendê, podendo o valor de pH variar conforme o tipo de POME analisado, espécie de dendê avaliada, processo de extração utilizado pela agroindústria, entre outros diversos fatores que influenciam as características deste parâmetro no efluente (ZHANG *et al.*, 2019).

Khemkhao e colaboradores (2020), constataram o valor de pH entre 4,16 e 4,73 no estudo de caracterização do POME para o tratamento do efluente e geração de biogás a partir do processo de digestão anaeróbia. De acordo com Najafpour e colaboradores (2006), foram observados valores de pH entre 3,8 e 4,4 ao caracterizar efluente da extração de óleo de palma. Já Ahmed *et al.* (2015), verificaram o valor de 4,5 para o pH a partir do POME oriundo do processo de clarificação do óleo de dendê e pH igual a 5,0 quando analisado o efluente a partir da etapa de esterilização do condensado.

Assim como Fonseca e colaboradores (2016), que avaliaram as características físico-químicas dos resíduos industriais da agroindústria do óleo de dendê, observaram valores de pH igual a 4,87 em efluente da espécie BRS Manicoré (dendê híbrido) e 4,66 em efluente de dendê da espécie *Elaeis guineensis*.

Dessa forma, é possível observar a semelhança dos valores de pH obtidos neste trabalho com registros encontrados na literatura abordando caracterização de efluente da extração do óleo de dendê.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução nº 357 de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (BRASIL, 2005). Sendo esta, complementada e alterada pela Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011.

De acordo com a legislação ambiental no Brasil sobre lançamento de efluentes em corpos hídricos receptores, o valor de pH detectado neste efluente encontra-se fora daquele determinado pela Resolução CONAMA 430/2011 que especifica uma faixa de pH entre 5 e 9 para lançamento de efluentes em corpos hídricos (BRASIL, 2011).

O valor apresentado para a DQO do efluente aqui estudado, igual a 23.241 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> é semelhante ao valor encontrado por Romera (2020) para o efluente também proveniente da extração do óleo de dendê híbrido (BRS Manicoré), com DQO de 24.797 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>.

De acordo com Ahmed e colaboradores (2015), que avaliaram as características físico-químicas de efluente da extração de óleo de palma, observaram DQO igual a 47.000, 64.000 e 15.000 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> para efluente das etapas de esterilização do condensado, tanque de clarificação e hidrociclone, respectivamente. Observando valores muito distintos para cada etapa de geração do efluente na

agroindústria. É possível verificar ainda, que o valor de DQO apresentada pela etapa de clarificação é a responsável pelo maior teor de matéria orgânica, quando comparada às outras etapas de geração.

Já no estudo realizado por Borja e Banks (1994), foi verificado um valor de DQO que variou entre 38.000 e 70.000 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> quando avaliada a mistura dos efluentes gerados durante as três etapas do processo de extração do óleo de palma. Utilizando ainda, o POME com valor de DQO igual a 42.500 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> para o tratamento e geração de biogás a partir do processo de digestão anaeróbia. Observando que, valores elevados de DQO acarretam em dificuldades para o processo de biodigestão devido às comunidades bacterianas serem suscetíveis à elevadas taxas de carga orgânica (CHOI *et al.*, 2013).

O teor de água apresentou o valor de 92,27%. Para a digestão anaeróbia de efluentes líquidos, torna-se indispensável um teor de água acima de 60% para uma efetiva degradação de compostos orgânicos e conseqüentemente, elevada produção de biogás com altos teores de gás metano, aumentando assim, o poder calorífico e viabilidade de conversão energética do biogás gerado (COELHO *et al.*, 2018).

O parâmetro sólidos totais (ST) apresentou valor de 7,7%. Dados observados por Fonseca e colaboradores (2016), verificaram o valor de 13% e Romera (2020) observou o valor de 4,9% para o parâmetro sólidos totais, ambos trabalhos desenvolvidos a partir de efluente da espécie de dendê híbrido (BRS Manicoré).

Constatando que apesar de ser da mesma espécie, o efluente gerado a partir da extração do óleo de dendê pode apresentar características físico-químicas distintas, que variam conforme o clima da região, incidência solar, índice pluviométrico, entre outros (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

O parâmetro sólidos voláteis (SV) demonstrou elevado valor (6,7%) em relação ao teor de sólidos totais presentes no efluente analisado (7,7%), ou seja, responsável por 86% do valor de sólidos (SV/ST), expressando assim, uma alta taxa de compostos orgânicos, característica que inicialmente implica a viabilidade de utilização do tratamento e geração de biogás a partir da digestão anaeróbia devido seu elevado potencial de biodegradabilidade e presença de compostos capazes de serem convertidos em gás metano (CHERNICHARO, 2007).

Os parâmetros abordados nesta caracterização, pH, DQO, teor de água e a série de sólidos, além da relação SV/ST, apresentaram valores semelhantes a outros estudos publicados na literatura em relação a caracterização de efluentes da extração

de óleo de dendê para o tratamento e geração de biogás a partir do processo de digestão anaeróbia, conforme apresenta a Tabela 15.

**Tabela 15** - Caracterizações de efluente da extração do óleo de palma aplicado no processo de digestão anaeróbia para a geração de biogás.

Parâmetros	Borja, Banks e Sánchez (1996)	Khemkhao <i>et al.</i> , (2015)	Presente Estudo
pH	4,4	4,6 – 4,7	4,7
Demanda química de oxigênio - DQO (mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	30.600	70.500	23.241
Teor de água (%)	96,88	94,82	92,27
Sólidos totais – ST (%)	3,12	5,18	7,73
Sólidos voláteis – SV (%)	2,43	4,32	6,68
SV/ST (%)	78	83	86

Fonte: Autor (2021).

### 3.2 PRIMEIRA ETAPA DE EXPERIMENTOS

A avaliação do processo de digestão anaeróbia no tratamento do POME foi realizada por meio da variação dos parâmetros sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV). Os valores obtidos no início e no final de cada tratamento em triplicata, utilizando um tempo de detenção hidráulica de 15 dias de reação sob temperatura de 35±2°C estão listados na Tabela 16.

**Tabela 16** – Resultado correspondente a sólidos totais e voláteis antes e após a digestão anaeróbia para cada tratamento.

