

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MÉTODOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS EM BIOCOMBUSTÍVEIS**

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA: MÉTODOS DE CONVERSIÓN DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES EN BIOCOMBUSTIBLES**

**LITERATURE REVIEW: AGROINDUSTRIAL WASTE CONVERSION METHODS
INTO BIOFUELS**

Júlia de Oliveira Martins Müller¹; Patrícia Viera de Oliveira²; Tarcisio Wolff Leal³; Carlos Rafael Silva de Oliveira⁴; Afonso Henrique da Silva Júnior⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/IICIAGRO.0029>

RESUMO

O aumento na geração de resíduos agroindustriais e a necessidade de modificação da matriz energética, visando a utilização de combustíveis renováveis e que não emitam gases do efeito estufa, são problemas que apresentam uma solução integrada, através da utilização desses resíduos para geração de biocombustíveis, os quais são provenientes de uma fonte renovável. Diante disso, o objetivo desse trabalho de revisão foi abordar os diferentes tipos de biocombustíveis existentes, focando na produção de biocombustíveis pela utilização de resíduos agroindustriais (segunda geração), demonstrando os métodos de conversão existentes, seus fundamentos, produtos obtidos, principais desvantagens e as tecnologias que estão em desenvolvimento. Para tanto, fez-se uma revisão em base de dados científicas buscando artigos recentes e relevantes sobre o tema. Logo, os resíduos podem ser convertidos em biocombustíveis pela utilização de métodos de conversão bioquímicos e termoquímicos. Os métodos de conversão bioquímicos incluem a digestão anaeróbica, que produz biogás, e a fermentação, que converte açúcares em etanol e hidrogênio (fotofermentação e fermentação *dark*). A conversão termoquímica inclui processos de combustão para produzir calor e eletricidade, pirólise, liquefação e gaseificação para obtenção de bio-óleo, gás de síntese e biocarvão. Esses métodos diferem entre si pelas condições operacionais utilizadas. Apesar disso, a conversão atingida por esses métodos depende do tipo resíduo utilizado, sendo, por vezes, baixa. Por conta disso, processos que aplicam em conjunto métodos bioquímicos e termoquímicos vêm sendo estudados buscando aumentar a eficiência e rendimento do processo, bem como o desenvolvimento de uma economia circular. No entanto, para que seja consolidado, são necessárias mais pesquisas para compreender as etapas envolvidas.

Palavras-Chave: Biocombustíveis, Resíduos Agroindustriais, Conversão.

RESUMEN

El aumento en la generación de residuos agroindustriales y la necesidad de modificar la matriz energética, apuntando al uso de combustibles renovables que no emitan gases de efecto invernadero, son problemas que presentan una solución integral, a través del aprovechamiento de estos residuos para generar biocombustibles, los cuales provienen de una fuente renovable. Ante esto, el presente trabajo de revisión tuvo como objetivo abordar los diferentes tipos de biocombustibles existentes, enfocándose en la producción de biocombustibles mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales (segunda generación), demostrando los métodos de conversión existentes, sus fundamentos, productos obtenidos, principales desventajas y las tecnologías que se están desarrollando. Para ello, se realizó una

¹ Pós-graduação em Engenharia Química (PósENQ), UFSC, julia.omm@posgrad.ufsc.br

² Pós-graduação em Engenharia Química (PósENQ), UFSC, p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

³ Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PIPE), UFPR, tarcisio.leal@ufpr.br

⁴ Departamento de Engenharia Têxtil (DET - CTE), UFSC, carlos.oliveira@ufsc.br

⁵ Pós-graduação em Engenharia Química (PósENQ), UFSC, afonso.silva@posgrad.ufsc.br

búsqueda en bases de datos científicas, buscando artículos recientes y relevantes sobre el tema. Por lo tanto, los desechos pueden convertirse en biocombustibles utilizando métodos de conversión bioquímicos y termoquímicos. Los métodos de conversión bioquímica incluyen la digestión anaeróbica, que produce biogás, y la fermentación, que convierte los azúcares en etanol e hidrógeno (fotofermentación y fermentación oscura). La conversión termoquímica incluye procesos de combustión para producir calor y electricidad, pirólisis, licuefacción y gasificación para obtener bio-oleo, gas de síntesis y biocarbón. Estos métodos difieren entre sí por las condiciones operativas utilizadas. A pesar de ello, la conversión conseguida por estos métodos depende del tipo de residuo utilizado, y en ocasiones es baja. Por ello, se han estudiado procesos que aplican conjuntamente métodos bioquímicos y termoquímicos con el fin de incrementar la eficiencia y el rendimiento del proceso, así como el desarrollo de una economía circular. Sin embargo, para que se consolide, se necesita más investigación para comprender los pasos involucrados.

Palabras Clave: Biocombustibles, Residuos Agroindustriales, Conversión.

