



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL - PPGESA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

ANA ROSA BEZERRA CARDOSO

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO EFLUENTE
LÍQUIDO DA PALMA DE ÓLEO (*Elaeis guineensis*) NO ESTADO DO PARÁ.**

BELÉM/PARÁ

2022



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PPGESA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO EFLUENTE LÍQUIDO DA PALMA DE ÓLEO (ELAEIS GUINEENSIS) NO ESTADO DO PARÁ

ENGA° ANA ROSA BEZERRA CARDOSO

ORIENTADOR PROF.DR RUI GUILHERME C.DE MACEDO ALVES

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**



BELÉM (2022)



ANA ROSA BEZERRA CARDOSO

PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO EFLUENTE LÍQUIDO DA PALMA DE ÓLEO (*ELAEIS GUINEENSIS*) NO ESTADO DO PARÁ.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – Mestrado Profissional, PPGESA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Linha de pesquisa: Planejamento, Monitoramento, Operação e Controle de Sistemas de Saneamento.

Orientador: Prof. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves, Dr.

BELÉM/PARÁ

2022



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

C268p Cardoso, Ana Rosa Bezerra.
Produção de biogás e energia elétrica a partir do efluente líquido da palma de óleo (*Elaeis guineensis*) no estado do Pará. / Ana Rosa Bezerra Cardoso. — 2022.
46 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Belém, 2022.

1. Biogás. 2. Digestão anaeróbia. 3. Energia renovável. 4. Palma de óleo. I. Título.

CDD 628.51



ANA ROSA BEZERRA CARDOSO

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO EFLUENTE
LÍQUIDO DA PALMA DE ÓLEO (*Elaeis guineensis*) NO ESTADO DO PARÁ.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – Mestrado Profissional, PPGESA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre (a) em Engenharia Sanitária e Ambiental, na área de concentração em Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macêdo Alves.

DATA DA AVALIAÇÃO: 27/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves
Orientador – PPGESA/ITEC/UFPA

Prof. Dr. André Luiz da Silva Salgado Coelho
Membro – PPGESA/ITEC/UFPA

Eng. M.Sc. Ernildo César da Silva Serafim
Membro – SEMAS/PA

BELÉM/PARÁ

2022



Dedico esta produção aos meus pais Francisca e Severino por serem os pilares de tudo que sou e por todo amor e apoio recebidos.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS pelo dom da vida, pelas oportunidades infinitas de aprendizado, melhoramento pessoal e de fazer sempre o bem.

À minha mãe Francisca e ao meu pai Severino (*in memoriam*), que apesar da ignorância do saber intelectual, possuem uma sabedoria de vida de profunda riqueza e fizeram todos os sacrifícios para proporcionar 'os estudos' aos filhos, em uma época de difícil acesso à informação e condições mínimas de acesso à educação; meu profundo agradecimentos a estes Espíritos lutadores e dedicados à família.

À minha querida tia Benedita Bezerra, a tia Bena, por todo auxílio nessa caminhada estudantil e na vida, sempre disponível em auxiliar no que estiver a seu alcance, gratidão!

Ao meu companheiro de caminhada, Hélio de Freitas, que me incentiva sempre, luta comigo e fica extremamente feliz com minhas vitórias e me levanta sempre nas minhas derrotas e segue comigo mesmo com todas as minhas imperfeições, sem desistir, gratidão! Pois não sou fácil!

Aos meus irmãos, Paulo de Tarço e Aroldo Jefferson, duas grandes figuras que me acompanham desde que nasci.

A uma amizade que nasceu durante o convívio na Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade – SEMAS, com a queridíssima Ana Paula Justino Faria, figura singular, inteligente, estudiosa, agradável e única em todos os seus predicados, de uma disponibilidade em ajudar incrível, pois se não fosse seu apoio, incentivo e auxílio, não estaria escrevendo estes agradecimentos, neste trabalho. Gratidão Paulinha!

Agradeço ao professor Rui Macêdo, um querido que me acompanha desde a graduação e que me incentivou muito a dar mais um passo, retomar os estudos acadêmicos e fazer o mestrado.

Aos queridos amigos de jornada, que estão neste momento único caminhando junto a mim e se não fossem: o exemplo; o vamos lá você consegue! E a torcida para que tudo saísse 'nos conformes' e uma ajudinha de leve, provavelmente teria esmorecido nesta jornada. São eles: Mário Nascimento, Ernildo Serafim, Yasmim Lima, Érika Veloso, Elza Brandão, Sandra Palheta, Elizabeth (Liz), Nazaré Viana, Letícia Silva, Rommel Diniz, Márcio Newber, Isabelle Rodrigues, Tauany Vieira,



Wladimir Lamarão, Greicy Kelly, Anne Pantoja, Denilce Oliveira, Adna Cardoso, Rosa Luz, Leonan Braga, Ana Carolina (Aninha), Michelle Berino e Fábio Ribeiro. Gratidão!

Aos queridos colegas do mestrado, alguns velhos conhecidos e outros novos conhecidos, pelos sufocos e fogueiras puladas (risos), pelo aprendizado recebido e as experiências adquiridas ao longo desta caminhada.

Aos queridíssimos professores, desde a alfabetização até o presente momento, pois sem os conhecimentos repassados, o acolhimento e sua mão amiga, com certeza não teria chegado até aqui, destaque em especial aos mestres do PPGESA pelo apoio, dedicação e esforço dispensados a todos nós, em especial ao prof. Dr. Hélio Almeida, *in memoriam*, pelos conselhos, apoio e pela amizade de longa data, desde o ensino médio.

E por fim, imensa gratidão à Agroindústria Grupo MARBORGES, pelo acolhimento por parte de seus diretores e presidente, por permitir o acesso às suas instalações e informações preciosíssimas repassadas pela Eng^a Elizângela Maia, para a elaboração deste trabalho e à Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade - SEMAS por todo apoio recebido.



"Porque a crença de que existe apenas uma verdade, e de que você próprio está em posse dela, é a raiz de todos os males do mundo." (MAX BORN)



RESUMO

Neste trabalho, pretende-se demonstrar a importância de um sistema de produção de biogás no sentido de otimizar o uso dos resíduos líquidos advindos do processo produtivo da palma de óleo, resíduo este denominado POME (*Palm oil mill effluent*), que contém alta concentração de matéria orgânica, sendo uma fonte em potencial de produção de biogás para geração de energia elétrica e biocombustível. Nesse contexto, objetiva-se avaliar o processo de produção de biogás e energia elétrica por meio de uma lagoa anaeróbia coberta a partir do POME implantado por uma indústria no Estado do Pará. Para isso, levantou-se informações sobre o processo industrial, o tipo de tratamento de efluente que é utilizado e seus componentes, e o processo de transformação de resíduo líquido em um novo produto. Visitas foram realizadas na indústria para conhecimento das instalações, acompanhamento da operação do sistema e o funcionamento dos equipamentos utilizados para a captação do biogás e conversão em energia elétrica. Foram disponibilizados dados referentes aos parâmetros DQO, pH e temperatura que são utilizados para o controle operacional realizado na lagoa. O sistema iniciou sua operação em fevereiro/2021, mas os dados foram referentes ao período de maio/2021 a abril/2022. Os valores médios obtidos na operação do sistema alusivos ao pH foi de 7,43 e a temperatura de 38,30 °C com uma COV de 24,73 kgDQO/m³.dia. A lagoa anaeróbia apresentou uma eficiência de remoção de DQO de aproximadamente 91% e produção média de 139,04 m³/dia de metano. O metano produzido a partir do POME da indústria gerou uma média no período mencionado de 28,01 MWh de energia elétrica que foram utilizados para alimentação da planta industrial. Diante dos resultados analisados, corrobora-se a viabilidade de utilização do efluente líquido oriundo do beneficiamento do fruto da palma de óleo para geração de biogás e energia elétrica, contribuindo assim com a melhoria da qualidade do efluente final.

Palavras-chave: biogás; digestão anaeróbia; energia renovável.



ABSTRACT

In this work, we intend to demonstrate the importance of a biogas production system in order to optimize the use of liquid residues arising from the oil palm production process, a residue called POME (Palm oil mill effluent), which contains a high concentration of organic matter, being a potential source of biogas production for the generation of electricity and biofuel. In this context, the objective is to evaluate the process of producing biogas and electricity through a covered anaerobic lagoon based on the POME implemented by an industry in the State of Pará. For this, information was gathered about the industrial process, the type of effluent treatment that is used and its components, and the process of transforming liquid waste into a new product. Visits were carried out in the industry to learn about the facilities, monitor the operation of the system and the operation of the equipment used to capture biogas and convert it into electricity. Data regarding the COD, pH and temperature parameters that are used for the operational control carried out in the lagoon were made available. The system started operating in February/2021, but the data referred to the period from May/2021 to April/2022. The average values obtained in the operation of the system referring to the pH was 7.43 and the temperature of 38.30 °C with a VOC of 24.73 kgCOD/m³.day. The anaerobic lagoon showed a COD removal efficiency of approximately 91% and an average production of 139.04 m³/day of methane. The methane produced from the industry's POME generated an average of 28.01 MWh of electricity in the aforementioned period, which were used to power the industrial plant. In view of the results analyzed, the viability of using the liquid effluent from the processing of the oil palm fruit for the generation of biogas and electricity is confirmed, thus contributing to the improvement of the quality of the final effluent.

