

Biorrefinaria para os frutos de *Elaeis guineensis*: uma revisão sobre produção de ecodiesel e gaseificação para tratamento de resíduos

Biorefinery for *Elaeis guineensis* fruits: a review on ecodiesel production and gasification for waste treatment

Biorrefinería para frutos de *Elaeis guineensis*: una revisión sobre la producción de ecodiesel y la gasificación para el tratamiento de residuos

Recebido: 16/07/2022 | Revisado: 30/07/2022 | Aceito: 17/08/2022 | Publicado: 24/08/2022

Alvaro Eduardo Costa Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-0135>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: alvarocosta2097@gmail.com

Daniel Alves Cerqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3195-1995>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: daniel.cerqueira@uftm.edu.br

Cássia Regina Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3226-7653>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: cassia.cardoso@uftm.edu.br

Resumo

A demanda energética cresce diariamente no mundo e é fortemente dependente dos combustíveis de origem fóssil, principais emissores de gases que provocam o efeito estufa. Impactos ambientais, como o aquecimento global, têm incentivado o desenvolvimento de combustíveis alternativos, no qual destaca-se os biocombustíveis, combustíveis obtidos do processamento de biomassa, uma fonte de energia renovável e sustentável. O biodiesel é um biocombustível produzido por transesterificação ou craqueamento de triglicerídeos oriundos de matérias-primas oleaginosas, o produto do craqueamento é denominado ecodiesel. O dendê é um oleaginoso que possui elevada produtividade de óleo, baixo custo e ausência de sazonalidade, porém o seu processamento gera uma grande quantidade de resíduos sólidos que necessitam de tratamento adequado. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi apresentar uma revisão bibliográfica junto a uma proposta para a produção de ecodiesel a partir do dendê com a utilização da gaseificação para tratamento de resíduos sólidos, utilizando os conceitos de uma biorrefinaria. Um fluxograma de processo foi elaborado baseado em um levantamento teórico realizado em várias bases científicas, como SCIELO, Google Acadêmico e ScienceDirect e foi desenvolvido no software Lucidchart. Verificou-se que o dendê é promissor na produção de ecodiesel e que os processos de termoconversão, como a gaseificação, podem ser utilizados para agregar valor aos resíduos sólidos.

Palavras-chave: Biocombustíveis; *Elaeis guineensis*; Craqueamento; Gaseificação.

Abstract

The energy demand grows daily in the world and is heavily dependent on fossil fuels, the main emitters of gases that cause the greenhouse effect. Environmental impacts, such as global warming, have encouraged the development of alternative fuels, in which biofuels stand out, fuels obtained from the processing of biomass, a source of renewable and sustainable energy. Biodiesel is a biofuel produced by transesterification or cracking of triglycerides from oleaginous raw materials, the cracking product is called ecodiesel. Palm oil (“dendê”) is an oilseed that has high oil productivity, low cost and lack of seasonality, but its processing generates a large amount of solid waste that needs proper treatment. Thus, the objective of this work was to present a bibliographic review with a proposal for the production of ecodiesel from palm oil using gasification to treat solid waste, using the concepts of a biorefinery. A process flowchart was prepared based on a theoretical survey carried out in several scientific bases, such as SCIELO, Google Scholar and ScienceDirect and was developed in Lucid chart software. It was found that palm oil is promising in the production of ecodiesel and that thermo-conversion processes, such as gasification, can be used to add value to solid waste.

Keywords: Biofuel; *Elaeis guineensis*; Cracking; Gasification.

Resumen

La demanda energética crece diariamente en el mundo y depende en gran medida de los combustibles fósiles, principales emisores de gases causantes del efecto invernadero. Los impactos ambientales, como el calentamiento global, han fomentado el desarrollo de combustibles alternativos, entre los que destacan los biocombustibles, combustibles obtenidos del procesamiento de la biomasa, fuente de energía renovable y sostenible. El biodiesel es un biocombustible producido por transesterificación o craqueo de triglicéridos a partir de materias primas oleaginosas, el producto del craqueo se denomina ecodiesel. El aceite de palma (“dendê”) es una oleaginosa que tiene alta productividad de aceite, bajo costo y falta de estacionalidad, pero su procesamiento genera una gran cantidad de residuos sólidos que necesitan un tratamiento adecuado. Así, el objetivo de este trabajo fue presentar una revisión bibliográfica junto con una propuesta para la producción de ecodiesel a partir de aceite de palma y uso de gasificación para el tratamiento de residuos sólidos, utilizando los conceptos de una biorrefinería. Un diagrama de flujo del proceso fue elaborado a partir de un levantamiento teórico realizado en varias bases científicas, como SCIELO, Google Scholar y ScienceDirect y fue desarrollado en el software Lucidchart. Se encontró que el aceite de palma es prometedor en la producción de ecodiesel y que los procesos de termoconversión, como la gasificación, se pueden utilizar para agregar valor a los residuos sólidos.

Palabras clave: Biocombustible; *Elaeis guineensis*; Craqueo; Gasificación.

1. Introdução

Com o constante crescimento populacional, a elevação na quantidade de veículos de transporte e a evolução das atividades industriais, há um aumento na demanda energética global diariamente. O desafio é suprir a demanda sem causar degradações ao meio ambiente (Nair et al., 2022). Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), 79% do fornecimento de energia no mundo é proveniente de combustíveis de origem fóssil, como gás natural, petróleo e carvão mineral (IEA, 2021). A queima desses materiais promove grande emissão de gases de efeito estufa (GEE, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), que estão diretamente associados ao aquecimento global (Correa, et al., 2019).

A conscientização dos impactos ambientais, aliada ao esgotamento de recursos fósseis, incentivou o desenvolvimento de energias alternativas, renováveis e sustentáveis. Um marco no desenvolvimento sustentável foi a 21ª Conferência das Partes (COP 21) de 2015. Nesta ocasião, diversos países, incluindo o Brasil, firmaram um tratado denominado “Acordo de Paris” com o compromisso de reduzir a emissão de GEE e aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética (Vital, 2018). Entre as fontes de energias renováveis já implementadas no mundo destaca-se a solar, a eólica, a hidroelétrica e a biomassa (Wang, et al., 2022).