ABSTRACT

The increasing generation of agro-industrial wastes and the need to change the energy matrix in terms of using renewable fuels that do not emit greenhouse gasses are problems that present an integrated solution through the use of these wastes for the production of biofuels derived from a renewable source. With this in mind, the objective of this review was to look at the different types of existing biofuels, focusing on the production of biofuels from agro-industrial wastes (second generation). The existing conversion methods, their bases, the products obtained, the main drawbacks and the technologies under development were highlighted. For this purpose, scientific databases were searched for recent and relevant articles on the subject. According to this, waste can be converted into biofuels using biochemical and thermochemical conversion methods. Biochemical conversion methods include anaerobic digestion, which produces biogas, and fermentation, which converts sugars into ethanol and hydrogen (photofermentation and dark fermentation). Thermochemical conversion includes combustion processes to produce heat and electricity, pyrolysis, liquefaction, and gasification to produce bio-oil, syngas, and biochar. These methods differ from each other in the operating conditions used. However, the conversion obtained by these methods depends on the type of waste used and is sometimes low. For this reason, processes using biochemical and thermochemical methods together have been studied to increase the efficiency and yield of the process and the development of a circular economy. However, to consolidate them, further research is needed to understand the steps involved.

Keywords: Biofuels, Agroindustrial Waste, Conversion.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma vasta extensão territorial, contribuindo para a existência de três safras ao longo do ano. De acordo com pesquisas recentes, estima-se que na safra 22/23 sejam produzidos 313,9 milhões de toneladas de grãos, valor que é cerca de 15,2% maior que a safra 21/22. Entre as culturas cultivadas no país, destaca-se a soja, o milho e o trigo, com a expectativa de produção de 154,8; 125,5; e 9,6 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2023a).

O destino dessas culturas, envolve a exportação e o consumo pelo mercado interno. Na safra do ano passado, 61% da soja produzida no país foi exportada, enquanto 39% era destinada ao processamento para obtenção de farelo e óleo. Do óleo, cerca de 74% era utilizado para alimentação e produção de biodiesel. O óleo de soja, por sua vez, representa aproximadamente 70% das matérias-primas utilizadas na produção desse biocombustível, seguido de gorduras

animais e outros materiais graxos (AGROADVANCE, 2023a).

O milho, a segunda maior cultura produzida no país, também possui uma parte da sua produção dirigida para a obtenção de biocombustíveis. O etanol proveniente do milho, tem apresentado uma rápida expansão, devido à crescente produção de milho, ampliação de complexos industriais e aumento da demanda por combustíveis renováveis (AGROADVANCE, 2023b). Segundo dados da Conab (2023b), estima-se que a safra 22/23 seja responsável pela produção de 5,64 bilhões de litros de etanol, o que representa 17% do total produzido desse biocombustível.

No entanto, com o aumento da produção de grãos, aumenta-se também a geração de resíduos, tanto resultantes do cultivo quanto do beneficiamento dos grãos. Esses resíduos tornam-se um problema ambiental, social e econômico. Contabiliza-se que 967 milhões de toneladas de resíduos agroindustriais sejam gerados por ano. Por esse motivo, busca-se alternativas para o aproveitamento desses resíduos, os quais podem apresentar um potencial energético (ABIB, 2022). Uma das possibilidades é a sua utilização para a produção de biocombustíveis, que são combustíveis obtidos por meio de biomassa (ELGARAHY et al., 2021).

Além de proporcionar um novo destino para os resíduos agroindustriais, os biocombustíveis mostram-se como elementos primordiais para o processo de mudança da matriz energética, reduzindo a utilização de combustíveis fósseis. A queima de combustíveis fósseis, seja para geração de eletricidade quanto em meios de transporte, é uma das razões do aumento da quantidade de gás carbônico (CO₂) existente na atmosfera. O setor de transporte, no ano de 2019, foi responsável por aproximadamente 45% das emissões de CO₂ do setor de energia. Nesse sentido, novas políticas públicas de descarbonização vêm sendo implementadas visando incentivar o consumo de combustíveis renováveis bem como a sua produção. Apesar de ser um processo recente para alguns países, o Brasil é um dos pioneiros na produção e consumo de biocombustíveis, devido a programas governamentais como Programa Nacional do Alcool (Próalcool), o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) e mais recentemente a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022).