Keywords: biogas; anaerobic digestion; renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamentos utilizados e sequencia dos frutos para extração do óleo e palma.	18
Figura 2 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (com redução de sulfato).....	19
Figura 3 – Localização geográfica da indústria	26
Figura 4 – Visualização da área industrial e em destaque a localização da Lagoa Anaeróbia no sítio da indústria	26
Figura 5 – Torre de Resfriamento	27
Figura 6 – Lagoa coberta	27
Figura 8 – Analisador de gás.....	28
Figura 7 – Leitor instantâneo.....	28
Figura 10 – Geradores de energia	29
Figura 9 – Lavador de gases.....	29
Figura 11 – Desenho esquemático da lagoa coberta, vista superior.....	30
Figura 12 – Desenho esquemático da lagoa coberta, corte longitudinal	30
Figura 13– Fluxograma do processo produtivo do óleo de palma e palmiste	32
Figura 14 – Fluxograma do processo de tratamento na lagoa anaeróbia e a utilização dos subprodutos.....	32
Figura 15 – Valores do pH médio no período de 12 meses comparando com o valor ótimo para operação da lagoa coberta.....	37
Figura 16 – Temperatura média no período de 12 meses comparando com o valor ótimo para operação da lagoa coberta.....	38



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos microrganismos metanogênicos.....	21
Tabela 2 – Composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa.....	24
Tabela 3 – Valores médios dos parâmetros da caracterização do efluente bruto (mais relevantes ao processo de digestão anaeróbia).....	33
Tabela 4 – Quantidade de efluente gerado pela indústria no período de 12 meses, maio 2021 a abril 2022.....	34
Tabela 5 – Caracterização do Biogás a partir do POME com a média da geração dos gases presentes neste em um período de 12 meses.....	35
Tabela 6 – Valores médios mensais dos parâmetros controlados.....	36
Tabela 7 - Valores médios de geração de energia.....	39



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	O beneficiamento da palma de óleo e a geração de efluentes.....	16
3.2	Digestão anaeróbia.....	18
3.3	Lagoa anaeróbia.....	22
3.4	O biogás e sua composição.....	23
4	METODOLOGIA	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos vetores básicos de infraestrutura necessária ao desenvolvimento humano (OLIVEIRA,2015). No Brasil, em função do crescimento populacional, a demanda por energia vem crescendo. Fontes de energia renováveis e de biocombustíveis recebem cada vez mais atenção como substitutos dos combustíveis fósseis. As biomassas vegetais e animais possuem características semelhantes quando o assunto é aproveitamento energético. (SILVA, TREVISAN, 2019).

As principais formas de conversão energética são: **(1)** combustão direta – com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra; **(2)** processos termoquímicos – gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação; e/ou **(3)** processos biológicos – digestão anaeróbia e fermentação (PEREIRA *et al.*, 2015).

A Amazônia é uma grande produtora de biomassa, e dentre as culturas produzidas destaca-se o dendê (*Elaeis guineenses*) também conhecido como palma de óleo. Esta palmeira oleaginosa de origem africana foi introduzida no Brasil por volta do Século XVI, por ocasião do tráfico negreiro (PANDOLFO, 1981 *apud* OLIVEIRA, 2015).

O biogás é uma alternativa viável de conversão energética e tem sido produzido a partir de biomassa e/ou da fração biodegradável de resíduos, que pode ser purificado até a qualidade do gás natural, para utilização como biocombustível. Uma proposta moderna é o uso da biomassa proveniente do dendê para a produção de biogás, com altas probabilidades de efetiva implantação, devido ao aumento da produção dessa palma no Estado do Pará (BROWN *et al.*, 2005; FAO, 2015). O Estado do Pará tem condições favoráveis à plantação de dendê, em função do clima, da umidade e temperatura que facilitam o desenvolvimento desta planta, além de incentivos de políticas públicas à sua produção (Furlan-Júnior 2006; Müller *et al.* 2006).

O dendê se desenvolve bem em regiões tropicais, com clima quente e úmido (FURLAN-JÚNIOR, 2006). Em se tratando do mercado mundial, a Malásia representa

o maior produtor de óleo de dendê, com cerca de 2,5 milhões de hectares de área cultivada, movimentando US\$ 9 bilhões/ano e gerando, na zona rural, mais de 250.000 empregos diretos.

O fruto do dendê produz dois tipos de óleos que são obtidos através de processos físicos, pressão e calor: **(1)** o óleo de dendê ou de palma que é extraído do mesocarpo, a parte externa do fruto; e **(2)** o óleo de palmiste, extraído da semente do fruto, e que é similar aos óleos de coco e babaçu. Cada hectare de plantio de dendê produz, anualmente, de 0,4 a 0,6 toneladas desse óleo, o que representa um importante volume produtivo (ABRAPALMA, 2000).

No presente, a cultura do dendê representa uma das atividades agroindustriais mais relevantes das regiões tropicais úmidas. Ao mesmo tempo, é considerada uma cultura que possui um forte apelo ecológico, pois: apresenta baixos níveis de agressão ambiental, adapta-se bem aos solos pobres, protege o solo da lixiviação e da erosão e são, também, chamadas de florestas plantadas. Tal cultura possui grande potencial para absorver o gás carbônico, perdendo somente para o eucalipto. Além do mais, auxilia na restauração do balanço hídrico e climatológico, contribui de forma expressiva para a reciclagem e liberação de O₂, e combate a elevação excessiva das temperaturas médias da Terra.

O dendê pode ser utilizado em diversos processos industriais, como nas indústrias cosméticas e alimentícias (MULLER *et al*, 2006) e também para recursos energéticos, como na produção de biocombustível (ANDERSON 2008; KONGSAGER & REENBERG 2012; ALVES, S. *et al*, 2013) a partir do POME (*Palm Oil Mill Effluent*), como é denominado o efluente do fruto do dendê após o processo industrial (TEIXEIRA, 2019). Esse efluente contém uma elevada carga de matéria orgânica, condição ideal para produção de biogás.

Após o processamento do fruto de dendê na indústria, gerando o POME, este é direcionado para o sistema de tratamento, onde se inicia o processo de produção de biogás que consiste no seu isolamento, para que não ocorra o contato com o oxigênio presente na atmosfera. O POME é recebido em um biodigestor isolado, visto que os microrganismos anaeróbios são responsáveis pela produção dos gases, e que como próprio nome diz, trabalham na ausência do oxigênio. Durante esse processo é

importante o controle de alguns parâmetros como temperatura, pH, alcalinidade, quantidade de sólidos, dentre outros. Uma forma de melhorar as condições necessárias para a produção de biogás é a implantação de recirculação de lodos, agitação e remoção do excesso de lodo produzido ao longo do processo. Assim, todo o processamento deve ser acompanhado e controlado para que se tenha condições ideais para o desenvolvimento dos microrganismos anaeróbios, resultando em equilíbrio dinâmico no sistema para obter-se maior eficiência na produção do biogás.

Esse biogás pode conter impurezas como substâncias que conferem características corrosivas, caso do Sulfeto de hidrogênio (H_2S), comumente chamado de gás sulfídrico e a água (RORATTO *et al.*, 2014), por esse motivo precisa ser purificado para poder ser utilizado para geração de energia.

Ante a todos os fatores citados, sendo o estado do Pará o maior produtor de frutos de palma no Brasil, tendo o efluente das indústrias produtoras de palma uma fonte de elevada matéria orgânica e tratada como um problema de destinação adequada há questionamentos se o resíduo líquido do dendê é realmente alternativa viável como fonte de energia renovável. Diante de tal questionamento este estudo de caso propõe-se a verificar se o POME tem potencial de produção de biogás necessária para a geração de energia (elétrica?) de uma indústria no Estado do Pará.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o processo de produção de biogás a partir do fruto do dendê em uma lagoa anaeróbia coberta em uma indústria do Estado do Pará para aproveitamento energético.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a geração de biogás em relação ao tratamento realizado em uma lagoa anaeróbia coberta de uma indústria produtora de óleo de palma.
- Caracterização do efluente e do biogás obtido no sistema de produção adotado.

- Verificar a geração de energia elétrica produzida por esta biomassa e a viabilidade de sua utilização a partir da geração de energia produzida.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O beneficiamento da palma de óleo e a geração de efluentes.

O Estado do Pará concentra mais de 90% dos plantios de palma de óleo (*Elaeis guineensis Jacq*) do Brasil (ALVES, S. *et al*, 2013) e a indústria de extração deste óleo está concentrada na Mesorregião do Nordeste Paraense, composta por 49 municípios.

Durante o processo de beneficiamento dos frutos do dendê, no qual se extrai o óleo de palma bruto, resíduos sólidos e líquidos são gerados, como as biomassas, fibras e cascas, os quais, no Brasil, são inseridos novamente no processo produtivo, substituindo o carvão nas caldeiras. Contudo, parte destes podem ser reaproveitados de outras maneiras, como o efluente líquido para a geração de energia. (KÜHL, 2017).