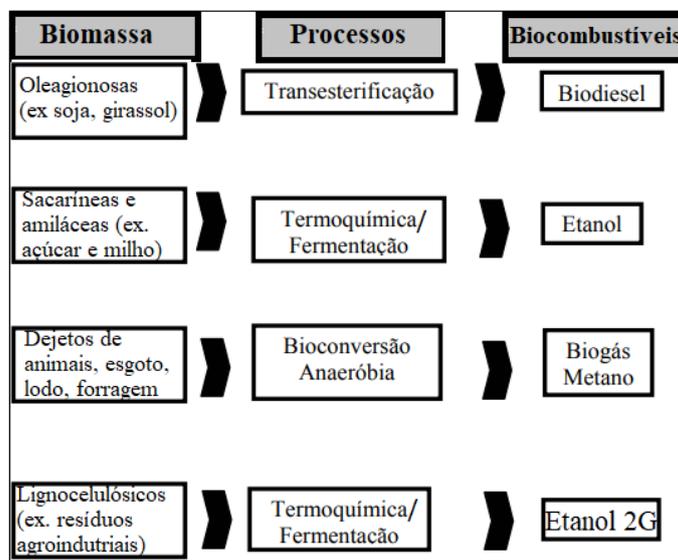
Os biocombustíveis, combustíveis oriundos do processamento da biomassa (matéria-prima vegetal ou animal), são promissores na substituição dos combustíveis fósseis devido ao fornecimento de energia eficaz e grande disponibilidade de matérias-primas (Duarah, et al., 2022). Em relação às questões ambientais, a queima dos biocombustíveis emite uma quantidade inferior de GEE se comparado com combustíveis fósseis. Além disso, o CO₂ emitido é reabsorvido no cultivo da biomassa vegetal através do processo de fotossíntese (Mota & Monteiro, 2013). A figura 1 mostra alguns tipos de biomassa e possíveis processos de conversão para produção de biocombustíveis.

A conversão da biomassa pode ser realizada por meio de processos químicos, biológicos e termoquímicos. A transesterificação é um método químico de conversão que consiste na reação reversível entre triglicérides (componentes de matérias-primas oleaginosas) e um álcool (geralmente etanol ou metanol) na presença de um catalisador ácido ou básico. Neste processo é formado monoalquil ésteres (biodiesel) e glicerina como subproduto (Marx, 2016).

Os processos de bioconversão anaeróbia e fermentação se caracterizam pela degradação biológica da biomassa por ação de microrganismos. Na bioconversão anaeróbia, os dejetos orgânicos são convertidos em um biogás rico em metano, por meio de uma rota metabólica que compreende as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metagênese (Okolie, et al., 2022). A fermentação é utilizada para produção de etanol a partir da conversão de açúcares simples, provenientes de matérias-primas sacaríneas ou amiláceas (após hidrólise das moléculas do amido), por ação de leveduras como a *Sacharomyces Cerevisiae*. O etanol também pode ser obtido a partir de insumos lignocelulósicos, por meio de etapas de pré-tratamento e

hidrólise, gerando o etanol de segunda geração (Morais, et al., 2017).

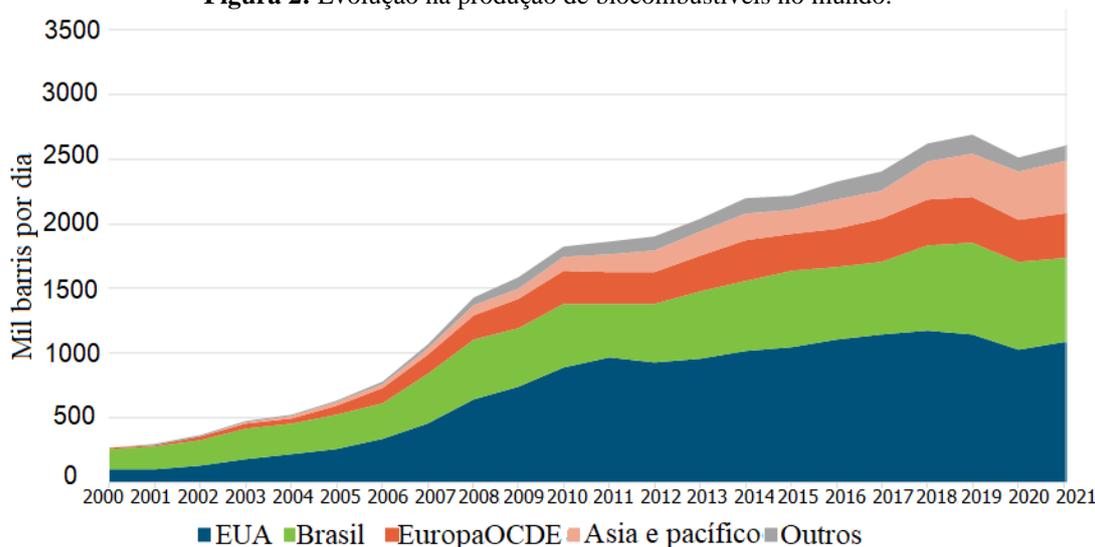
Figura 1: Resumo de tipos de biomassa e processos para produção de biocombustíveis.



Fonte: Adaptado de Cassales (2010).

Em comparação aos métodos químicos e biológicos, os métodos termoquímicos não dependem de produtos químicos ou microrganismos para a conversão. Estes métodos se baseiam na decomposição térmica por aplicação de temperaturas elevadas, gerando produtos sólidos, líquidos e gasosos com potencial energético. Os principais processos de conversão térmica são: combustão, gaseificação e pirólise (Chen, et al., 2015).

Figura 2: Evolução na produção de biocombustíveis no mundo.



Fonte: IBP (2022).

O Brasil ocupa o posto de segundo maior produtor de biocombustíveis do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, com produção de 641 mil barris por dia (23% da produção mundial). Os principais biocombustíveis produzidos no país são o etanol e o biodiesel (IEA, 2021). A figura 2 mostra a evolução da produção global de biocombustíveis por região.