Tratamento	pH	Efluente/ Inóculo % (v/v)	Sólidos totais inicial (g L <sup>-1</sup> )	Sólidos totais final (g L <sup>-1</sup> )	Redução de sólidos totais (%)	Sólidos voláteis inicial (g L <sup>-1</sup> )	Sólidos voláteis final (g L <sup>-1</sup> )	Redução de sólidos voláteis (%)
<b>Controle</b>	5	100/0	75,46 ± 0,28	70,72 ± 0,28	<b>6,27</b>	65,27 ± 0,27	61,17 ± 0,22	<b>6,28</b>
<b>A</b>	5	90/10	72,95 ± 0,07	62,78 ± 0,10	<b>13,93</b>	61,23 ± 0,11	51,09 ± 0,12	<b>16,57</b>
<b>B</b>	5	80/20	59,89 ± 0,16	49,34 ± 0,21	<b>17,61</b>	49,77 ± 0,12	39,61 ± 0,21	<b>20,42</b>
<b>C</b>	5	70/30	55,20 ± 0,03	44,63 ± 0,15	<b>19,15</b>	45,45 ± 0,12	35,23 ± 0,20	<b>22,49</b>
<b>D</b>	6	90/10	70,51 ± 0,15	59,19 ± 0,11	<b>16,05</b>	59,61 ± 0,48	48,55 ± 0,16	<b>18,56</b>
<b>E</b>	6	80/20	56,25 ± 0,04	44,09 ± 0,10	<b>18,82</b>	49,43 ± 0,36	38,30 ± 0,21	<b>22,52</b>
<b>F</b>	6	80/20	59,75 ± 0,18	48,50 ± 0,15	<b>19,82</b>	52,40 ± 0,20	40,33 ± 0,39	<b>23,02</b>
<b>G</b>	6	80/20	62,86 ± 0,18	50,40 ± 0,35	<b>18,27</b>	52,63 ± 0,13	41,13 ± 0,13	<b>21,85</b>
<b>H</b>	6	70/30	63,20 ± 0,03	51,66 ± 0,07	<b>21,62</b>	46,68 ± 0,09	34,56 ± 0,14	<b>25,95</b>
<b>I</b>	7	90/10	69,46 ± 0,08	55,38 ± 0,06	<b>20,27</b>	58,40 ± 0,06	44,70 ± 0,21	<b>23,47</b>
<b>J</b>	7	80/20	62,42 ± 0,18	48,60 ± 0,42	<b>22,14</b>	51,64 ± 0,21	37,89 ± 0,40	<b>26,62</b>
<b>K</b>	7	70/30	56,46 ± 0,29	42,58 ± 0,16	<b>24,58</b>	45,92 ± 0,41	32,16 ± 0,27	<b>29,96</b>

Fonte: Autor (2021).

É possível verificar que de acordo com os tratamentos da letra A até a letra K o valor de pH aumenta (5, 6 e 7), bem como o volume de inóculo aplicado em cada tratamento (10, 20 e 30%). Observando que os valores de redução de sólidos também aumentam nesta ordem (14 – 24% e 17 – 30%) para sólidos totais e sólidos voláteis, respectivamente.

De acordo com os tratamentos (C e H), que utilizaram a relação efluente/inóculo de 70/30, em pH 5 e 6, respectivamente, apresentaram reduções superiores de sólidos totais (19,15 e 21,62%) e sólidos voláteis (22,49 e 25,95%) quando comparados a outros tratamentos com relação efluente/inóculo de 90/10 e 80/20.

Observando assim, que baixos volumes de inóculo aplicado não se apresentaram tão satisfatórios para o tratamento do efluente avaliado quanto àqueles que utilizaram valores superiores de inóculo (30%) para esta primeira etapa do trabalho.

Destacando os valores obtidos em pH igual a 7 (I, J e K), os quais apresentaram valores superiores de redução de sólidos em relação aos tratamentos aplicados em pH igual a 5 e 6, destacando a influência do pH neutro no tratamento do POME. Além disso, valores de pH próximos da neutralidade apresentam-se mais eficientes em estudos de tratamento de efluentes e produção de biogás através da digestão anaeróbia, quando comparados a outras faixas de pH (CHOON; CHOU; NORLI, 2018; ZHANG; HU; LEE, 2016).

A redução de sólidos totais e voláteis para o tratamento K foi de 24,58 e 29,96%, respectivamente, combinando pH igual a 7 e 30% do volume de inóculo. No estudo realizado por Romera (2020) foi observada uma redução de sólidos totais na faixa de 34%. Já para sólidos voláteis, atingiu valor de 64% ao utilizar também o volume de 30% de inóculo em reator tipo UASB com capacidade de 10 litros durante 12 dias de operação em temperatura de  $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ , para o tratamento do POME da espécie de dendê híbrido a partir do processo de digestão anaeróbia.

De acordo com a relação SV/ST no tratamento K é possível observar que antes do processo aplicado, este valor era de  $56,46\text{ g L}^{-1}$  (ST) e  $45,92\text{ g L}^{-1}$  (SV), fornecendo, portanto, o valor de 81% (SV/ST), indicando uma alta taxa de compostos orgânicos pela predominância do teor de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais.

Já em relação ao efluente após o tratamento, os valores foram  $42,58\text{ g L}^{-1}$  (ST) e  $31,16\text{ g L}^{-1}$  (SV), obtendo o valor de 73% (SV/ST). O que implica ainda conter uma elevada taxa de compostos orgânicos, sendo necessário um valor de tempo de

detenção hidráulica (TDH) superior à 15 dias para verificar a taxa de decomposição e mineralização destes compostos, pois de acordo com Decottignies *et al.* (2005), um resíduo orgânico pode ser considerado estabilizado ou sem capacidade para biodigestão e geração de biogás quando apresentar teores de sólidos voláteis com valor em torno de 10 a 17,4%.

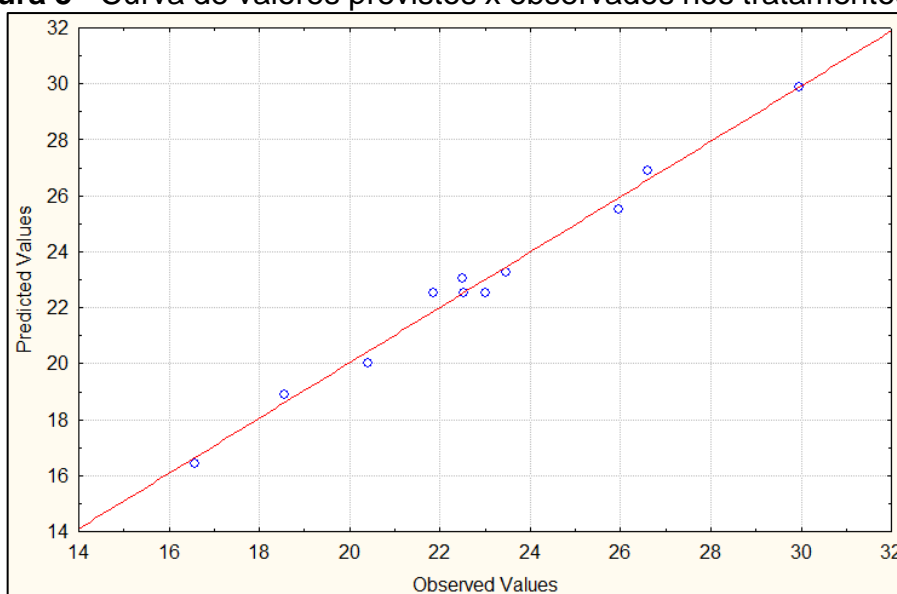
É possível observar mudanças nos parâmetros sólidos totais e voláteis antes e após os tratamentos aplicados. Estas alterações iniciais nas características do POME avaliado, implicam a viabilidade de outros estudos para otimização do processo de digestão anaeróbia no tratamento do efluente em escala piloto, uma vez que, o estudo realizado em escala de bancada fornece informações iniciais acerca do processo e das propriedades da biodigestão do efluente avaliado.