Conforme Favaro *et al* (2022), a palma de óleo contém óleo tanto na polpa quanto na amêndoa. Portanto, são produzidos industrialmente dois tipos de óleo oriundos do fruto da palma. O óleo da polpa é denominado de óleo de palma, e o da amêndoa é denominado óleo de palmiste, ou *palm oil* e *kernel oil* em inglês, respectivamente. O processamento do fruto inicia em até 24 horas após a colheita para evitar a acidificação do óleo (Poku, 2002; Basiron, 2005 *apud* Favaro *et al*, 2022). Como os frutos da palma de óleo são indeiscentes, ou seja, não caem do cacho, a colheita é feita retirando o cacho inteiro e transportando-o para a planta industrial, onde ocorre a primeira etapa do processamento, que consiste na esterilização do cacho. A esterilização acontece a uma pressão de vapor de, aproximadamente, 3 kg/cm² (143 °C) por 60 minutos (Basiron, 2005 *apud* Favaro *et al*, 2022). Esse processo tem como funções (Poku, 2002; Basiron, 2005 *apud* Favaro *et al*, 2022):

- Inativação de enzimas que provocam o aumento de ácidos graxos livres.
- Auxílio no procedimento da debulha.
- Condicionamento da polpa, o que facilita a liberação dos glóbulos de óleo.
- Desidratação dos frutos, o que funciona como um pré-tratamento dos caroços para a recuperação das amêndoas e ajuda a extração do óleo da polpa

no processo de prensagem. Em seguida, ocorre a debulha, que é o processo de retirada dos frutos esterilizados dos cachos, por meio de um debulhador, que consiste em um longo tambor rotativo com paredes vazadas, separando os frutos dos cachos. Os cachos vazios podem ser utilizados como fertilizantes nas plantações (Poku, 2002 *apud Favaro et al*, 2022).

A próxima etapa é a digestão, que tem como finalidade romper as membranas e paredes celulares para a liberação dos glóbulos de óleo. Normalmente, o digestor (cozinhador) é um equipamento cilíndrico com uma camisa de vapor acoplada, que possibilita aquecimento, e braços radiais no eixo central, proporcionando a maceração da polpa. As condições ótimas de operação são alcançadas com a mistura dos frutos a uma temperatura de 95 °C a 100 °C por cerca de 20 minutos (Basiron, 2005 *apud Favaro et al*, 2022). Na sequência ocorre a extração do óleo por prensagem. Nessa etapa, separam-se o óleo bruto – que é uma mistura de óleo, água e sólidos – da torta residual, que contém fibras e as amêndoas dos frutos. As prensas utilizadas são as contínuas, que regulam a pressão por meio da abertura ou fechamento de um cone em sua saída (Ramalho; Suarez, 2013 *apud Favaro et al*, 2022).

O óleo bruto de palma é então submetido à clarificação para remover impurezas (Poku, 2002 *apud Favaro et al*, 2022). Passa por uma tela vibratória para retirada de sólidos finos e grossos até um decanter de duas ou três fases (tridecanter), que é uma centrífuga horizontal contínua com um segmento cilíndrico, para a separação do óleo e dos resíduos (uma fase líquida pesada), um segmento cônico, onde ocorre a secagem dos sólidos recuperados, e uma seção espiral, que possibilita o deslocamento dos sólidos, removendo-os do equipamento. O resíduo, chamado de POME, sigla em inglês de *Palm Oil Mill Effluent*, é conduzido ao tratamento de efluentes, e os sólidos recuperados são incorporados à torta residual da prensagem. O óleo clarificado é purificado com o auxílio de uma centrífuga, seguido de secagem em secador a vácuo para a retirada da água residual (Dorsa; Caranti, 2016; Fernández et al., 2016 *apud Favaro et al*, 2022). Por fim, o óleo de palma seco é encaminhado aos tanques de armazenamento, que mantêm uma temperatura entre 32 °C e 40 °C

para evitar danos ao produto (Basiron, 2005 *apud* Favaro *et al*, 2022). Na Figura 1, tem-se um esquema com os equipamentos utilizados na extração do óleo de palma.

Figura 1 – Equipamentos utilizados e sequencia dos frutos para extração do óleo e palma.



Fonte: Favaro *et al*, 2022.

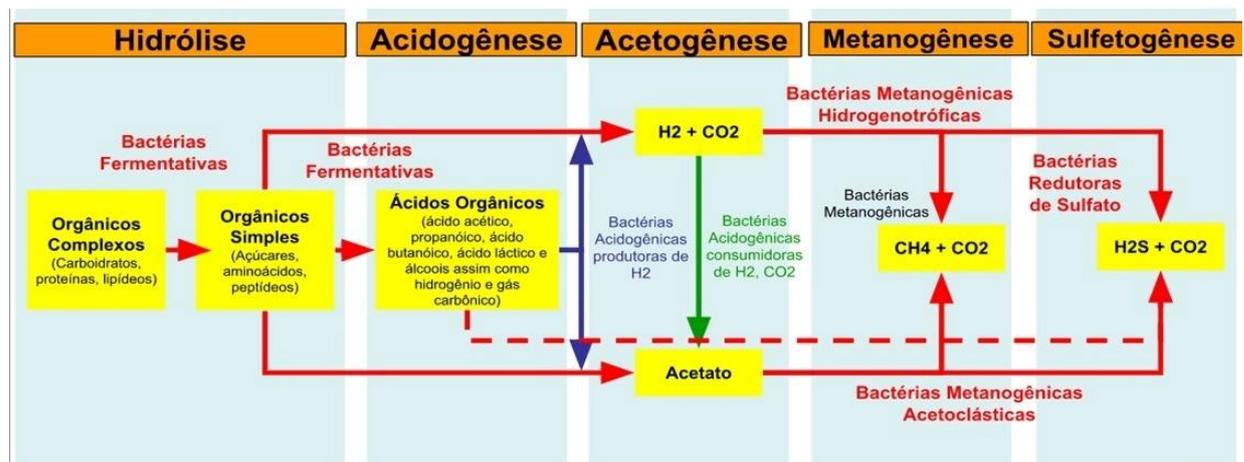
Segundo Ahmed *et al.* (2014) o POME, é constituído em sua maioria por água (95 a 96%), sólidos suspensos (4 a 5%), óleos e graxas (0,6 a 0,7%), além de compostos fenólicos, aminoácidos e nutrientes orgânicos encontrados em quantidades de partes por milhão (ppm). A partir do efluente do processo de beneficiamento do dendê são gerados em torno de 0,65 m³ de efluente/tonelada de cachos de frutos frescos (CFF); 25 m³ de biogás/m³ de efluente; 0,625 m³ de CH₄/m³ biogás e energia gerada de 10 kWh/m³ CH₄ (KÜHL, 2017 *apud* SARAWAK ENERGY, 2016).

3.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio molecular (O₂) e sob a ação de uma associação de microrganismos (fungos, protozoários e, principalmente, bactérias anaeróbias e facultativas), que transformam a matéria orgânica solubilizada, ou em estado semilíquido (lodo), em biogás, constituído, sobretudo, de gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂) (ALVES, R., 2007).

Segundo Cabral (2016) na digestão anaeróbia, diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico, amônia, e novas células bacterianas. Para que os processos metabólicos da digestão anaeróbia ocorram é necessária a atividade conjunta de ao menos três grupos de microrganismos distintos: as bactérias fermentativas ou acidogênicas, as bactérias sintróficas acetogênicas e os microrganismos metanogênicos. Estes grupos microbianos e os processos metabólicos podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (com redução de sulfato).



Fonte: www.probiogás.com, acesso em 21/01/ 2022.

As principais etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbia são:

1. Hidrólise

Nesta etapa o material orgânico particulado é convertido em compostos solúveis mais simples que serão utilizados pelas bactérias que realizam a fermentação (CABRAL, 2016 *apud* METCALF; EDDY, 2003). A hidrólise é a etapa de degradação da matéria orgânica insolúvel e com componentes de alto peso molecular como lipídios, polissacarídeos e ácidos nucleicos em substâncias orgânicas solúveis, como os aminoácidos e ácidos graxos.

2. Acidogênese

Os produtos solúveis da primeira etapa (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) são fermentados pelos microrganismos acidogênicos em ácidos orgânicos

(principalmente acético, butírico e propiônico), alcoóis e compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S). (CABRAL, 2016 *apud* VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

3. Acetogênese

Os microrganismos acetogênicos convertem compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos, como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. É etapa reguladora no processo de digestão anaeróbia, pois 60 a 70% dos elétrons do substrato original são canalizados para a produção de acetato. Em decorrência, a remoção de DQO da fase líquida depende da conversão de acetato em metano, o que é feito pelos microrganismos metanogênicos acetoclásticos. (CABRAL, 2016 *apud* VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

4. Metanogênese

É a última etapa da digestão anaeróbia, na qual ocorre a conversão do acetato e do hidrogênio produzidos nas etapas anteriores em biogás (CH_4 , CO_2 e outros gases) pelas arqueas metanogênicas – um grupo verdadeiramente reconhecido como distinto das bactérias típicas. Em função de sua fisiologia, as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais: i) metanogênicas acetoclásticas e ii) metanogênicas hidrogenotróficas (CHERNICHARO, 2016).

- Metanogênicos acetoclásticos: usam acetato como fonte de carbono e energia, produzindo gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4);
- Metanogênicos hidrogenotróficos: utilizam H_2 como fonte de energia (doador de elétrons) e CO_2 comoceptor de elétrons para produção de metano.