O biodiesel é definido como o produto purificado do processo de transesterificação de triglicerídeos, oriundos de plantas oleaginosas e gordura animal. Atualmente no Brasil, o biodiesel é aplicado em uma mistura com o diesel fóssil no teor

de 10%. Outras rotas tecnológicas podem ser utilizadas para produção de biodiesel, destaca-se o craqueamento (ANP,2022). O craqueamento (ou pirólise) de óleos vegetais se baseia na quebra das moléculas de triglicerídeos por ação de temperaturas superiores a 350°C. O produto será uma mistura complexa composta majoritariamente de hidrocarbonetos, semelhante à composição do diesel do petróleo. Esse produto é denominado ecodiesel (Freitas, et al., 2021).

São diversas as oleaginosas disponíveis no Brasil, como a soja, algodão, milho, girassol e dendê. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a soja é a oleaginosa mais produzida no país, com uma produção de 134,9 milhões de toneladas na safra 2021, seguido por milho e algodão, com total de 25,6 e 5,8 milhões de toneladas respectivamente (IBGE, 2021). Os oleaginosos podem ser encaminhados para indústrias químicas e de alimentos para o processamento de margarina, óleos comestíveis, lubrificantes, tintas, vernizes, biodiesel, entre outros (Ribeiro & Costa, 2015).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 71,4% do biodiesel produzido no Brasil é proveniente do óleo de soja, outros insumos utilizados são: óleo de palma, óleo de palmiste, óleo de canola, óleo de milho, óleo de girassol, óleo de amendoim, óleo de nabo-forrageiro e óleo de fritura (ANP, 2021)

O dendê é um promissor oleaginoso para a produção de biocombustíveis, pois possui elevada produtividade de óleo de palma e de palmiste (de 4 a 6 toneladas de óleo bruto por hectare por ano). Além disso, não possui sazonalidade e apresenta um baixo custo (Aguar, 2021).

No processamento do dendê (fruto de *Elaeis guineensis*), assim como no processamento de outras biomassas, há formação de resíduos sólidos e líquidos. O rendimento de óleo de palma e palmiste por unidade de massa é em média 20% e 1,5% respectivamente, além disso há formação de 44% de resíduos sólidos (cascas, torta de dendê, cachos vazios e fibras) (Queiroz, França & Ponte, 2012). Considerando a potencial poluição da destinação inadequada desses resíduos, tecnologias devem ser desenvolvidas com o propósito de agregar valor aos rejeitos. Desse modo, surge o conceito da biorrefinaria (Rosa, 2011).

De forma análoga às refinarias de petróleo, uma biorrefinaria é uma unidade produtiva que integra diversos mecanismos de conversão com o objetivo de aproveitar totalmente os resíduos. Assim, o processamento da biomassa irá gerar não apenas combustíveis, como também outros diversos produtos químicos, de maneira sustentável e econômica. Entre os possíveis processos de conversão dos resíduos, destaca-se os métodos termoquímicos: combustão, pirólise e gaseificação (Pio, Tarelho & Pinto, 2020).

A combustão consiste na queima do material em temperaturas de 800 a 1000°C na presença de ar em excesso para a geração de calor e energia elétrica. Na pirólise, a degradação térmica ocorre na ausência total ou parcial de oxigênio, como produto obtém-se frações sólida (biocarvão), líquidas (bio-óleo) e gasosas de interesse energético (Thipathi et al., 2016).

A gaseificação é um processo de conversão térmica na qual a matéria-prima é submetida a diferentes reações termoquímicas (temperaturas entre 800 e 1100°C) na presença de um agente gaseificante (oxigênio, vapor de água ou ar) em quantidades inferiores à estequiométrica. Como produto, obtém-se uma mistura de gases denominada gás de síntese (Pio, Tarelho & Pinto, 2020).

O gás de síntese pode ser utilizado diretamente para o fornecimento de energia ou também como precursor de produtos químicos ou biocombustíveis. É composto principalmente por óxidos de carbono, hidrogênio, nitrogênio, metano e contaminantes (cinza, óleos, alcatrão). O teor de cada componente varia com a biomassa, condições de reação e o agente de gaseificação (Santos, 2016). A Tabela 1 apresenta uma revisão sobre a composição do gás de síntese obtido a partir de diferentes biomassas.

Tabela 1: Composição de gás de síntese para diferentes biomassas.

Referência	Biomassa	T (°C)	Composição do gás de síntese (% v/v)					
			H ₂	CH ₄	CO ₂	CO	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄
Junior et al. (2020)	Sabugo de milho	700	18,37	5,09	20,15	0,98	0,91	-
Srivinasan, et al. (2015)	Serragem de pinus	750	24,1	13,3	26,7	29,9	1,2	1,9
Alzate, Torres & Ramírez (2022)	Resíduos do dendê	850	37,19	0,87	15,43	17,80	-	-
Hoque, Rashid & Aziz (2021)	Cascas de arroz	900	14	0,17	10,45	18,48	-	-

Fonte: Autores (2022).

Desse modo, o objetivo deste trabalho é propor, através de um fluxograma, a produção do ecodiesel utilizando o dendê como biomassa oleaginosa, além de sugerir a utilização da gaseificação para o tratamento dos resíduos. A concepção do processo foi baseada no conceito de uma biorrefinaria, com aproveitamento total da biomassa.

2. Dendê

Fruto do dendezeiro, uma palmeira de origem africana, o dendê (*Elaeis guineenses*) foi introduzido no Brasil devido ao tráfico negreiro do fim do século XVI. O primeiro cultivo em terras brasileiras ocorreu na Bahia e foi bem-sucedido devido a condições climáticas favoráveis (Hoffmann, 2016). Segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, o Brasil foi o sétimo maior produtor de dendê do mundo em 2020, com o total de 2,8 milhões toneladas, o que representa 0,68 % da produção mundial (FAO, 2020). No país destaca-se os estados do Pará e Bahia, com 82% e 16% da produção nacional respectivamente (USDA, 2022). A Figura 3 mostra a produção de dendê por país no ano de 2020.

Os maiores produtores de dendê do mundo são Indonésia, Malásia e Tailândia, unidos produzem o referente a 88% da produção mundial (FAO, 2020). Na região da América do Sul, o Brasil ocupa o posto de segundo maior produtor, atrás da Colômbia, que produziu 7,1 milhões de toneladas no ano de 2020 (FAO, 2020).