### 3.3 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

A partir dos dados observados através do planejamento Box-Behnken foram verificadas as relações estatísticas das variáveis pH e relação efluente/inóculo aplicadas para otimização do processo de tratamento do efluente a partir do processo de digestão anaeróbia observando como parâmetro resposta a redução de sólidos voláteis (%).

A Figura 6 apresenta os valores previstos e os observados nos 11 tratamentos aplicados em termos de redução de sólidos voláteis (%).

**Figura 5** - Curva de valores previstos x observados nos tratamentos aplicados.

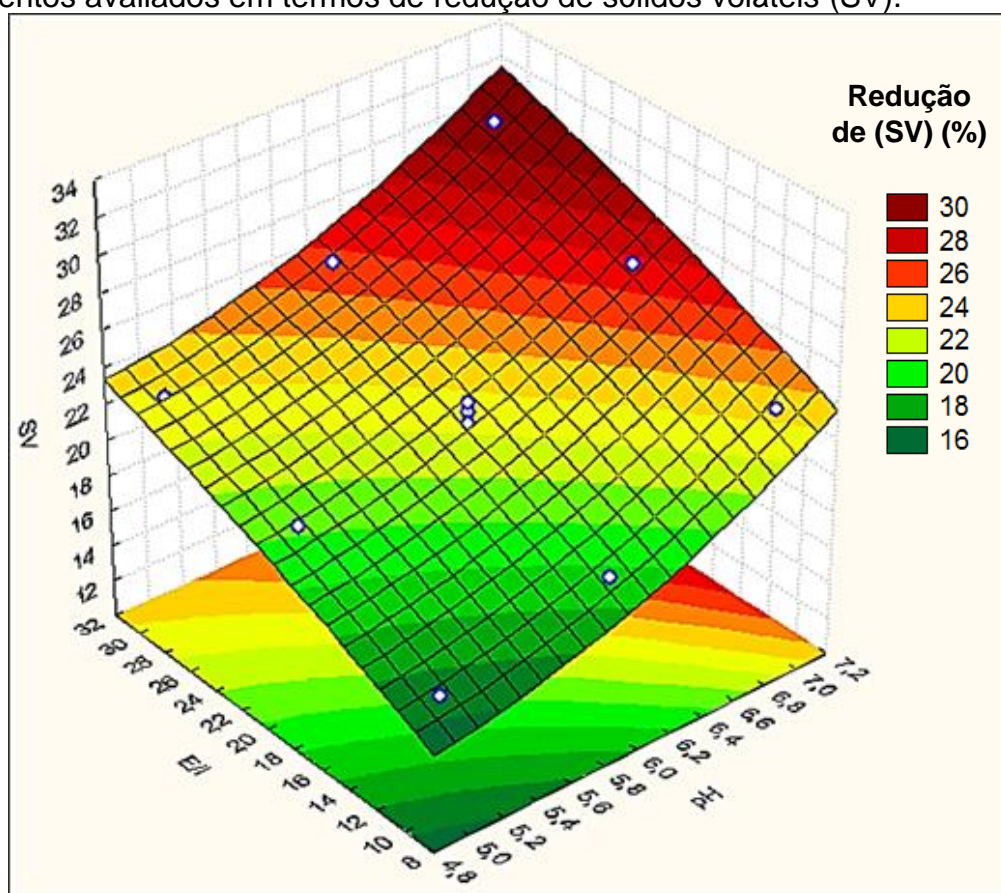


Fonte: Autor (2021).

É possível observar uma baixa dispersão dos pontos com a reta, apresentando uma correlação entre os valores previstos e os dados obtidos nos experimentos em relação à remoção de sólidos voláteis, isto é, quando mais próximo da linha de regressão ajustada estão os pontos, maior a significância estatística dos dados, demonstrando que o modelo proposto descreve de forma eficaz os dados observados, com um coeficiente de determinação experimental ( $R^2$ ) de 98,05%.

O gráfico de superfície de resposta ilustra o ponto que obteve resultados mais satisfatórios, com redução de SV (%) em pH neutro, bem como maior volume de inóculo aplicado, conforme apresenta a Figura 7.

**Figura 6** - Superfície de resposta resultante da otimização dos processos de tratamentos avaliados em termos de redução de sólidos voláteis (SV).



Fonte: Autor (2021).

É possível verificar que para o eixo X temos os valores de pH, indicando que, quando utilizados valores superiores para este parâmetro, resulta nas condições ótimas de trabalho, representado pela coloração vermelho escuro, situado na faixa de pH igual a 7. O mesmo ocorre para o eixo Y que apresenta a relação efluente/inóculo (E/I), demonstrando que a curva do gráfico apresenta resultados mais satisfatórios

com o aumento do volume de inóculo, próximo de 30%. Além disso, o eixo Z que evidencia a redução de sólidos voláteis (%) apresenta valores superiores de redução (faixa de 30%) quando combinado pH igual a 7 com 30% de inóculo, sendo esta combinação, portanto, o ponto que apresentou melhores resultados e maior eficiência para o processo de digestão anaeróbia no tratamento do efluente da extração do óleo de dendê.

### 3.4 SEGUNDA ETAPA DE EXPERIMENTOS

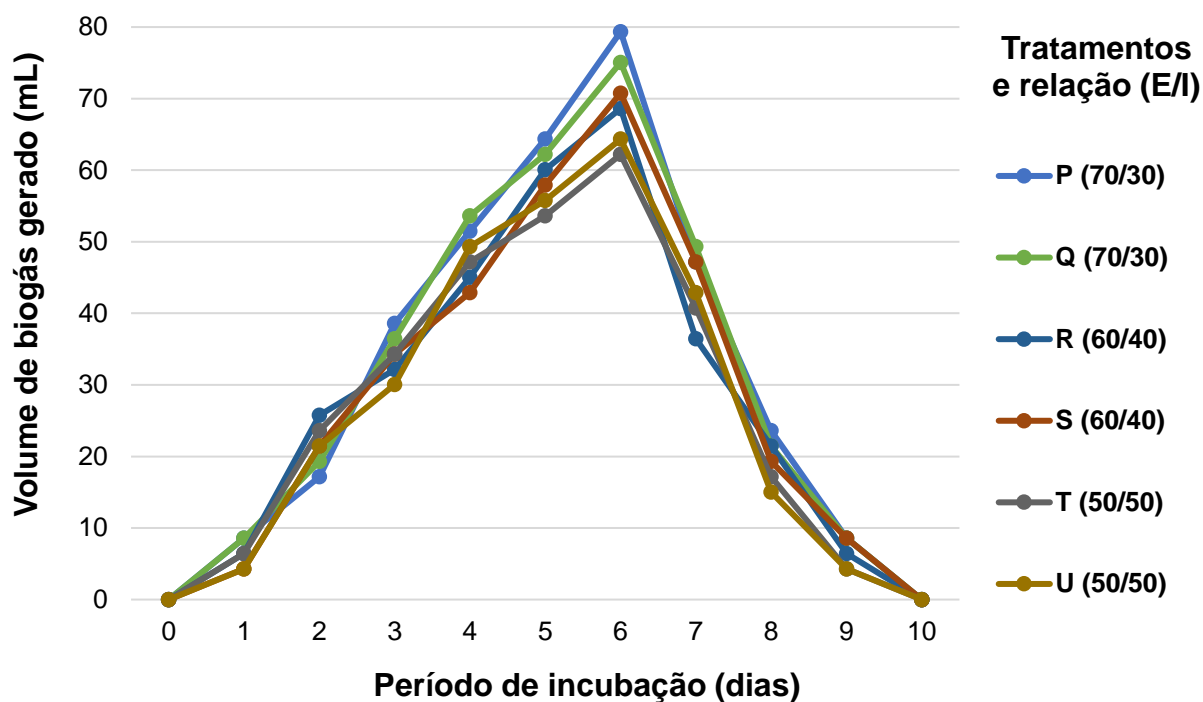
Conforme a primeira etapa do trabalho, o tratamento que combinou pH igual a 7 e relação E/I de 70/30 foi o experimento que apresentou resultados mais satisfatórios no tratamento do POME em relação ao parâmetro sólidos voláteis (%). A partir disso, foram analisadas, nesta segunda etapa do trabalho, as relações E/I de 70/30, 60/40 e 50/50, ou seja, foi avaliado o aumento do volume de inóculo nos experimentos em 30, 40 e 50%, com pH inicial das misturas (POME + inóculo) igual a 7, com intuito de verificar o potencial de geração de biogás diária e ao longo de 10 dias de incubação, além da composição química do biogás gerado, bem como monitorar a variação da carga orgânica do efluente através do parâmetro DQO.