Muitos dos compostos intermediários formados durante o processo de digestão anaeróbia passam a ser utilizados pelas Bactérias Redutoras de Sulfato, provocando uma competição delas com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas, pelos substratos disponíveis. Devido a essa competição dois produtos finais passam a ser formados: metano (através da metanogênese) e sulfeto (através da sulfetogênese), sendo a concentração de sulfato que define qual o processo é predominante. Assim sendo, o excesso de sulfatos pode prejudicar a produção de metano, e a sulfetogênese é, portanto, indesejável neste processo (CHERNICHARO, 2007 *apud* CABRAL, 2016).

A digestão anaeróbia para se completar depende de certas condições ambientais, além da interação entre bactérias fermentativas e metanogênicas e de um delicado balanço do sistema ecológico, no qual as *Arqueas* metanogênicas são mais sensíveis às variações das condições do meio (ALVES, R., 2007), os fatores fundamentais que influenciam neste processo são: nutrientes, temperatura, pH, alcalinidade e ácidos voláteis

- Nutrientes - Como a composição química exata das células microbianas é raramente conhecida, os requisitos de nutrientes são determinados com base na composição empírica das células microbianas, pois quase todas são formadas por tipos similares de compostos e apresentam composição química similares. (CHERNICHARO, 2016). Na Tabela 1 é apresentada a composição química dos microrganismos metanogênicos.

Tabela 1 – Composição química dos microrganismos metanogênicos

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elemento	Concentração (g/kg SST)	Elemento	Concentração (mg/kg SST)
Nitrogênio	65	Ferro	1.800
Fósforo	15	Níquel	100
Potássio	10	Cobalto	75
Enxofre	10	Molibdênio	60
Cálcio	4	Zinco	60
Magnésio	3	Manganês	20
		Cobre	10

Fonte: Letting *et al.* (1996) *apud* Chernicharo (2016).

Segundo Chernicharo (2016) os nutrientes necessários à estimulação nutricional de microrganismos metanogênicos, em ordem decrescente de importância, são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B₁₂.

- Temperatura – Dos fatores que influenciam no crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes na seleção das espécies. (CHERNICHARO, 2016), alterações na temperatura podem ocasionar um desequilíbrio na atividade biológica já que os microrganismos não possuem meio de controlar a temperatura interna, que é então determinada pela temperatura externa do ambiente, podendo

assim provocar variações em parâmetros como alcalinidade, produção de gás, etc. (ALVES, R., 2007; SEVILLANO, 2018 *apud* PONTES, 2003).

A temperatura determina em parte, a velocidade de crescimento e, conseqüentemente, a densidade de microrganismos da biomassa. A temperatura ótima de crescimento é aquela que possibilita o mais rápido crescimento, durante o menor período de tempo. Cada espécie cresce sob temperaturas situadas em faixas características, sendo classificados nos grupos: psicrófilas, mesofílicas e termofílicas. (PEREIRA; CAMPOS; MOTERANI, 2009). A faixa psicrófila fica em torno de 4 a 15 °C, a faixa mesófila entre 20 a 40 °C e a faixa termófila entre 45 a 70 °C e acima. (CHERNICHARO, 2016)

- pH, alcalinidade e ácidos voláteis – Estes três fatores ambientais estão intimamente relacionados entre si, sendo igualmente importantes para o controle e a operação adequada dos processos anaeróbios. Os microrganismos produtores de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 a 7,4, embora se possa conseguir estabilidade, na formação de metano, numa faixa mais ampla de pH, entre 6,0 e 8,0, valores de pH fora destas faixas devem ser evitados, uma vez que podem inibir a formação de metano. (CHERNICHARO, 2016)

A interação da alcalinidade com os ácidos voláteis, durante a digestão anaeróbia, fundamenta-se na capacidade de alcalinidade do sistema neutralizar os ácidos formados no processo e também em tamponar o pH, na eventualidade de acumulação de ácidos voláteis. (CHERNICHARO, 2016). Os ácidos graxos voláteis devem estar em equilíbrio com a alcalinidade do sistema. (PEREIRA; CAMPOS; MOTERANI, 2009).

3.3 Lagoa anaeróbia

As lagoas anaeróbias tem sido utilizadas para o tratamento de esgotos domésticos e despejos industriais predominantemente orgânicos, com altos teores de DBO, como frigoríficos, laticínios, bebidas, indústrias alimentícias, etc. (VON SPERLING, 1996).

A utilização da lagoa anaeróbia coberta é apropriada para águas residuárias que contenham altas concentrações de sólidos suspensos, óleo e gordura. A

acumulação de um lodo de biomassa sedimentada resulta em um longo tempo de retenção de sólidos e maximiza a destruição endógena das partículas, minimizando a quantidade de lodo de excesso. Os nutrientes liberados do decaimento endógeno tornam-se disponíveis para reuso dos microrganismos ativos. Periodicamente o lodo acumulado deve ser removido para um processo de disposição final. Recomenda-se que o tempo de detenção hidráulica (TDH) deva estar entre 6 e 30 dias e que a carga orgânica volumétrica (COV) aplicada, seja menor que $2 \text{ kg SVT/m}^3\text{.dia}$ para dejetos suínos (ALVES, R., 2007). Uma outra vantagem adicional da lagoa anaeróbia coberta é que o grande volume do reator acaba promovendo uma equalização do afluente, amenizando choques de carga orgânica ou tóxica (ALVES, R., *apud* 2007 MALINA JR. & POHLAND, 1992).

Apesar do tempo de residência celular mínimo das arqueas metanogênicas acetoclásticas ser da ordem de 3,3 dias, para uma temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, existe uma tendência de diminuir os tempos de detenção nas lagoas anaeróbias, para em torno de 1 a 2 dias. Estas condições podem ser obtidas através de uma melhor distribuição da afluente pelo fundo da lagoa, em vários pontos, assim, são favorecidos os mecanismos de desenvolvimento de uma biomassa com melhores características de sedimentabilidade e de atividade, favorecendo a sua retenção no sistema. (CHERNICHARO, 2016).

3.4 O biogás e sua composição

Segundo Cabral (2016) o biogás é constituído por uma mistura de gases como o metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), seguido em menores concentrações por hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e gás sulfídrico (H_2S), entre outros. Geralmente, na saída do digestor, o biogás apresenta-se saturado em vapor de água. A composição do biogás depende da natureza do resíduo digerido e das condições em que a digestão anaeróbia se processa (CABRAL, 2016 *apud* MONTE, 2010). A proporção de cada gás depende de vários parâmetros, como o tipo de biodigestor e o substrato a digerir, mas a mistura é essencialmente constituída por metano e dióxido de carbono. Seu poder calorífico está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa (CABRAL, 2016 *apud* COSTA, 2006). As propriedades energéticas do biogás derivam do seu principal constituinte, o metano.

O metano é um gás incolor, inodoro e inflamável, e um dos seis principais gases que contribuem para o aquecimento global (CABRAL, 2016 *apud* MONTE, 2010). Os restantes constituintes do biogás, apesar de estarem presentes em quantidades muito limitadas, podem afetar o seu rendimento. Portanto, é importante conhecer as propriedades que lhe estão associadas e como estas podem influenciar o seu rendimento. Pela sua importância, destacam-se as seguintes propriedades do biogás (CABRAL, 2016 *apud* CCE, 2000 *apud* MONTE, 2010):

- Poder Calorífico Inferior (PCI): corresponde à energia liberada, de uma massa de combustível, sob a forma de calor, não incluindo a energia despendida na vaporização da água presente no combustível. Este parâmetro permite aferir a medida exata do conteúdo energético útil do combustível. O poder calorífico do biogás depende da concentração do metano;
- Limites de inflamabilidade: correspondem aos percentuais mínimos e máximos de um combustível numa mistura ar/combustível para as quais essa mistura se inflama. É um parâmetro crítico na combustão com biogás, devido à diluição do CH₄ com CO₂ e outros gases inertes. (CABRAL, 2016)

Na Tabela 2 consta a composição média do biogás para diferentes substratos e os percentuais de metano produzido em cada um deles.

Tabela 2 – Composição média do biogás para diferentes tipos de biomassa.

Constituinte	Composição biogás		
	Metano (CH ₄)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)
Lodo de esgoto doméstico	55 – 75%	30 – 45%	1 – 2%
Amidonaria (Mandioca)	54,3 %	44,9%	0,01%
Bovinocultura leiteira	59,6%	39,1%	0,033 %
Misto (aves de postura + bovinocultura de corte)	69,2%	29,8%	0,006%
Abatedouro de aves	68,2%	29,6%	0,19%
Suinocultura – Terminação	62,0%	37,0%	0,28%
Suinocultura – Produção de leitões	68,4%	30,6%	0,13%

Fonte: adaptado de LIMA, 2015 e LINS, 2015.

4 METODOLOGIA

O sistema de tratamento de efluente com a finalidade de produzir biogás para aproveitamento energético estudado neste trabalho opera em escala real tratando o efluente de uma indústria de extração de óleo de palma no estado do Pará.