Entre as oleaginosas, o dendezeiro é a que possui maior produtividade de óleo, rendendo de 4 a 6 toneladas por hectare por ano, rendimento 10 vezes superior ao da soja. Além disso, pode ser produzido continuamente durante todo o ano, portanto não possui sazonalidade (Aguiar, 2021).

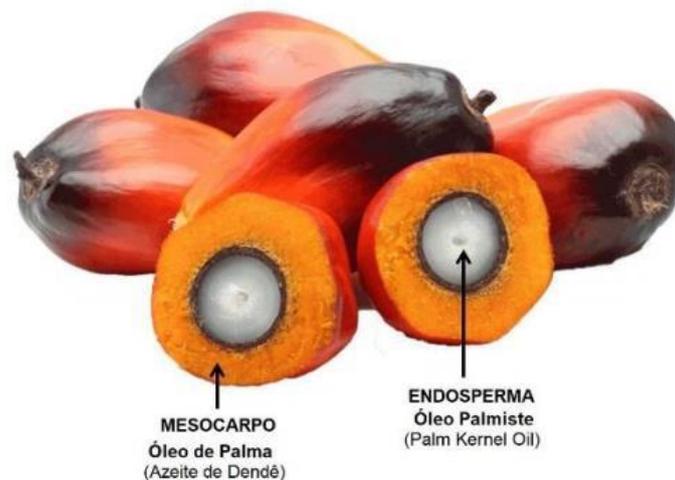
De acordo com a parte do fruto em que é extraído, obtém-se dois tipos de óleo do dendê. O óleo de palma (azeite de dendê), é o óleo extraído do mesocarpo (polpa) do fruto. Já o óleo oriundo do endosperma (amêndoa) é denominado óleo de palmiste (Lebid & Henkes, 2015). Apesar de serem extraídos do mesmo fruto, os dois óleos possuem diferentes composições de ácidos graxos, sendo o óleo de palma composto majoritariamente de ácido palmítico e o óleo de palmiste de ácido láurico e mirísitico. Ambos podem ser destinados para produção de biodiesel, mas também são utilizados na indústria alimentícia, de cosméticos e farmacêutica (Lebid & Henkes, 2015). A Figura 4 mostra as partes do fruto onde os óleos são extraídos.

Figura 3: Produção de dendê por país em toneladas.



Fonte: FAO (2020).

Figura 4: Partes do dendê.



Fonte: Aguiar (2021).

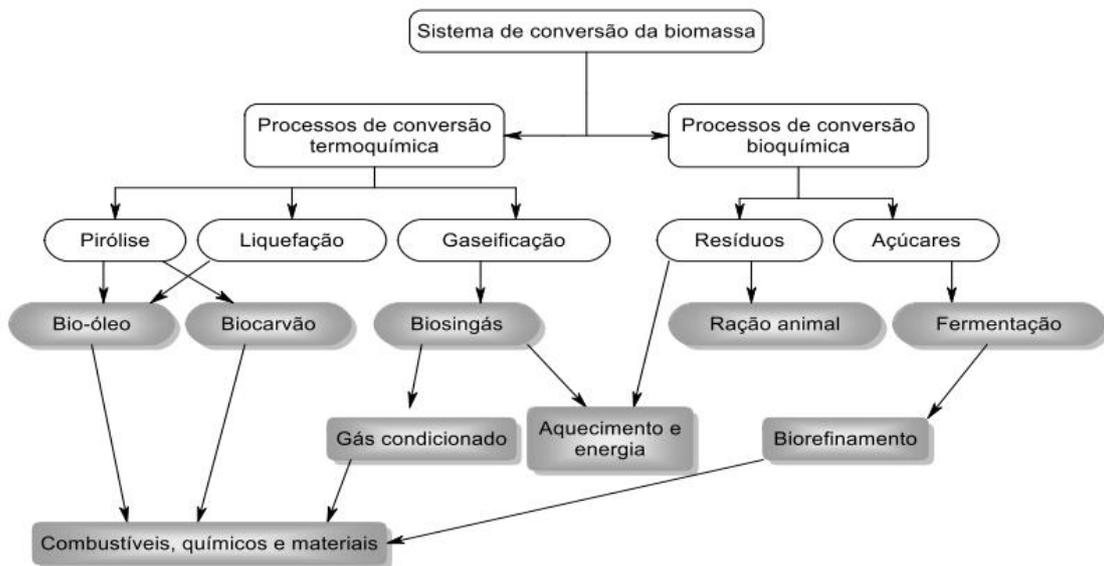
No seu processamento inicial, o dendê passa por etapas de esterilização, debulhamento, digestão, prensagem e clarificação. Como produtos e subprodutos é gerado óleo de palma (20%), óleo de palmiste (1,5%), torta de palmiste (3,5%), engaços (22%), fibras da prensagem do mesocarpo (12%), cascas (5%) e um efluente líquido denominado "Palm Oil Mill Effluent" ou POME (50%) (Rosa, 2011).

O POME é o principal resíduo do processamento, sendo composto majoritariamente por água, mas também em menor quantidade por óleos e sólidos em suspensão. Devido à quantidade de matéria orgânica, o POME não pode ser descartado sem tratamento (Mainil & Matsumura, 2018). Segundo Morais, et al. (2013), o POME é utilizado como fertilizante nas plantações do dendezeiro. Como a quantidade de resíduos de uma indústria de dendê é elevada, é importante que diferentes tecnologias sejam utilizadas de forma integrada, não apenas para evitar o descarte inadequado, mas também para agregar valor aos resíduos.

3. Biorrefinarias

Essencial para o desenvolvimento sustentável, uma biorrefinaria pode ser definida com um complexo que integra diferentes métodos de conversão (bioquímicos, físico-químicos e termoquímicos) para agregar valor para uma variedade de matérias-primas e resíduos. Os diferentes métodos de conversão da biomassa possuem limitações. Devido ao requisito de altas taxas de aquecimento, os métodos termoquímicos demandam alto custo de processamento, enquanto o baixo rendimento de produtos e o longo tempo de produção são limitações dos processos biológicos. Dessa forma, é importante combinar diferentes métodos de conversão a fim de amenizar as limitações e aproveitar todos os recursos disponíveis. A Figura 5 mostra uma representação da integração de diferentes métodos de conversão aplicando conceitos de uma biorrefinaria (Moncada et al., 2016; Okolie, et al., 2022).