#### 3.4.1 Monitoramento da geração de biogás

A Figura 8 apresenta a geração diária de biogás a partir do POME para os tratamentos aplicados ao longo de 10 dias de incubação, iniciados em pH igual a 7.

Os experimentos L e M que apresentaram a relação efluente/inóculo de 100/0, bem com os tratamentos N e O com relação efluente/inóculo de 0/100 não apresentaram geração de biogás, mesmo iniciados em pH igual a 7, demonstrando a importância da relação efluente/inóculo, uma vez que, isolado, o efluente não é capaz de produzir biogás. O inóculo não passou por processos de aclimação e propagação, sendo utilizado na forma bruta, assim como o POME. Pelo fato do inóculo utilizado ser proveniente da lagoa de estabilização de tratamento do próprio efluente, a aclimação do meio se torna mais facilitada, uma vez que os microrganismos estão adaptados a este tipo de substrato (KIM *et al.*, 2010).

**Figura 7** – Geração diária de biogás a partir do efluente da extração do óleo de dendê.



Fonte: Autor (2021).

É possível observar comportamentos semelhantes para os tratamentos aplicados, isso se deve ao fato de todos serem oriundos do mesmo efluente, além do inóculo também ser o mesmo, alterando somente o volume de inóculo aplicado em cada tratamento em proporções muito próximas. Além disso, todos iniciaram o processo de digestão anaeróbia em pH igual a 7, colaborando com dados encontrados na literatura, que aborda uma faixa de pH entre 6,8 e 7,2, como faixa ideal para a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia do POME (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

pH iniciado em valor igual a 7, auxilia na capacidade do meio de se manter em faixas mais próximas da neutralidade, uma vez que a fase denominada de acidogênese, é predominante a produção de ácidos voláteis, com isso há uma queda no pH, esta acidificação prevalece durante a reação, não havendo um equilíbrio entre os ácidos produzidos e consumidos pelas bactérias metanogênicas, sendo que este desequilíbrio, pode resultar numa queda na eficiência de produção de metano, que é o principal gás de interesse na digestão anaeróbia do POME, devido seu elevado potencial energético (ZHAN; HU; LEE, 2016).

As máximas gerações de biogás ocorreram no sexto dia de incubação para todos os tratamentos aplicados, verificando valores superiores de produção a partir

dos tratamentos P e Q, que combinaram a relação E/I (70/30) em pH igual a 7, atingindo valores de 79 e 75 mL, respectivamente. Já para os tratamentos que utilizaram a relação E/I (50/50), tratamentos T e U, apresentaram valores de 64 e 68 mL, respectivamente.

Os valores observados para todos os tratamentos no sexto dia de incubação variam entre 60 e 80 mL de biogás gerado, valor que pode ser adotado como tempo de detenção hidráulica (TDH), período suficiente para a geração de biogás a partir de compostos solúveis facilmente biodegradáveis, que a partir da hidrólise, o substrato passa a estar disponível para as bactérias metanogênicas e consequentemente geração de gás metano (CAMPELLO *et al.*, 2021, PARAWIRA *et al.*, 2004). Constatando ainda, que após este pico, há um declínio nas curvas do gráfico e no décimo dia, não foi verificada geração de biogás para os tratamentos aplicados.

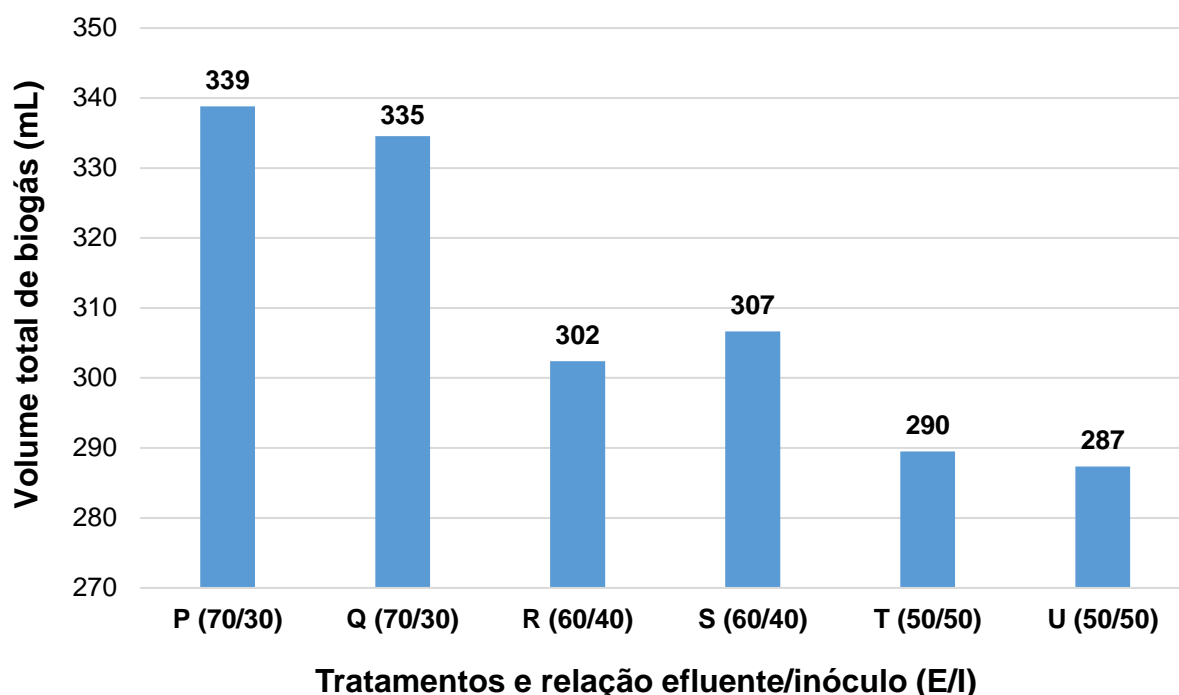
Diversos estudos apresentam máximas gerações de biogás já nos primeiros dias de operação, como no trabalho realizado por Fang e colaboradores (2011) que avaliaram a geração de biogás a partir de efluente da extração de óleo de palma, obtendo como tempo de detenção hidráulica (TDH) o valor de 5 dias para a máxima geração de biogás e metano.