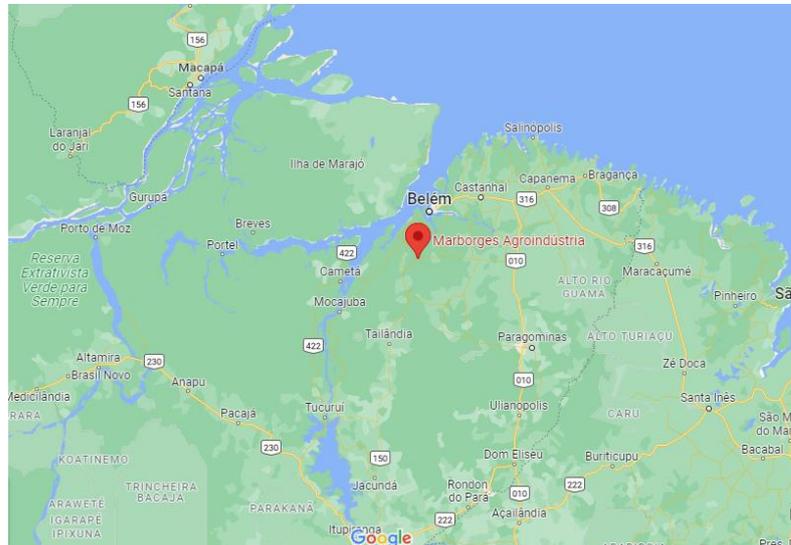
Para a fundamentação dos estudos a serem apresentados nesta obra, foram realizados levantamentos bibliográficos em revistas científicas, artigos, sites especializados e livros no que concerne ao tema a ser discutido, além das informações levantadas no processo de licenciamento ambiental solicitado junto a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade – SEMAS para a implantação do sistema em operação, onde foram levantadas as informações como: dados sobre a empresa a ser estudada, o processo industrial, o tipo de tratamento de efluente utilizado, a transformação de resíduo líquido em um novo produto, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Ocorreram ainda visitas na indústria para conhecimento das instalações e acompanhamento da operação do sistema com o funcionamento dos equipamentos utilizados para a captação do biogás e transformação em energia.

Foram analisados os dados referentes aos parâmetros DQO, pH, temperatura e acompanhado o controle operacional realizado. O período analisado compreende os meses de maio de 2021 a abril de 2022.

A indústria em estudo está localizada no município de Moju, no Estado do Pará, nas coordenadas geográficas 1°59'21.01"S e 48°36'23.17"O, como apresentado na Figura 3. Tem produção média de 165 ton/dia de óleo, possui área total de 13.000 ha e 9.069,75 km² de área construída, tem funcionamento de 12 meses/ano, 25 dias/mês e 16 a 20 horas/dia em sistema de turnos. O sistema de tratamento, como já mencionado, é por meio de lagoa anaeróbia como complemento ao tratamento de efluentes e com finalidade de produção de biogás para geração de energia, visto que anteriormente o efluente era destinado somente à fertirrigação.

Figura 3 – Localização geográfica da indústria



Fonte: Google Maps, 2022

A Figura 4 apresenta um layout de locação da indústria com destaque para a localização do sistema de tratamento por lagoa anaeróbia coberta para produção de biogás.

Figura 4 – Visualização da área industrial e em destaque a localização da Lagoa Anaeróbia no sítio da indústria



Fonte: SEMAS, 2018

O sistema da Unidade Produtora de Biogás (UPB) é composto por: uma torre de resfriamento, pois o efluente vem do processo em temperatura entre 60 a 90 °C (Figura 5); uma lagoa anaeróbia impermeabilizada e coberta (Figura 6), com um

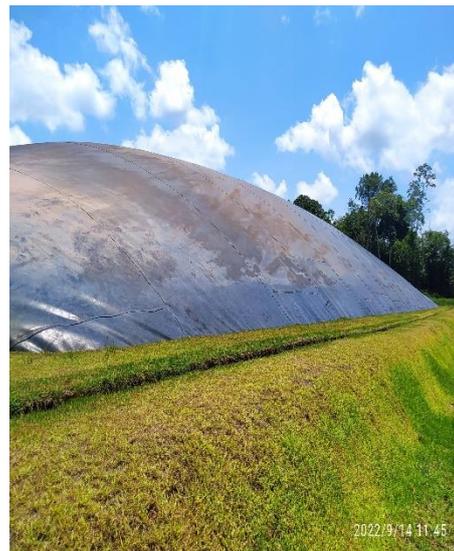
sistema de agitação e recirculação do efluente, com monitoramento realizado por meio de uma central de controle automatizada que acompanha o funcionamento da lagoa, a geração de biogás e a geração e distribuição de energia; sensores de leitura instantânea registram os parâmetros pH e temperatura (Figura 7); um aparelho de leitura do biogás, por meio do equipamento portátil denominado analisador de gás, marca LANDTEC, modelo GA5000 (Figura 8), com o objetivo de acompanhar a eficiência do lavador de gases para controle do gás sulfídrico ou Sulfeto de Hidrogênio (H_2S), bem como realiza ainda a leitura da produção dos demais gases que compõem o biogás (CO_2 , O_2 , CH_4) e o teor de H_2O .

Figura 5 – Torre de Resfriamento



Fonte: Autora, 2022

Figura 6 – Lagoa coberta



Fonte: Autora, 2022

Figura 8 – Leitor instantâneo



Fonte: Autora, 2022

Figura 7 – Analisador de gás



Fonte: Autora, 2022

Foram realizados registros diários em planilhas de acompanhamento e controle da purificação do biogás, com informações referentes a esses gases, antes e depois da lavagem do gás registrando os percentuais dos gases; o sistema possui um dessulfurizador, que é uma torre de lavagem biológica que permite a remoção dos compostos corrosivos, também chamado de lavador de gases (Figura 9); sendo posteriormente o biogás direcionado por tubulação ao gerador de energia (Figura 10), que segue ao transformador, para redução de tensão e posteriormente levada à linha de transmissão que segue até alimentação para a indústria.

Figura 10 – Lavador de gases



Fonte: Autora, 2022

Figura 9 – Geradores de energia



Fonte: Autora, 2022

A lagoa anaeróbia construída apresenta dimensões de 84x32x5 metros de profundidade, com volume de 13.000 m³, apresenta capacidade para tratamento de 40 m³/h, é coberta e revestida com geomembrana de PEAD espessura de 1,5 mm com ancoragem na lateral de ambas as mantas em um sistema de vala perimetral e as membranas são soldadas juntas sob pressão e tensão, garantindo assim a hermeticidade do biodigestor, a cobertura é para o aprisionamento do biogás gerado e o revestimento é para evitar a percolação do efluente para o solo, possui um sistema de drenagem da água pluvial, que circundam todo o perímetro da lagoa. Apresenta tubulações hidráulicas internas em PEAD de 125 mm para realizar a recirculação e agitação do material para a mistura do efluente bruto com o recirculado em digestão. O bombeamento é controlado por sensores de pressão manejados por um sistema de supervisão por radiofrequência, o qual tem supervisão de operação em campo. Tendo no sistema de agitação e recirculação o alcance de uma performance de redução de DQO do POME em 85%. (SEMAS,2018). Nas Figuras 11 e 12 mostra-se um desenho esquemático da lagoa anaeróbia coberta.

Figura 11 – Desenho esquemático da lagoa coberta, vista superior.

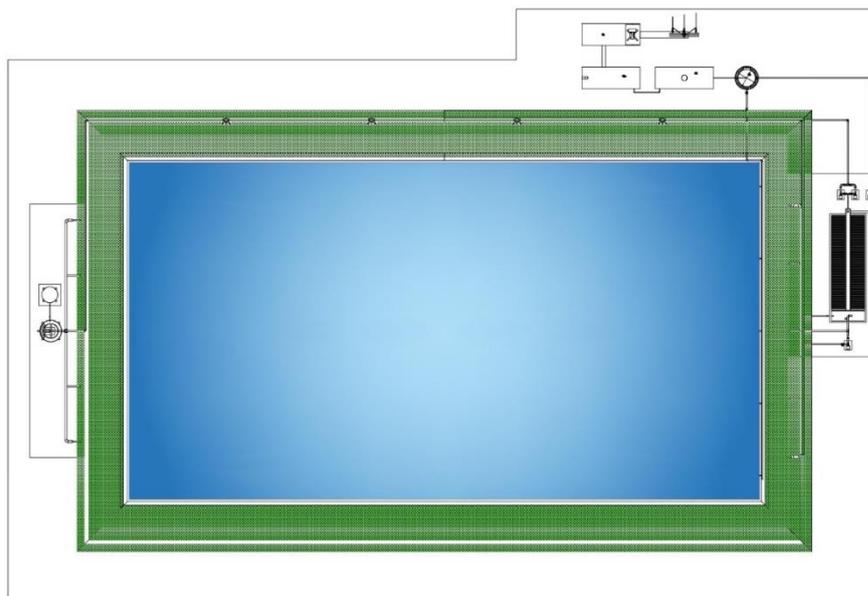


Figura 12 – Desenho esquemático da lagoa coberta, corte longitudinal



Fonte: Autora, 2022

A partida da lagoa foi realizada no mês de fevereiro/2021 com a inoculação de 3.000 m³ de efluente advindo do tratamento por lagoas de outra indústria que desenvolve a mesma atividade na vizinhança, sendo realizado em duas etapas: primeiro um volume inicial de 1.500 m³ e posteriormente mais 1.500 m³, sendo o volume útil da lagoa de 13.000 m³ e o tempo de detenção hidráulica de 45 dias. Após a inoculação do esgoto já em processo de digestão, foi iniciado o teste de comissionamento dos equipamentos.