Figura 5: Diagrama representando o conceito da biorrefinaria.



Fonte: Alvim, et al. (2014).

Com funcionamento semelhante a uma refinaria de petróleo, diferenciando na utilização de matérias-primas renováveis, uma biorrefinaria deve aproveitar todas as partes da biomassa para produzir vários tipos de bioprodutos úteis, por exemplo produtos químicos, ração para a alimentação animal, produtos agrícolas, energia, materiais e combustíveis (Moncada et al., 2016).

De acordo com complexidade das instalações, as biorrefinarias possuem três fases: A biorrefinaria de fase I possui um processo fixo de conversão de uma matéria-prima, enquanto as biorrefinarias de fase II utilizam diferentes processamentos para a obtenção de diferentes produtos a partir de uma matéria-prima. Na biorrefinaria de fase III, são utilizadas diversas biomassas para a geração de inúmeros produtos diferentes (Perez, et al., 2017). As biorrefinarias podem ainda ser classificadas de acordo com os processos de conversão, tipo de plataforma, matérias-primas e produtos de interesse (Alvim, et al., 2014).

A aplicação do conceito da biorrefinaria em uma indústria possui diversas vantagens, como a redução de custos de produção, geração da própria energia, aumento dos lucros, expansão do mercado com o aumento na quantidade de produtos, redução de efluentes e de emissão de gases que provocam o efeito estufa. Dessa forma, as biorrefinarias unem propostas econômicas e ambientais (Lhamas, 2013).

4. Metodologia de Revisão e Proposta de Fluxograma para Biorrefinaria

Este é um estudo de cunho bibliográfico. Realizou-se uma pesquisa por trabalhos publicados em várias bases científicas, como SCIELO, Google Acadêmico e ScienceDirect. Os conteúdos explorados foram: o processamento do dendê, a produção de biodiesel e ecodiesel, os processos de termoconversão (com foco no craqueamento e na gaseificação) e os conceitos de uma biorrefinaria.

Após o levantamento teórico, elaborou-se um fluxograma no software Lucidchart com intuito de propor a produção do ecodiesel a partir do dendê utilizando o craqueamento, além do tratamento dos resíduos por gaseificação, com aplicação dos conceitos de uma biorrefinaria.

5. Resultados e Discussão

A Figura 6 mostra o fluxograma da produção de ecodiesel a partir do material oleaginoso extraído do dendê. Os subprodutos sólidos do processo foram destinados para tratamento por gaseificação para produção de gás de síntese.

5.1 Recepção e esterilização do fruto

Após serem colhidos, os frutos de dendê são transferidos por meio de caminhões até a indústria. Ao chegar na unidade de processamento, são primeiramente pesados em balanças mecânicas e transferidos, por ação de pás mecânicas, para a esterilização (Morais et al., 2013).

A esterilização (cozimento) é realizada em uma autoclave com pressão e temperatura controladas. O processo ocorre por 30 a 60 minutos, com temperaturas entre 110 e 135°C e pressões de 2,5 a 3 atm. O intuito dessa etapa é inativar enzimas que poderiam iniciar reações de degradação do fruto durante o seu processamento, facilitar a separação dos engaços, além de amolecer a estrutura do fruto para posterior extração de óleo e remoção das cascas da amêndoa. O fruto esterilizado é encaminhado para um derburador, equipamento que separa os engaços por agitação (Carvalho, 2016).

5.2 Extração do óleo de palma

Diferente de outras oleaginosas, a extração dos óleos de dendê é totalmente física, sem a utilização de solventes químicos. A extração ocorre por dois processos: digestão e prensagem. A digestão é uma etapa responsável por aquecer o fruto até temperaturas entre 90 e 100 °C com constante agitação. O objetivo é quebrar a estrutura da polpa para que a prensagem (prensa contínua) consiga remover o óleo do mesocarpo com mais facilidade.

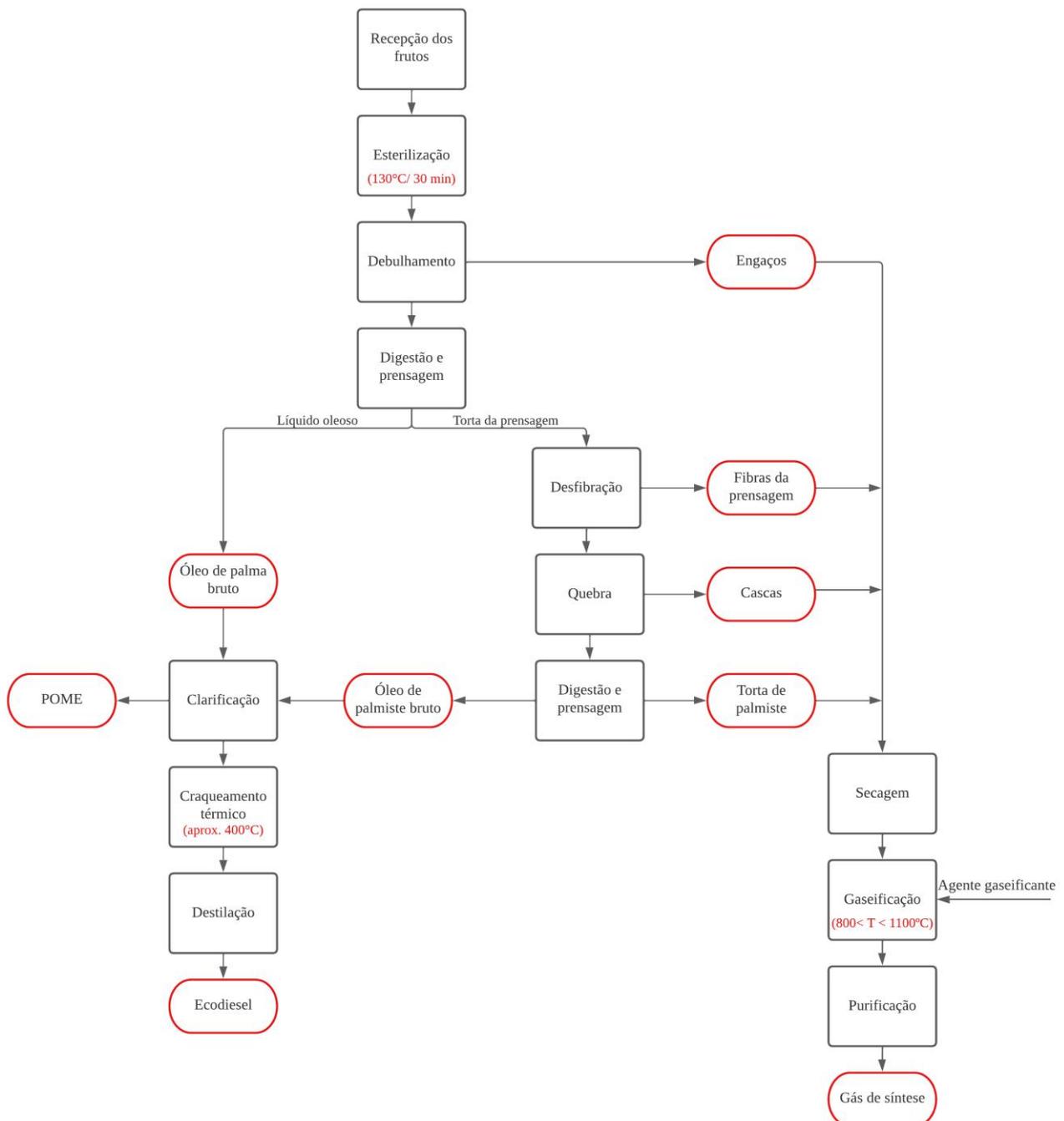
Da prensagem são retirados o óleo de palma bruto e a torta da prensagem. O óleo de palma bruto é encaminhado diretamente para a clarificação e a torta segue para a extração do óleo de palmiste (Oliveira, et al., 2017).