De acordo com Poh e Chong (2010), o TDH foi de 7 dias para o tratamento e geração de biogás a partir do processo de biodigestão realizada em reator anaeróbio tipo CSTR. Já Irvan e colaboradores (2012) observaram um TDH de 8 dias para o tratamento do POME e geração de biogás em reator tipo CSTR também.

A Figura 9 apresenta a geração acumulada de biogás observada ao longo de 10 dias de incubação.

É possível verificar elevados volumes de geração de biogás a partir dos tratamentos P e Q, que apresentaram geração de 339 e 335 mL de biogás, respectivamente, combinando 30% de inóculo com 70% de POME, verificando que maiores taxas de aplicação de inóculo como nos tratamentos R, S, T e U (40 e 50%) não se apresentaram satisfatórias em relação à geração de biogás a partir do efluente, produzindo valores inferiores quando comparados aos anteriores, como geração de biogás na faixa de 290 e 300 mL de biogás ao longo de 10 dias de incubação em pH igual a 7.

**Figura 8** - Geração acumulada de biogás após 10 dias de incubação do POME em pH igual a 7 e temperatura igual a 35°C.



Fonte: Autor (2021).

Esta diferença de geração de biogás entre os tratamentos aplicados se justifica pela disponibilidade de material orgânico presente no efluente e interação do inóculo com o substrato, ou seja, o balanceamento entre macro e micronutrientes disponíveis no efluente tem que estar equilibrado com as comunidades bacterianas presente no inóculo para que ocorra a degradação de compostos orgânicos e geração de biogás, bem como para que não haja inibição no processo de biodigestão, havendo assim, uma maior taxa de conversão destes compostos orgânicos em biogás, isto evidencia a importância do volume de inóculo adequado para o processo de digestão anaeróbia (BORJA; BANKS; SÁNCHEZ, 1996).

Por se tratar de reações bioquímicas complexas, o processo de digestão anaeróbia pode ser facilmente inibido por quaisquer alterações adversas no meio, como por exemplo o aumento do volume de inóculo não ser satisfatório para o processo em relação à geração acumulada de biogás, uma vez que, o volume de inóculo pode variar muito conforme o experimento, de acordo com suas características físico-químicas e origem do inóculo utilizado (EDUARDO de SOUZA, 1984).

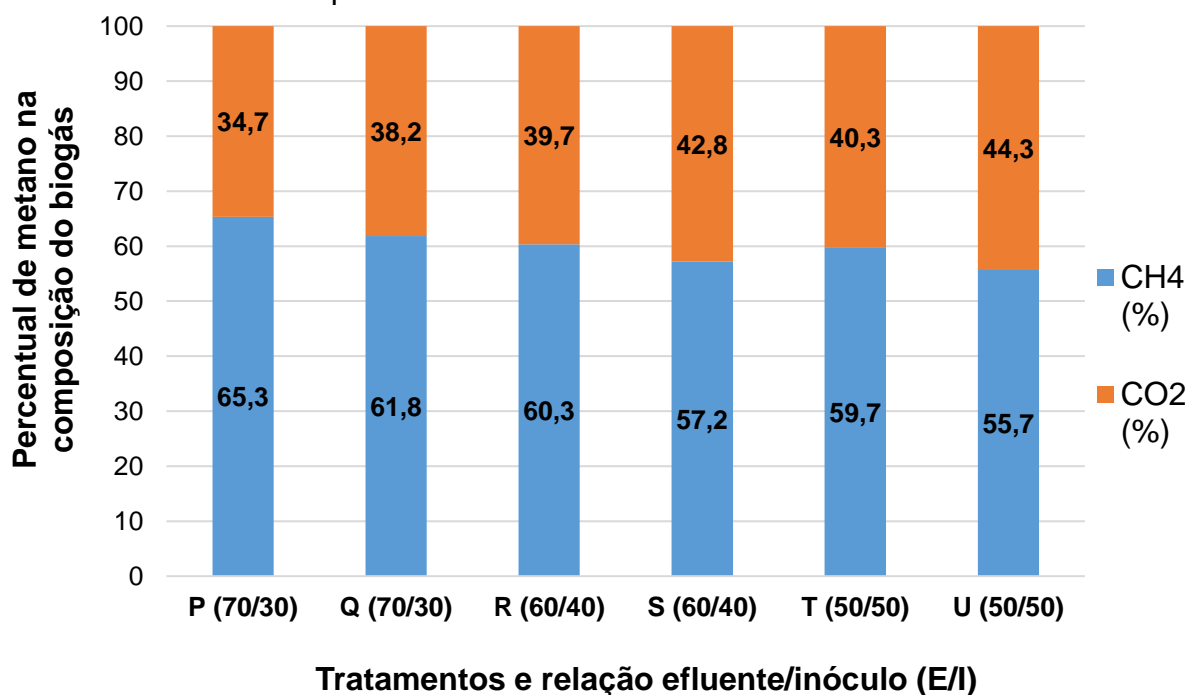
Além disso, o inóculo pode conter compostos que em elevadas concentrações podem afetar ou mesmo inibir a digestão anaeróbia. Por se tratar de diversas espécies

de microrganismos que trabalham em consórcio, sendo uma etapa totalmente dependente de outras, podendo afetar as principais variáveis de interesse como o volume de biogás gerado e conseqüentemente o teor de metano em sua composição (CHOONG; CHOU; NORLI, 2018).

### 3.4.2 Determinação da composição química do biogás

A Figura 10 apresenta a composição química do biogás gerado a partir dos tratamentos aplicados ao longo de 10 dias de reação, destacando os percentuais de metano (CH<sub>4</sub>), principal gás de interesse devido seu potencial energético.

**Figura 9** – Percentual de gás metano na composição química do biogás gerado a partir dos tratamentos aplicados.



Fonte: Autor (2021).

Novamente se destacam os tratamentos P e Q, que utilizaram o volume de 30% de inóculo no experimento gerando valores como 65,3 e 61,8% de metano, respectivamente, valores superiores que os apresentados pelos outros tratamentos aplicados, como 60,3; 57,2; 59,7 e 55,7% para R, S, T e U, respectivamente. Evidenciando assim, um potencial energético superior para P e Q, devido a predominância do gás metano na composição química do biogás produzido ao longo de 10 dias de operação.