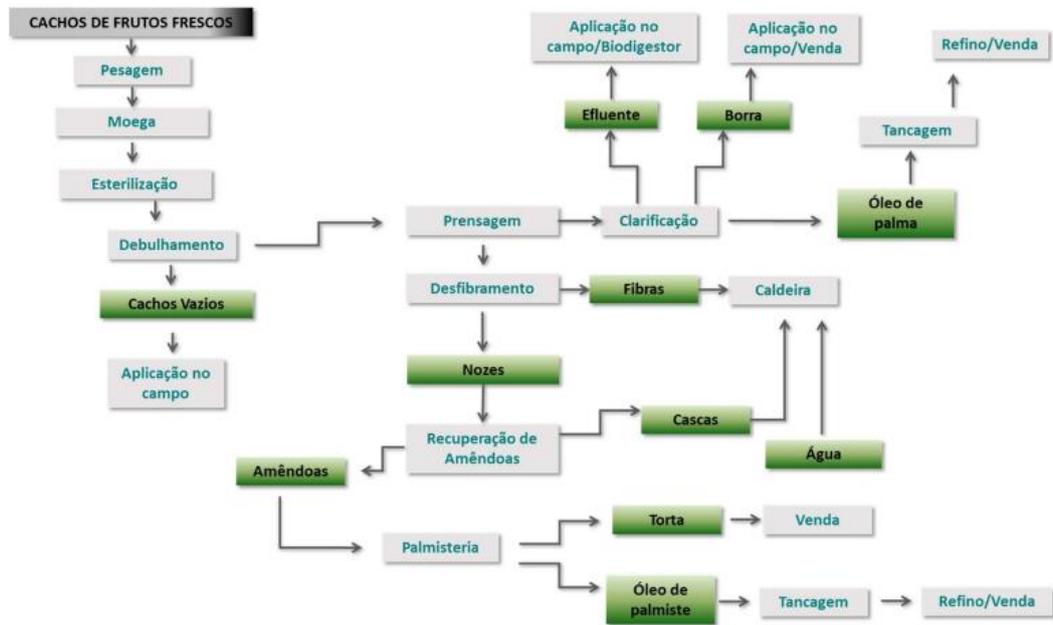
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visto que para a indústria estudada, ocorre a extração tanto do óleo bruto como do palmiste, que consiste do óleo da amêndoa do fruto do dendê, descrever-se-



á uma pequena redação para entendimento do processo. Para extração do óleo de Palma, os cachos de frutos são recebidos e levados até o esterilizador, a uma temperatura de 143°C, permanecendo por 20 a 45 minutos para o seu completo cozimento/esterilização. No debulhador é realizada a retirada do fruto do cacho. Os frutos são encaminhados a três digestores (aqui entra a água aquecida para auxiliar na formação da pasta que será prensada), posteriormente, são direcionados às prensas, onde ocorre a extração do óleo bruto do fruto, que passa por duas peneiras (uma circular e outra retangular). O óleo é bombeado para o tanque pulmão, seguindo para as centrífugas de três fases (tridecanter), sendo esta fase denominada de clarificação – que separa óleo, líquido e o sólido (borra). O produto, óleo bruto de palma, é armazenado para comercialização, o sólido é vendido para a produção de ração animal e o líquido é destinado ao *fatpit* (tanque com chicanas) para reaproveitar o óleo que possa ter passado; posteriormente esse líquido (denominado POME) vai para o sistema de tratamento de efluentes. (SEMAS, 2018). Já o óleo de palmiste após a separação das amêndoas e seu polimento, o fluxo segue para os quebradores de nozes (que separam as cascas das amêndoas). Posteriormente são cozidas e prensadas, onde há a separação da torta de amêndoa e o óleo de palmiste, neste processo de extração do óleo de palmiste não são geradas águas residuárias (SEMAS, 2018). A Figura 13 apresenta o fluxograma do processo de produção da indústria.

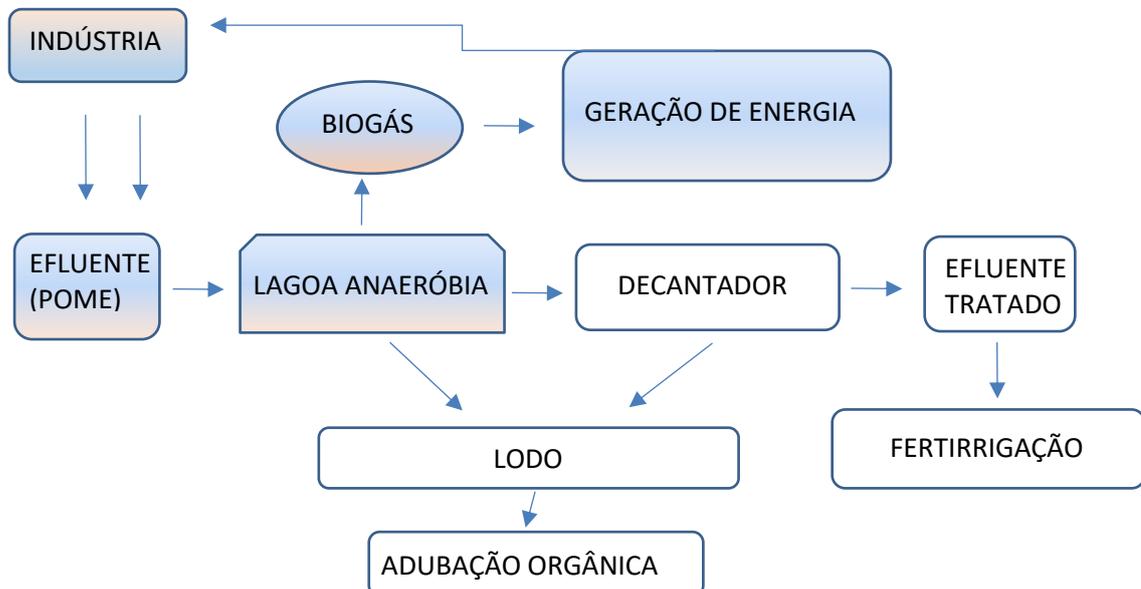
Figura 13– Fluxograma do processo produtivo do óleo de palma e palmiste



Fonte: Indústria, 2022

Todo o efluente líquido, após passar pelo aproveitamento de óleo no fatpit (tanque com chicanas), é enviado para o sistema de tratamento de efluente por meio das lagoas para captura do biogás e geração de energia, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma do processo de tratamento na lagoa anaeróbia e a utilização dos subprodutos.



Fonte: Autora, 2022.

Os valores médios da caracterização do efluente bruto que alimenta a lagoa anaeróbia são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores médios dos parâmetros da caracterização do efluente bruto (mais relevantes ao processo de digestão anaeróbia)

PARÂMETROS	VALORES
Temperatura	60 °C
pH	4,28
DBO	22.230,00 mg/L
Óleos e graxas vegetais mais gorduras animais	3.139,00 mg/L
Sólidos sedimentáveis	850 mL/L

Fonte: SEMAS, 2018.

Destaca-se o registro da temperatura em 60 °C, pH em 4,2 e DBO₅ 22.230,00 mg/L, podendo-se observar que nas análises físico químicas do efluente bruto, encontra-se um pH ácido e uma temperatura elevada, o que precisa ser corrigido para que haja condições favoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos anaeróbios, que irão realizar a produção do biogás.

Apesar da cultura do dendê ser perene, ocorrem variações na produtividade ao longo do ano, tendo meses com mais frutos e outros meses com menos frutos disponíveis para a utilização na indústria, ocorrendo assim uma variação na geração de efluentes, visto que a indústria terá períodos com volume de produção variada, o que ocorrerá também na produção de seus resíduos, incluindo a geração do efluente bruto. A Tabela 4 mostra a geração de efluentes da indústria estudada, no período de maio/2021 a abril/2022 onde se pode observar a variação na geração dos efluentes.

Tabela 4 – Quantidade de efluente gerado pela indústria no período de 12 meses, maio 2021 a abril 2022.

ANO	MÊS	VOLUME (M ³)
2021	Maio	6.149,47
2021	Junho	6.302,11
2021	Julho	5.687,22
2021	Agosto	4.939,42
2021	Setembro	8.912,27
2021	Outubro	7.393,42
2021	Novembro	8.404,03
2021	Dezembro	6.980,96
2022	Janeiro	8.159,49
2022	Fevereiro	6.982,89
2022	Março	9.920,27
2022	Abril	8.405,30
TOTAL		88.236,85

Fonte: Indústria, 2022.

Verifica-se que a somatória dos valores apresentados na Tabela 4 foram gerados um total de 88.236,85 m³ de esgoto bruto e conforme informações do registro do sistema automatizado que controla a produção do biogás, foram gerados 88.000m³ de biogás nos últimos 12 meses, desde o início da operação do sistema, em março 2021. No que se pode fazer a relação aproximada de que para esse primeiro ano de operação a cada um metro cúbico de efluente bruto gerado, foram produzidos aproximadamente um metro cúbico de biogás.

Apresenta-se na Tabela 5 a caracterização do biogás com as quantidades geradas nos gases nos últimos 12 meses a partir do início da operação.