5.3 Extração do óleo de palmiste

A torta da prensagem é composta por fibras e amêndoa com casca. Como o objetivo é a extração do óleo da amêndoa, a torta é submetida a desfibração, onde um sistema de ventilação separa as fibras do endosperma (Hoffmann, 2016).

O óleo de palmiste é obtido pela quebra da amêndoa para retirada da casca, digestão para o amolecimento da estrutura do endosperma e prensagem para a extração do óleo. O resíduo sólido gerado nessa etapa é denominado torta de palmiste (Silva, 2011)

Figura 6: Fluxograma da produção de ecodiesel e gás de síntese a partir do dendê.



Fonte: Autores (2022).

5.4 Clarificação

Os dois óleos obtidos pelo processamento do dendê passam por um processo de clarificação para a eliminação das impurezas sólidas e diminuição da umidade. Essa etapa é realizada com a utilização de decantadores e centrifugas. Como subproduto é gerado o POME (Palm Oil Mill Effluent), um efluente líquido composto principalmente de água, mas também de resíduos de óleo e sólidos em suspensão (Oliveira, et al., 2017). o POME é destinado para a fertilização das plantações do dendezeiro (Morais, et al. 2013).

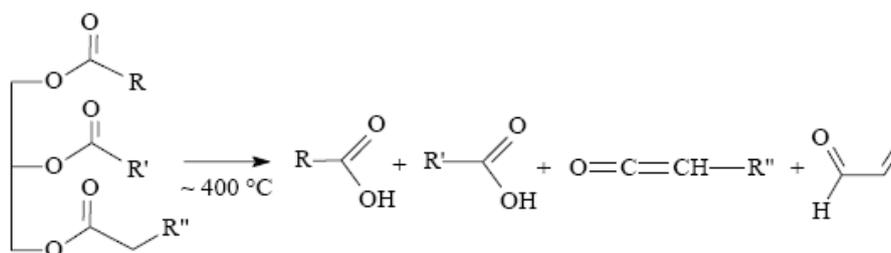
5.5 Produção de ecodiesel

O craqueamento (pirólise) de óleos vegetais consiste no rompimento das ligações dos triglicerídeos por degradação térmica. A quebra da estrutura inicia em valores próximos a 400°C, com ausência total ou parcial de oxigênio, produzindo uma mistura de hidrocarbonetos leves e pesados (cetonas, ácidos carboxílicos, aldeídos, alquenos e outros). A caracterização do produto depende do triglicerídeo submetido ao processo e das condições de reação.

A mistura de hidrocarbonetos gerada se assemelha à composição dos combustíveis fósseis, podendo apresentar frações com faixas de carbono da gasolina, óleo diesel ou querosene. A fração de determinado combustível pode ser favorecida pela utilização de catalisadores. Dessa forma, o craqueamento pode ser denominado craqueamento termocatalítico, se a reação ocorre com auxílio de um catalisador, ou craqueamento térmico, se a quebra é realizada apenas por ação da temperatura (Lhamas, 2013).

O craqueamento térmico ocorre em duas etapas com funções diferentes. A primeira etapa, denominada craqueamento primário, visa romper as ligações C-O que unem a parte glicéridica ao restante da cadeia do triglicerídeo, formando ácidos carboxílicos. A Figura 7 mostra a reação global da etapa primária da pirólise.

Figura 7: Reação global do craqueamento primário..



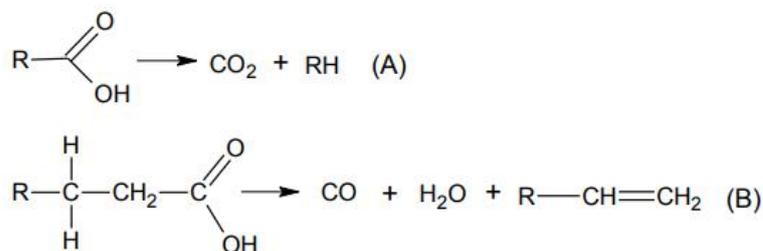
Fonte: Embrapa (2015).

Na segunda etapa, designada craqueamento secundário, os ácidos carboxílicos formados na etapa primária são submetidos a desoxigenação. Essa etapa pode ocorrer por duas rotas: a descaboxilação, onde são formados alcanos e dióxido de carbono; e a descarbonilação, gerando água, alcenos e monóxido de carbono (Embrapa, 2015). A figura 8A mostra a reação de descaboxilação e a figura 8B ilustra a descarbonilação.