Wang e colaboradores (2015) avaliaram a composição do biogás gerado a partir do tratamento de efluente da extração do óleo de dendê por digestão anaeróbia, observando valores de 65-70% de gás metano em sua composição.

Choorit e Wisarnwan (2007) avaliaram a produção de biogás a partir de efluente de dendê utilizando dois reatores de bancada com agitação contínua operando em 7 dias de reação sob temperaturas de 35 e 55°C. Observando a partir do primeiro 61% de metano em sua composição e 71% para o segundo. Demonstrando a importância do monitoramento da temperatura na geração e composição do biogás, pelo fato que em elevadas temperaturas o biogás apresentou maior teor de metano em sua composição química.

### 3.4.3 Avaliação de redução da carga orgânica do efluente através do parâmetro DQO

Em relação à variação da carga orgânica, a Tabela 16 apresenta os valores antes e após o processo de digestão anaeróbia do POME, bem como a redução (%) em termos de DQO.

**Tabela 16** - Redução da DQO presente no POME a partir de cada tratamento aplicado após 10 dias de incubação.

Tratamento	DQO antes do tratamento (g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	DQO após o tratamento (g O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )	Redução da DQO(%)
L	23,56 ± 0,01	20,11 ± 0,01	15
M	23,06 ± 0,01	19,56 ± 0,02	15
N	17,41 ± 0,01	14,21 ± 0,01	18
O	18,26 ± 0,01	15,26 ± 0,03	16
P	22,41 ± 0,01	11,81 ± 0,01	47
Q	24,06 ± 0,01	12,96 ± 0,01	46
R	22,21 ± 0,01	13,56 ± 0,01	39
S	23,16 ± 0,01	13,71 ± 0,01	41
T	22,71 ± 0,01	14,26 ± 0,01	37
U	23,86 ± 0,01	15,21 ± 0,01	36

Fonte: Autor (2021).

Os tratamentos L, M, N e O, não apresentaram redução significativa de DQO (15–18%), bem como não geraram biogás, como discutido anteriormente, destacando novamente, a importância de verificar a relação efluente/inóculo para a eficiência do processo de digestão anaeróbia no tratamento do efluente e geração de biogás.

Já os tratamentos que utilizaram o volume de 30% de inóculo (P e Q), apresentaram valores superiores de redução de DQO (47 e 46 %), evidenciando assim, a digestão do substrato. Além disso, estes tratamentos apresentaram elevadas gerações de biogás, mostrando que, quanto maior a redução da carga orgânica do efluente, maior a geração de biogás.

De acordo com a CETESB (2018) a faixa de redução de DQO para o processo de digestão anaeróbia de efluentes líquidos varia entre 40 e 85%. Portanto, o valor observado neste estudo se encontra dentro do limite previsto pelo seguinte órgão ambiental. Sendo que, o estudo aqui avaliado se refere ao tratamento primário do POME bruto, necessitando de outras etapas e processos de tratamento de efluentes integrados como secundários e terciários para o enquadramento e lançamento deste efluente em corpo hídrico receptor.

## 4 CONCLUSÃO

As análises de parâmetros físico-químicos do efluente mostram um elevado potencial poluidor para o POME avaliado, devida sua alta concentração de matéria orgânica, verificada através do parâmetro DQO que apresentou valor de 23.241,2 mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. Além da determinação de sólidos totais, que apresentou 7,7% dos quais 6,6% representam a fração de sólidos voláteis, indicando uma alta taxa de compostos orgânicos presentes no efluente, responsáveis por 87% do teor de sólidos observados.

Na primeira etapa de experimentos, o tratamento (K), que combinou pH neutro (7) com volume de 30% de inóculo, promoveu o valor de redução de sólidos voláteis de 29,96%, valor superior ao observado em valores menores de aplicação dos parâmetros pH como 5 e 6, bem como volume de inóculo de 10 e 20%.

Na segunda etapa do trabalho, o tratamento (P), que utilizou o volume de 30% de inóculo em pH igual a 7 apresentou o volume total de 339 mL de biogás acumulado, sendo a máxima geração observada no sexto dia de operação (79 mL). Com relação à concentração de gás metano, este apresentou média de 65% na composição química do biogás gerado. Além de atingir redução de 47,3% de DQO para o mesmo tratamento aplicado.

Dessa forma, é possível concluir que as variáveis do processo de digestão anaeróbia observadas neste trabalho: pH e relação efluente/inóculo, influenciam diretamente no tratamento e na geração de biogás a partir do POME, observando diferenças significativas em termos de redução de sólidos voláteis, DQO e geração de biogás, além de percentual de gás metano em sua composição química.

## 5 REFERÊNCIAS

ABRAPALMA. Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/sobre-o-fruto-de-palma>. Acesso em: 27 jul. 2018.

AHMAD, A. L.; SUMATHI, S.; HAMEED, B. H. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. **Chemical Engineering Journal**, v. 118, p. 99–105, 2006.

AHMED, Y.; YAAKOB, Z.; AKHTAR, P.; SOPIAN, K. Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1260–1278, 2015.

ALFAKIT. Kit de análises de biogás e sua descrição, ficha técnica e informações. Disponível em: <https://alfakit.com.br/produtos/kit-analise-de-biogas-cod-3819/>. Acesso em: 07 set. 2020.

AMANI, T.; NOSRATI, M.; SREEKRISHNAN, T.R. Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects - a review. **Environmental Reviews**, n. 18, p. 255-278, 2010.

ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J.L.; GUWY, A.J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J.B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science & Technology**, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 8, DE 30.1.2015** - DOU 2.2.2015. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111847>. Acesso em: 20 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 685, DE 29.6.2017** - DOU 30.6.2017. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111847>. Acesso em: 20 fev. 2019.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21.ed. Washington. 2005.

BORJA, R.; BANKS, C. J. Anaerobic digestion of palm oil mill effluent using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. **Biomass and Bioenergy**, v. 6, n. 5, p. 381-389, 1994.

BORJA, R.; BANKS, C. J.; SÁNCHEZ, E. Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in a two-stage up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) system. **Journal of Biotechnology**, v. 45, p. 125-135, 1996.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF. 2005.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF. 2011.

CAMPELLO, L. D.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; DOS SANTOS, I. F. S. Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. **Environment, Development and Sustainability**. v. 23, p. 2614–2629, 2021.

CETESB, 2018. Companhia ambiental do estado de São Paulo. Escola superior da Cetesb. **Conformidade Ambiental com requisitos técnicos e legais**. 219 p. 2018.

CHEN, G. Q.; WU, X. F. Energy overview for globalized world economy: Source, supply chain and sink. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 735-749, 2017.

CHENG, Y. W.; CHONG, C. H.; LAM, M. L.; AYOUB, M.; CHENG, C. K.; LIM, J. W.; YUSUP, S.; TANG, Y.; BAI, J. Holistic process evaluation of non-conventional palm oil mill effluent (POME) treatment technologies: A conceptual and comparative review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 409, 33 p., 2021.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, n. 2, 380 p., 2007.

CHOI, W. H, SHIN, C. H.; PREVEEN, A.; KIM, J. J.; PARK, J. Y. Anaerobic treatment of palm oil mill effluent using combined high-rate anaerobic reactors. **Bioresource Technology**, v. 141, p. 138-144, 2013.