Tabela 5 – Caracterização do Biogás a partir do POME com a média da geração dos gases presentes neste em um período de 12 meses.

Ano	Mês	Média da composição dos gases produzidos (%)			
		CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S
2021	maio	58,71	39,73	0,4	0,18
2021	junho	55,02	37,12	0,48	0,05
2021	julho	53,64	37,90	0,67	0,03
2021	agosto	53,62	37,96	0,59	0,02
2021	setembro	55,00	38,62	0,55	0,15
2021	outubro	56,12	36,57	0,28	0,03
2021	Novembro	60,17	38,69	0,54	0,04
2021	Dezembro	58,38	40,90	0,73	0,04
2022	Janeiro	58,34	39,66	1,07	0,05
2022	Fevereiro	57,51	39,08	3,15	0,09
2022	março	58,18	40,66	0,97	0,08
2022	Abril	57,87	40,73	1,09	0,10

Fonte: Indústria, 2022.

A presença do sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico, pode interferir na metanogênese, consequentemente na formação de metano, comprometendo a produção de biogás e assim gerando menos energia. Bem como, a produção do gás sulfídrico também interfere na vida útil dos equipamentos por ser corrosivo. A indústria promove a sua remoção através de um lavador de gases (dessulfurizador) e utiliza o enxofre na adubação da plantação de dendê.

Os registros dos dados operacionais apresentam os parâmetros controlados e acompanhados no sistema automatizado. Os parâmetros controlados e acompanhados diariamente são: pH e temperatura, sendo dois fatores preponderantes de controle para produção do biogás. Os parâmetros DBO (somente na entrada) e DQO (na entrada e na saída da lagoa anaeróbia coberta) são realizados uma vez por semana nas dependências do laboratório que faz parte da estrutura da UPB. Estes registros são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios mensais dos parâmetros controlados

Parâmetro Período	DQO Entrada (mg/L)	DQO Saída (mg/L)	DBO Entrada (mg/L)	pH Entrada	Temperatura Entrada (°C)
Maio/2021	109.510,00	-	36.503,33	7,00	37,59
Junho/2021	98.614,00	2.938,00	32.871,33	7,23	38,36
Julho/2021	104.545,00	3.366,00	34.848,33	7,36	39,87
Agosto/2021	105.590,00	8.064,67	35.196,67	7,49	41,72
Setembro/2021	100.097,00	15.065,33	33.365,67	7,76	40,80
Outubro/2021	144.756,00	11.295,00	48.252,00	7,81	39,85
Novembro/2021	107.782,00	10.980,00	35.927,33	7,47	38,53
Dezembro/2021	124.424,00	19.266,33	41.474,67	7,48	38,91
Janeiro/2022	109.340,00	9.710,00	36.446,67	7,50	36,96
Fevereiro/2022	112.345,00	7.083,00	37.448,33	7,46	36,54
março/2022	110.254,00	5.273,33	36.751,33	7,38	34,85
Abril/2022	84.517,00	15.950,00	28.172,33	7,18	35,65

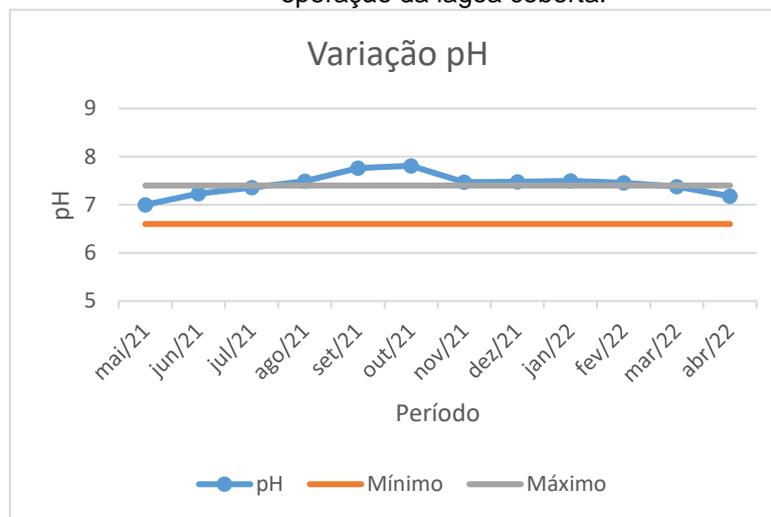
Fonte: Indústria, 2022.

Para o controle da temperatura o efluente passa por uma torre de resfriamento antes de adentrar na lagoa, visto sua elevada temperatura ao sair do processo produtivo; o pH é controlado por meio da recirculação com o substrato do interior do digestor fazendo uma mistura e agitação no interior da lagoa melhorando assim as condições do substrato para a realização da digestão anaeróbia, tentando chegar ao máximo às condições mesofílicas para melhor produção do biogás. Como já mencionado, as análises de determinação de DBO e DQO são realizadas uma vez por semana, para acompanhar o desenvolvimento da eficiência no interior da lagoa.

Nos valores de DBO e DQO apresentados na Tabela 6, observa-se que a relação DQO/DBO₅ para o POME consta de 3, e segundo Von Sperling, 2017, esta relação está em uma faixa intermediária, que varia entre 2,5 e 4,0 e são consideradas fração de biodegradável não elevada, mas ainda assim com significativa porção de material biodegradável. Contudo, a finalidade do uso do efluente após o tratamento (digestado) não será para lançamento em corpo hídrico e sim a utilização no projeto de fertirrigação da plantação da palma.

A Figura 15 nos traz uma comparação da média dos valores registrados no controle operacional, relacionando-os com os valores de pH na faixa considerada ótima para as condições de desenvolvimento das arqueas metanogênicas, que variam entre 6,6 e 7,4 e assim produzindo um biogás com maiores teores de metano.

Figura 15 – Valores do pH médio no período de 12 meses comparando com o valor ótimo para operação da lagoa coberta.

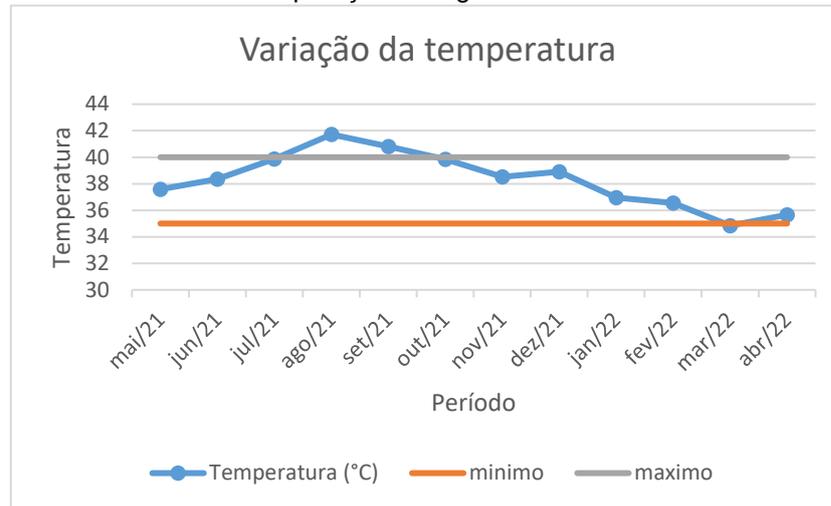


Fonte: Elaboração própria, 2022.

Observa-se que no acompanhamento do parâmetro pH a operação da lagoa se manteve nas proximidades do pH neutro (7), e numa média de 7,43, permanecendo assim, dentro das faixas de pH ótimo para o crescimento dos microrganismos produtores de metano.

No mesmo entendimento, tem-se na Figura 16 os valores médios registrados ao longo de 12 meses da lagoa em operação, visto ser a temperatura também um fator influenciador para o melhor aproveitamento de produção do metano, em comparação aos valores tidos na literatura como uma faixa de temperatura ótima, que fica em torno de 35 a 40 °C.

Figura 16 – Temperatura média no período de 12 meses comparando com o valor ótimo para operação da lagoa coberta.



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Observa-se que a temperatura de operação ao longo dos 12 meses apresenta-se próximo da faixa de trabalho ótimo da fase mesofílica, em média 38,30 °C, que é propícia a melhor produção do metano, tendo que a temperatura está sendo controlada, contudo, poderia ser melhorada utilizando um sistema de resfriamento mais eficaz.

Tendo como um dos produtos finais a geração de energia elétrica, os registros desta produção começaram a ser realizados a partir do mês de junho/2021, quando os equipamentos já estavam aptos. Na Tabela 7, apresenta-se os valores médios registrados.

Tabela 7 - Valores médios de geração de energia.

Ano	Mês	Geração de energia (Mwh)
2021	Julho	8,70
2021	Agosto	21,70
2021	Setembro	1,70
2021	Outubro	33,70
2021	Novembro	51,57
2021	Dezembro	87,53
2022	Janeiro	44,20
2022	Fevereiro	11,00
2022	Março	14,70
2022	Abril	5,30
TOTAL		280,10

Fonte: Indústria, 2022.

Levando em consideração que a carga instalada da indústria fica em torno de 1500 a 1600 kW, seu consumo pode ser estimado por volta de 800 MWh, tendo a indústria que realizar a complementação de consumo por meio de turbina a vapor e concessionária. Estes valores apresentados correspondem a uma unidade de gerador de energia em funcionamento, porém, ainda faltam duas unidades entrar em funcionamento, desta forma a produção de energia pode ser aumentada.