A pirólise ocorre em reatores e o produto obtido é destinado para as torres de destilação (Santos, 2016). A destilação é realizada com intuito de obter um biocombustível na faixa de carbonos do óleo diesel e reduzir a quantidade de ácidos graxos livres que causam um aumento indesejado na acidez. Como produto da destilação é retirado o ecodiesel, que pode ser utilizado para substituição total do diesel de petróleo devido a sua composição similar (Lhamas, 2013).

Oliveira, et al. (2011) e Lhamas (2013) identificaram em seus estudos que catalisadores básicos, como o carbonato de sódio, se mostraram eficientes no craqueamento termocatalítico do óleo de palma, podendo esta ser uma opção de processamento.

Figura 8: Rotas do craqueamento secundário.



Fonte: Embrapa (2015).

5.6 Produção de gás de síntese

Para aumentar a eficiência da troca de calor, os resíduos sólidos lignocelulósicos gerados no processamento do dendê passam por uma etapa de secagem e trituração para a eliminação de umidade e diminuição do tamanho das partículas. O material é então destinado para a gaseificação.

A gaseificação é um processo capaz de converter os resíduos sólidos em gás combustível (gás de síntese) através da oxidação parcial, na presença de agentes gaseificadores (vapor de água, oxigênio ou ar) em quantidades inferiores à estequiométrica. Os tipos de gaseificadores mais utilizados são leito fixo, leito fluidizado e fluxo de arraste (Friedrich, 2017).

Dentro do gaseificador, a biomassa primeiramente é submetida ao processo de pirólise em temperaturas inferiores a 700 °C na ausência de oxigênio, nessa etapa há formação de gases, alcatrão e carvão. Após a pirólise, o agente gaseificante é adicionado ao sistema e a temperatura é elevada (entre 800 e 1100°C) para que ocorra a gaseificação e a formação do gás de síntese (Quitete & Souza, 2015).

O gás de síntese é composto principalmente por óxidos de carbono, nitrogênio, hidrogênio e metano. O teor dos componentes é função da biomassa, das condições de reação e do agente gaseificante. A utilização do vapor de água como agente gaseificante favorece a formação de metano, composto de maior poder calorífico, colaborando com a utilização do gás de síntese como fonte energética.

Assim que é eliminado do gaseificador, o gás de síntese pode possuir uma variedade de impurezas, como materiais particulados e alcatrão. Para a purificação, o gás é alimentado em ciclones, para a eliminação de impurezas sólidas. Filtros são aplicados em conjunto aos ciclones para reter partículas menores (Santos, et al., 2016). Segundo Quitete & Souza (2014), a utilização de catalisadores (como zeólitas, calcitas, magnesitas, entre outros) possui potencial de reduzir as impurezas do gás de síntese.

O gás de síntese purificado é usado para a geração de eletricidade em motores de combustão interna. Outras rotas podem ser adicionadas ao processo para obtenção de novos produtos, como a obtenção de etanol via fermentação do gás e posteriormente destilação (Friedrich, 2017).

6. Considerações Finais

Atualmente, é essencial desenvolver alternativas para a redução de degradações ambientais. A substituição dos combustíveis fósseis por aqueles obtidos por fontes renováveis é imprescindível, principalmente devido à redução na emissão de gases que provocam o efeito estufa. Dessa forma, estudos sobre a produção de biocombustíveis a partir de diversas biomassas, além de tecnologias para tratamento dos resíduos são muito relevantes.

Foi possível verificar que o dendê possui potencial para produção de ecodiesel, principalmente devido a sua alta produtividade de óleo e ausência de sazonalidade, podendo ser uma boa opção para aumentar a disponibilidade de matérias-primas destinadas

à produção de biocombustível. Os resíduos sólidos gerados no processo podem ser tratados adequadamente por processos de termoconversão, como a gaseificação, gerando produtos de maior valor agregado.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

- Aguiar, D. C. (2021). Oleaginosas amazônicas usadas na produção de biodiesel. *Trabalho de Conclusão de Curso em Química Industrial*. Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara.
- Alvim, J. C., Alvim, F. A. L. S., Sales, V. H. G., Sales, P. V., Oliveira, E. M., Costa, A. C. R. (2020). Biorrefinarias: Conceitos, classificação, matérias primas e produtos. *Journal Bioenergy and Food Science*, 7, 61-77. DOI: 10.18067/jbfs.v1i3.22.
- Alzate, C. E. A., Torres, P. N. A. & Ramírez, A. F. V. (2022). Simulation of methanol production from residual biomasses in Cu/ZnO/ Al₂O₃ packed bed reactor. *Revista Facultad de Ingeniería*, 102.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo. (2022). <http://www.anp.gov.br>.
- Carvalho, L. G. (2016). Produção de biocombustíveis a partir do resíduo da indústria do dendê (*Elaeis guineensis*). *Tese de doutorado em Processos Químicos e Bioquímicos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cassales, A. R. (2010). Otimização da hidrólise da casca de soja (*glycine max*) e avaliação da capacidade de produção de xilitol e etanol por microrganismos sobre este hidrolisado. *Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Chen, W. H., Lin, B., Huang, M. & Chang, J. (2015). Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review. *Bioresource Technology*, 184, 314-327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.050>.
- Correa, D. F., Beyer, H. L., Fargione, J. E., Hill, J. D., Possingham, H. P., Thomas-Hall, S. R. & Schenk, P. M (2019). Towards the implementation of sustainable biofuel production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 250-264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.005>.
- Duarah, P., Haldar, D., Patel, A. K., Dong, C., Singhanian, R. R. & Purkait, M. K. (2022). A review on global perspectives of sustainable development in bioenergy generation. *Bioresource Technology*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126791>.
- EMBRAPA. Craqueamento. (2015). <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia>.
- FAO. Food and Agriculture Organization. (2020). <https://www.fao.org/faostat/>.
- Freitas, R. C. V., Carvalho, C. E. G., Santos, A. L., Kunrath, N. F. & Souza, I. S. (2021). Craqueamento térmico de sabões de manteiga de murmur e sebo bovino para produção de ecodiesel. *Exatas Online*, 12, 52-72.
- Friedrich, L. (2017). Gaseificação de resíduos agroindustriais para geração de gás de síntese e aumento do poder calorífico em função da glicerina. *Dissertação de mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.
- Hoffmann, S. (2016). Caracterização físico-química do caroço do dendê visando futuras aplicações. *Dissertação de mestrado em Engenharia*. Universidade Federal do Pampa, Alegrete.
- Hoque, M. E, Rashid, F. & Aziz, M. (2021). Gasification and power generation characteristics of rice husk, sawdust, and coconut shell using a fixed-bed downdraft gasifier. *Sustainability*, 13. <https://doi.org/10.3390/su13042027>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). <https://www.ibge.gov.br/estatisticas>.
- IBP. Instituto Brasileiro De Petróleo e Gás. (2022). <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor>.
- IEA. International Energy Agency. (2021). <https://www.iea.org/reports/transport-biofuels>.
- Junior, C. M. V., Santos, H. S., Santos, S. T. O., Drummond, A. R. F. & Silva, S. P. R. Produção e análise de *Syngas* a partir do sabugo de milho. *Brazilian Journal of Development*, 6, 33116-33123. DOI:10.34117/bjdv6n6-023.
- Lebid, T. & Henkes, J. A. (2015). Óleo de dendê na produção de biodiesel: um estudo de caso das vantagens e desvantagens econômica, ecológica e social da cultura desta oleaginosa para a produção de biodiesel. *Revista Gestão Sustentável Ambiental*, 4, 392-415. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e12015416-447>.
- Lhamas, D. E. L. (2013). Estudo do processo de craqueamento termocatalítico do óleo de palma (*Elaeis guineensis*) e do óleo de buriti (*Mauritia flexuosa*) para produção de biocombustível. *Tese de doutorado em Engenharia de Recursos Naturais*. Universidade Federal do Pará, Belém.
- Mainil, R. I. & Matsumura, Y. (2019) Assessment of palm oil mill effluent (POME) gasification in supercritical water for hydrogen production. *International Journal of Sustainable Biomass and Bioenergy*, 2.
- Marx, S. (2016). Glycerol-free biodiesel production through transesterification: a review. *Fuel Processing Technology*, 151, 139-147.