CHOONG, Y. Y.; CHOU, K. W.; NORLI, I. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2993–3006, 2018.

CHORIT, W.; WISARNWAN, P. Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent. **Electronic Journal of Biotechnology**. ISSN: 0717-3458. v. 10, n. 3, 2007.

CIBIÓGÁS. **Nota Técnica: Nº 002/2020** – Panorama do Biogás no Brasil em 2019. Foz do Iguaçu, Abril de 2020.

COELHO, S., T.; GARCILASSO, V., P., FERRAZ JUNIOR, A., D., N.; MARIANOS dos SANTOS, M.; JOPPERT, C., L. **Tecnologias de produção e uso do biogás e biometano**. Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo, IEE – USP. São Paulo, 209 p. 2018.

CORATO, U. D.; BARI, I. D.; VIOLA, E.; PUGLIESE, M. Assessing the main opportunities of integrated biorefining from agrobioenergy co/by-products and agroindustrial residues into high-value added products associated to some emerging markets: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 326–346, 2018.

DECOTTIGNIES, V.; GALTIER, L.; LEFEBVRE, X; VILLERIO, T. **Comparison of analytical methods to determine the stability of municipal solid waste and related wastes**. In: Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2005.

EDUARDO de SOUZA, M. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v. 44, n. 137, 1984.

EMBRAPA, 2007. Alfakit biogás. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: [http://www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=publicacoes&cod\\_publicacao=1068](http://www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=publicacoes&cod_publicacao=1068). Acesso em: 20 fev. 2019.

EMBRAPA, 2016. Resíduo do dendê pode gerar biogás. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/10768217//residuo-do-dende-pode-gerar-biogas>. Acesso em: 20 jul. 2018.

EPA, 2017. Environmental Protection Agency - EPA. **Emissions Measurement Center**, Método 3B CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> Orsat. Disponível em: <https://www.epa.gov/emc/method-3b-oxygen-and-carbon-dioxide-concentrations-orsat-analyzer>. Acesso em: 20 fev. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **BEN: Balanço Energético Nacional**. Relatório Síntese, ano base 2019. Ministério de Minas e Energia (MME). 72 p. Rio de Janeiro, Brasil, Maio, 2020.

FANG, C.; O-THONG, S.; BOE, K.; ANGELIDAKI, I. Comparison of UASB and EGSB reactors performance, for treatment of raw and deoiled palm oil mill effluent (POME). **Journal of Hazardous Materials**, v. 189, p. 229–234, 2011.

FONSECA, L. S.; CAMPANHA, R. B.; OLIVEIRA, M. E. C.; MENDONÇA, S. Caracterização química e física de resíduos industriais de dendê tenera e híbrido manicoré. In: **III Encontro de Pesquisa e Inovação EnPI**, p. 214-221, 2016. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1055848/1/AnaisIIIEEnPI2016.pdf>. Acesso em: 02 set. 2020.

HANSEN, T. L.; SCHMIDT, J. E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J. C.; MOSBAEK, H.; CHRISTENSEN, T. H. Method for determination of methane potentials of solid organic waste. **Waste management**, v. 24, p. 393-400, 2004.

HARSONO, S. S.; GRUNDMANN, P.; SOEBRANTO, S. Anaerobic treatment of palm oil mill effluents: potential contribution to net energy yield and reduction of greenhouse

gas emissions from biodiesel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 619-627, 2014.

HOMMA, A. K. O.; FURLAN JÚNIOR, J. Desenvolvimento da dendeicultura na Amazônia: cronologia. **Agronegócio do dendê: uma alternativa social, econômica e ambiental para o desenvolvimento sustentável da Amazônia**. Belém, Embrapa Amazônia Ocidental, p. 193-207, 2001.

HOMMA, A. L. O. **Histórico do desenvolvimento de híbridos interespecífico entre caiaué e dendezeiro**. Belém, Embrapa Amazônia Oriental, 34 p., 2016.

IEA, 2020. International Energy Agency. Data and statistics. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>. Acesso em: 20 jan. 2020.

INDEXMUNDI. 2020. Palm oil production by country. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=palmoil&graph=producton>. Acesso em: 03 jan. 2021.

ISKANDAR, M. J.; BAHARUM, A.; ANUAR, F. H.; OTHAMAN, R. Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology - A review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 9, p. 169–185, 2018.

IRVAN, I.; TRISAKTI, B.; WONGISTANI, V.; TOMIUCHI, Y. Methane emission from digestion of palm oil mill effluent (POME) in a thermophilic anaerobic reactor. **International Journal of Engineering Science**. v. 3, p. 32-50, 2012.

KHEMKHAO, M.; DOMRONGPOKKAPHAN, V.; TECHKARNJANARUK, S.; PHALAKORNKULE, C. Anaerobic treatment of diluted decanted palm oil mill effluent in a high-rate thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactor: microbial selection and enhanced population of hydrogenotrophic methanogen. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 5523–5537, 2020.

KHEMKHAO, M.; TECHKARNJANARUK, S.; PHALAKORNKULE, C. Simultaneous treatment of raw palm oil mill effluent and biodegradation of palm fiber in a high-rate CSTR. **Bioresource Technology**. v. 177, p. 17–27, 2015.

KIM, W.; WANG, K.; SHIN, S. G.; LEE, S.; HWANG, S. Effect of high temperature on bacterial community dynamics in anaerobic acidogenesis using mesophilic sludge inoculum. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 17-22, 2010.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera. Embrapa suínos e aves, 209 p. 2019.

LIN, L.; XU, F.; GE, X.; LI, Y. Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 151–167, 2018.

MADAKI, Y. S.; SENG, L. Palm oil mill effluent (POME) from Malaysia palm oil mills: waste or resource. **International Journal of Science, Environment and Technology**, v. 2, n. 6, p. 1138–1155, 2013.

MALAKAHMAD, A.; LAHIN, F. A.; YEE, W. Biodegradation of high strength palm oil mill effluent (pome) through anaerobes partitioning in an integrated baffled reactor inoculated with anaerobic pond sludge. **Water Air Soil Pollut**, p. 225:1883, 2014.

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

MASON, J., E. World Energy Analysis: H<sub>2</sub> now or later? **Energy Policy**, v. 35, p. 1329-1315, 2017.

MORAIS, N. W. S., BEZERRA, A. B. S. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAE – Departamento de água e esgoto**, SABESP, n. 215, v. 67, 2019.

MSHANDETE, A., KIVAISI, A., RUBINDAMAYUGI, M., MATTIASSON, B. Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish waste. **Bioresource Technology**. v. 95, p. 19-24, 2004.

MÜLLER, A. A.; FURLAN JUNIOR, J.; CELESTINO, P. F. A. **Embrapa Amazônia Oriental e o Agronegócio do Dendê no Pará**. Belém, PA. Embrapa Amazônia Oriental – Documentos 257, 67 p., 2006.

NABARLATZ, D. A.; BELTRÁN, L. P. A.; SOROCÁ, D. M. H.; BONILLA, D. A. N. Biogas production by anerobic digestion of wastewater from oil palm mill industry. **CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro**, v. 5, n. 2, p. 73-82, 2013.