6 CONCLUSÃO

Diante das alegações realizadas nos tópicos anteriores, utilizando a média dos dados apresentados na operação da UPB, no período de maio/2021 a abril/2022, o sistema apresentou com os seguintes resultados alcançados:

- A lagoa funcionou em média com uma COV de 24,73 kgDQO/m³. dia, pH de 7,43 e temperatura de 38,30 °C.

- A lagoa anaeróbia coberta apresentou eficiência de remoção de DQO de aproximadamente 91% e produção média de 139,04 m³/dia de metano neste período.

- Um parâmetro importante para avaliação do bom desempenho da digestão anaeróbia é a relação Alcalinidade/Ácidos Voláteis e esses parâmetros não são acompanhados na operação da lagoa. Recomendamos a implantação desse parâmetro para anteciparmos problemas operacionais e otimizarmos a metanogênese no digestor, com possível maior produção de metano.

-Recomenda-se a redução de óleos e graxas como pré-tratamento, antes do POME ser direcionado para a lagoa anaeróbia coberta.

- O metano produzido diariamente no tratamento do POME da indústria é utilizado para aproveitamento energético e gerou uma média no período mencionado de 28,01 MWh de energia que foram utilizados para alimentação da planta industrial. O sistema tem capacidade de geração maior, entretanto, aguarda entrar em funcionamento equipamentos já instalados que servirão para maior aproveitamento da produção de biogás.

Então, do efluente do processo de beneficiamento da palma de óleo, são extraídos:

- o biogás, para produção de energia elétrica;
- o enxofre, elemento extraído da lavagem dos gases, é utilizado como nutriente nas plantações;
- após o tratamento na lagoa anaeróbia o efluente tratado (ou digestado) é utilizado na fertirrigação da plantação de dendê;
- e o lodo excedente gerado transformado em torta para adubo, também utilizados nas áreas de plantio.

Assim, o propósito deste trabalho de apresentar a produção de biogás e a geração de energia a partir do efluente líquido do processo de beneficiamento do fruto da palma de óleo (dendê) em um sistema funcionando em escala real foi contemplando, sendo viável a utilização deste efluente líquido. Contudo, para um melhor aproveitamento, ajustes podem ser realizados conforme as recomendações sugeridas, todavia vai depender da necessidade e objetivos que a indústria queira atingir.



Desta forma, vê-se os resíduos, denominados agora subprodutos, deste processo produtivo industrial, que antes eram tidos como problemas ambientais, serem destinados de maneira adequada e aproveitados de modo sustentável gerando vários benefícios e agregando valor aos resíduos produzidos.



REFERÊNCIAS

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.

ALVES, Rui Guilherme Cavaleiro De Macedo. **Tratamento e Valorização de Dejetos da Suinocultura Através de Processos Anaeróbios – Operação e Avaliação de Diversos Reatores em Escala Real**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC. Florianópolis/SC, 2007.

ALVES, S. A. O., AMARAL, W. A. N., HORBACH, M. A.; ANTIQUEIRA, L. M. O. R., & DIAS, I. F. S. **Indicadores de Sustentabilidade da Agroindústria do dendê no estado do Pará**. *Energia na Agricultura*, 2013.

ANDERSON, J. M. **Eco-Friendly approaches to Sustainable palm oil production**. *Journal of Oil Palm Research*, Special Issue (October 2008), 127-142

BROWN, E; JACOBSON, M.F. **‘Cruel Oil: How palm oil harms health, rainforest and wildlife’**. Center for Science in the Public Interest (CSPI), Washington, 2005.

CABRAL, Carolina Bayer Gomes. **Avaliação da Produção de Biogás para Fins Energéticos em Reatores Anaeróbios Tratando Esgoto Sanitário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. ampl. e atual. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5).

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.

DAMASCENO, Fernanda Ribeiro do Carmo. **Aplicação de Preparado Enzimático e Biossurfatante no Tratamento Anaeróbio de Efluente com Alto Teor de Gordura**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 2013.

DE SOUZA, A.; SANTOS FERNANDES DE ALMEIDA, M.; CAPELLO, L.; THOME DO AMARAL SANTIAGO, T.; ROSA BARREDA, A.; MARTINS DE OLIVEIRA, E. **Produção de Biogás Como Forma de Reaproveitamento de Resíduo da Indústria Cervejeira**. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 11, n. 2, 28 ago. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Statistic Division, 2015. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/home/E>.

FERREIRA-Júnior, J.; CROTTI, B. F.; GONÇALVES, S. B.; MENDONÇA, S.; GUEDES, C. L. B. **Avaliação do Tratamento de Efluente da Extração do Óleo de Dendê e Potencial de Produção de Biogás**, VI Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia: Anais, 2020.

FURLAN-Júnior, J.; KALTNER, F.J.; AZEVEDO, G.F.P.; CAMPOS, I.A. **'Biodiesel: Porque tem que ser dendê'**. 1ª Ed. EMBRAPA, Belém/PA, 2006.

POSSETTI, Gustavo; CHERNICHARO, Carlos; ROSENFELDT, Sebastian; SILVEIRA, Bruno; CABRAL, Carolina; SUIDEDOS, Caroline; PLATZER, Christoph; SILVA, Gilson; HOFFMANN, Heike; MOREIRA, Hélinah; ADAMATTI, Humberto; MIKI, Marcelo; SILVA, Mônica; TAKAHASHI, Renato; MIKI, Rosane; ARAÚJO, Valéria; BUSTANI VALENTE, Victor; VILLANI, Waldo; METHANUM, Witan. **Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**, 2015.

ICLEI – BRASIL. **Manual para Aproveitamento do Biogás: Efluentes Urbanos**. São Paulo: ICLEI BRASIL, 2010. Volume 2, 77 p.

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.

KONGSAGER, R., & Reenberg, A. **Contemporary land-use transitions: The global oil palm expansion**. Copenhagen: The Global Land Project International Project Office, 2012.

LIMA, Micheline Ferreira de. **Produção de biogás a partir de lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFPE. Recife/PE, 2015.

LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. **Composição Média do Biogás de Diferentes Tipos de Biomassa**. IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. Rio de Janeiro/RJ, 2015.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2011.

MONTEIRO, Kátia Fernanda Garcez; HOMMA, Alfredo Kingo Oyama. **Diferentes sistemas de produção com palma de óleo (elaeis guineensis jaq.) e a participação do brasil no cenário internacional**
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/110671/1/palma-oleo.pdf>
acessado em 21/09/2022.



MÜLLER AA, Alves RM. **'A dendeicultura na Amazônia brasileira'**. EMBRAPA Amazônia Oriental. Belém/Pa, 1997.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Metodologia de análise de risco de investimento em projetos de eficiência energética com aplicação no aproveitamento da biomassa residual do dendê na Amazônia**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPA. Belém/PA, 2015.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F. **Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura**. *Amби-Agua*, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 157-168, 2009. (doi:10.4136/ambi-agua.109).

PEREIRA, M. S.; GODOY, T. P.; GODOY, L. P.; BUENO, W. P.; WAGNER, R. S. (2015). **Energias renováveis: biogás e energia elétrica provenientes de resíduos de suinocultura e bovinocultura na UFSM**. *Revista Eletrônica em Gestão, educação e Tecnologia ambiental*, v.19, n.3, p.239-247, 2015.

PEREIRA, Vinícius Rocha; SILVA, Luiza Maria Affonso Lopes Da; SILVA, Vivianne Alves da; MOREIRA, Myrna Martins Santos; PAES, Juliana Lobo. **Influência do potencial hidrogeniônico e alcalinidade do lodo de piscicultura e dejetos bovinos na digestão anaeróbia**. In: Anais da VIII Reunião Anual de Iniciação Científica (RAIC 2020) e II Reunião Anual de Iniciação em Inovação e Desenvolvimento Tecnológico (RAIDTEC 2020). Anais. (RJ) UFRRJ, 2020. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/VIIIraic2020/381162-influencia-do-potencial-hidrogenionico-e-alcalinidade-do-lodo-de-piscicultura-e-dejeto-bovino-na-digestao-anaerob>>. Acesso em: 27/08/2022 11:00.

SEVILLANO, María Butrón. **Influência do tempo de detenção hidráulica sobre o desempenho de um reator anaeróbio compartimentado tratando esgoto sanitário**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFES. Vitória/ES, 2018.

SILVA, A. C. G.; TREVISAN, G. M. **Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado**. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.2, p.197-210, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.002.0017>.

TEIXEIRA, M. A. **Energia e Emissões na Produção de Óleo de Palma/Dendê (Elaeis guineensis): geração e cogeração na indústria de Óleo de Palma**. *AMBIÊNCIA*, 15(1), 257-278, 2019.

Walmott Borges, A., Caetano Melo, M., & Tomaz, L. C. de L. (2020). **UMA ANÁLISE DA NECESSIDADE DE PRODUÇÃO DE NORMAS ESPECÍFICAS SOBRE BIOGÁS NO ORDENAMENTO BRASILEIRO**. *Revista De Estudos Jurídicos Da UNESP*, 21(34). <https://doi.org/10.22171/rej.v21i34.3006>.



VON SPERLING, M. E. **Lagoas de Estabilização**: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: V. 3. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 1996.