<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.05.033>.

Moncada J., Ariztizábal V. & Cardona A. (2016). Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>.

Morais, J. P. S., Medeiros, E. P., Silva, J. A., Rosa, M. F., Filho, M. S. M., Alexandre, L. C., Cassales, A. R. & Santos, M. A. (2013). Valorização de Coprodutos da cadeia do dendê. *Embrapa Agroindústria Tropical*.

Morais, P. P., Pascoal, P. V., Rocha, E. S. & Martins, E. C. A. (2017). Etanol de 2 geração: atual produção e perspectivas. *Bioenergia em revista: diálogos*, 1, 45-57.

Mota, C. J. A. & Monteiro, R. S. (2013). Química e sustentabilidade: Novas fronteiras em biocombustíveis. *Química Nova*, 46, 1483-1490.

Nair, L.G., Agrawal K., & Verma, P. (2022). An overview of sustainable approaches for bioenergy production from agro-industrial wastes. *Energy Nexus*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100086>.

Oliveira, N. M. L. A., Dantas, S. C., Martins, S. B. S. & Alves, E. C. (2017). Reaproveitamento de resíduos da cadeia do biodiesel obtido a partir de óleo de palma (elais guineensis). *Bioenergia em revista: diálogos*, 7, 103-121.

Oliveira, R. M., Lhamas, D. E. L., Mota, S. A. P., Machado, N. T. & Borges, L. E. P. (2011). Estudo do processo de craqueamento termocatalítico do óleo de palma neutralizado em escala semi-piloto. *4º Simpósio Nacional de Biocombustíveis*.

Okolie, J. A., Epelle, E. I., Tabat, M. E., Orivri, U., Amenaghawon, A. N. & Okoye, P. U.; Gunes, B. (2022). Waste biomass valorization for the production of biofuels and value-added products: A comprehensive review of thermochemical, biological and integrated processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 323-344. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.049>.

Pérez, A. T. E., Camargo M., Rincón, P. C. N. & Marchant M. A. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 69, 350-359.

Pio, D. T., Tarelho, L. A. C. & Pinto, P. C. R. (2020). Gasification-based biorefinery integration in the pulp and paper industry: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110210>.

Queiroz, A.G., França, L. & Ponte, M. X. (2012). The life cycle assessment of biodiesel from palm oil ("dendê") in the Amazon. *Biomass and Bioenergy*, 36, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.007>.

Quitete, C. P. B. & Souza, M.V. M. (2014). Remoção do alcatrão de correntes de gaseificação de biomassa: processos e catalisadores. *Química Nova*, 37, 689-698. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140110>.

Ribeiro, M. F. S. & Costa, B. J. (2015). Processamento de oleaginosas como alternativa de agregação de valor na agricultura familiar. *Petrobás*, 55.

Rosa, M. F., Souza, M. S. M., Figueiredo, M. C. B., Morais, J. P. S., Santaella, S. T. & Leitão, R. C. (2021). Valorização de resíduos da agroindústria. *II SIGERA*, v.1.

Santos, O. R. (2016). Tratamento térmico da torta de dendê (Elais guineenses, Jacq) para produção de biocombustíveis. *Dissertação de mestrado em Engenharia Química*. Universidade Federal do Pará, Belém.

Silva, E. G. (2011). Torta de dendê na alimentação de frangos de crescimento lento criados no sistema caipira. *Dissertação de mestrado em Ciência Animal Tropical*. Universidade Federal do Tocantins, Araguaína.

Srinivasan, P., Sarmah, A. K., Smernik, R., Das, O., Farid, M., & Gao, W. A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: Production, characterization and potential applications. *Science of the Total Environment*, 512-513, 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.068>.

Tripathi, M., Sahu, J. & Ganesan, P. Effect of process parameter on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 55, 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>.

USDA. U.S Department of Agriculture. (2022). <https://www.ipad.fas.usda.gov>.

Vital, M. H. F. (2018). Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. *BNDES Set.*, 24 167-244.

Wang, J., Singer, S. D., Souto, B. A., Asomaning J., Ulah, A., Bressler, D. C., Chen, G. (2022). Current progress in lipid-based biofuels: Feedstocks and production technologies. *Bioresource Technology*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127020>.