NAJAFPOUR, G. D.; ZINATIZADEH, A. A. L.; MOHAMED, A. R.; HASNAIN, I. M.; NASROLLAHZADEH, H. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. **Process Biochemistry**, v. 41, p. 370–379, 2006.

NGUYEN, L. N., KUMAR, J., VU, M. T., MOHAMMED, J. A. H., PATHAK, N., COMMAULT, A. S., SUTHERLAND, D.; ZDARTA, J.; TYAGI, V. K.; NGHIEM, L. D. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. **Science of The Total Environment**. 43 p., 2020.

NURLIYANA, M. Y.; H'NG, P. S.; RASMINA, H.; UMIKALSOM, M. S.; CHIN, K. L.; LEE, S. H.; LUM, W. C.; KHOO, G. D. Effect of C/N ratio in methane productivity and biodegradability during facultative co-digestion of palm oil mill effluent and empty fruit bunch. **Industrial Crops and Products**, v. 76, p. 409–415, 2015.

OHIMAIN, E. I.; IZAH, S. C. A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 242-253, 2016.

OLIVEIRA ALVES, S. A. **Sustentabilidade da agroindústria de palma no estado do Pará**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP/ESALQ - Piracicaba/SP. 161 p. 2011.

OWEN, W. F., STUCKEY, D. C., HEALY, J. B., YOUNG, L. Y., McCARTY, P. L. Biossay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. **Water research**. v.13 (6), p. 485-492, 1979.

PARANÁ, 2009. IAP - Instituto Ambiental do Paraná. Resolução nº 021/09. Secretaria do meio ambiente, SEMA, 32 p. 2009.

PARAWIRA, W.; MURTO, M.; ZVAUYA, R.; MATTIASSON, B. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. **Renewable Energy**, v.29, (11), p.1811-1823, 2004.

PIVELI, R. P. Curso: **Qualidade das águas e poluição**: aspectos físico-químicos. Aula 5 – Características físicas das águas. USP/ESALQ. 2005. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%205%20-%20Caracteristicas%20Fisicas%20das%20Aguas.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2020.

POH, P. E.; CHONG, M. F. Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent (POME) with a thermophilic mixed culture cultivated using POME as a substrate. **Chemical Engineering Journal**, v. 164, p. 146–154, 2010.

RIAZ, S.; RHEE, K. Y.; PARK, S. J. Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Biopolymers for Biofuel and Biorefineries. **Polymers**, v. 13, 22 p., 2021.

RIOS, S. A; CUNHA, R. N. V; LOPES, R.; BARCELOS, E. Recursos genéticos de palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jaq.) e caiaué (*Elaeis oleifera* (H.B.K) Cortés). Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2012. 39 p. (Embrapa Amazônia Ocidental. Documentos, 96).

ROMERA, C. M. **Partida do processo de digestão anaeróbia visando o tratamento de efluente da indústria de óleo de palma**. Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília - UNB, Instituto de química. Brasília, 43 p. 2020.

SAAD, M. S.; WIRZAL, M. D. H.; PUTRA, Z. A. Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system. **Journal of Environmental Management**, v. 286, 16 p., 2021.

SAWATDEENARUNAT, C.; NGUYEN, D.; SURENDRA, K. C.; SHRESTHA, S.; RAJENDRAN, K.; OECHSNER, H.; XIE, L.; KHANAL, S. K. Anaerobic biorefinery: Current status, challenges, and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 215, p. 304–313, 2016.

SILVA SANTOS, I. V.; VIEIRA, N. D. B.; BRUNI DE NÓBREGA, L. G.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 131, p. 54-63, 2018.

SINGH, D.; SHARMA, D.; SONI, S. L. ; INDA, C. S.; SHARMA, S.; SHARMA, P. K.; JHALANI, A. A Comprehensive Review on 1st-Generation Biodiesel Feedstock Palm Oil: Production, Engine Performance, and Exhaust Emissions. **BioEnergy Research**. v. 14, 22 p., 2020.

SOARES ALVES, I. R. F. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 118 p, 2008.

SOUZA, R. B.; MACEDO, C. O. Agronegócio do dendê e campesinato no Pará. **Geosul**, Florianópolis. v. 34, n. 71- Dossiê Agronegócios no Brasil, p. 525-549, Abril. 2019.

TANIKKUL, P.; PHALAKOMKULE, C.; CHAMPREDA, V.; PISUTPAISAL, N. Comparative granular characteristics of mesophilic and thermophilic UASB producing biogas from palm oil mill effluent. **Chemical Engineering Transactions**, v. 50, p. 205-210, 2016.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. Integrated Solid Waste Management: **Engineering Principles and Management Issues**. New York: Mcgraw-Hill, 978 p., 1993.

TRISAKTI, B.; MAHDALENA, I.; TASLIM, T.; TURNUZI, M. Effect of temperature on methanogenesis stage of two-stage anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME) into biogas. 29th Symposium of Malaysian Chemical Engineers (SOMChE) 2016. IOP Conf. Series: **Materials Science and Engineering**, v. 206, 8 p., 2017.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), **Air emissions from municipal solid waste landfills** - Background information for proposed standards and guidelines. Publication EPA-450/3-90-011a, North Carolina (1991).

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) as pollution parameters in the Lavapés/Botucatu - SP brook. **Ecl. Quím.** (São Paulo), v. 22, p. 49-66, 1997.

VENTURIERI, A.; MOURÃO JUNIOR, M.; NASCIMENTO JUNIOR, J. D.; BOARI, A. J.; GOMES JUNIOR, R. A. Áreas Prioritárias para a Expansão da Dendeicultura no Estado do Pará: Uma Análise do Zondendê. **Revista Cidadania e Meio Ambiente**. 2013.

VIJAYARAGHAVAN, K.; AHMAD, D. Biohydrogen Generation from palm oil mill effluent using anaerobic contact filter. **Int. J. Hydrogen Energy**. v. 31, p. 1284-1291, 2006.

VILLELA, A. A. Expansão de palma na Amazônia Oriental para fins energéticos. Tese (doutorado), UFRJ/COPPE – Programa de Planejamento energético, 360 p., 2014.

WANG, J.; MAHMOOD, Q.; QIU, J. P.; LI, Y. S.; CHANG, Y. S.; LI, X. D. Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in pilot-scale anaerobic EGSB reactor. **BioMed Research International**, 7 p., 2015.

ZHANG, Q.; HU, J.; LEE, D. J. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. **Renewable Energy**, v. 98, p. 108-119, 2016.

ZHANG, S. L.; SIM Y. C.; JUN W. L.; THONGTHAI W.; CHIN K. C. Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 15, 2019.

ZINATIZADEH, A. A. L.; MOHAMED, A. R.; NAJAFPOUR, G. D.; HASNAIN ISA. M.; NASROLLAHZADEH H. Kinetic evaluation of palm oil mil effluent digestion in a high rate up-flow anaerobic sludge fixed film bioreactor. **Process Biochemical**. v. 41, p.1038–1046, 2006.