Diante disso, a produção de alguns tipos de biocombustíveis no Brasil já se mostra bem consolidada. Todavia, os biocombustíveis são divididos em 4 categorias diferentes, dependendo da matéria-prima empregue em sua produção e em algumas delas, as tecnologias necessárias ainda estão em desenvolvimento. A primeira, conhecida como biocombustível de primeira geração, é produzida a partir de amido, açúcar e oleaginosas. A segunda, utiliza produtos

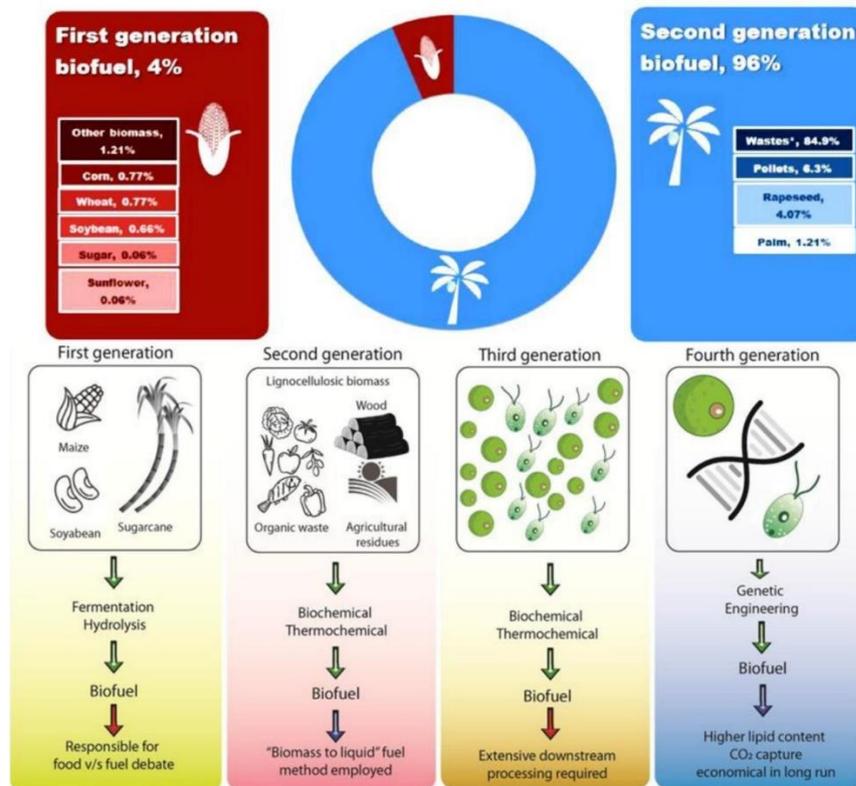
lignocelulósicos não comestíveis. A terceira baseia-se na aplicação de algas como fonte de energia. Por último, a quarta faz uso de modificação genética de algas, fungos e leveduras para aumentar a produção de biocombustíveis (ELGARAHY et al., 2021).

Entre os biocombustíveis que podem ser obtidos, destaca-se o biodiesel que é misturado juntamente como o diesel proveniente do petróleo para a aplicação em motores a diesel, o bioetanol que, em conjunto com a gasolina, pode ser usado em motores a gasolina e o biogás que é usado para a geração de calor e eletricidade (JUNG et al., 2021). No entanto, existem diversos métodos de produção desses combustíveis renováveis. Logo, essa revisão tem como objetivo abordar os métodos de conversão da biomassa lignocelulósica (resíduos agroindustriais) para obtenção de biocombustíveis, apresentando seus fundamentos, desvantagens, principais produtos e o desenvolvimento de novas tecnologias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Como exposto, os biocombustíveis podem ser de primeira, segunda, terceira ou quarta geração. Os biocombustíveis de primeira geração são produzidos a partir de óleos de plantas, açúcar e amidos, os quais são obtidos no trigo, cevada, milho, batata, cana-de-açúcar, oleaginosas, soja e girassol. Essas matérias-primas podem ser convertidas em combustíveis através de processos de fermentação e hidrólise. A 2ª geração utiliza resíduos agrícolas, orgânicos e florestais, fontes de biomassa lignocelulósica, que através de métodos bioquímicos e termoquímicos são transformados em combustíveis. Esses dois métodos também são empregados na produção de combustível de 3ª geração a partir de algas. Por fim, a 4ª geração faz uso de cianobactérias modificadas através de engenharia genética (MALODE et al., 2021). A Figura 1 demonstra os tipos de biocombustíveis que podem ser gerados bem como suas matérias-primas e métodos de conversão.

Figura 01: Geração de biocombustíveis



Fonte: Malode et al., (2021).

Apesar de todas as gerações de combustíveis serem promissoras, a 3ª e a 4ª geração ainda apresentam altos custos de produção e permanecem em estágios de pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma, como visto na Figura 1, cerca de 96% do biocombustível produzido é resultante da segunda geração e 4% da primeira. Isso se deve ao fato de que a matéria-prima utilizada na segunda geração tem como base os resíduos, não havendo competição com a produção de alimentos para o consumo humano. No entanto, para a obtenção dessa geração de combustíveis, diversos mecanismos complexos estão envolvidos, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias capazes de promover uma maior conversão (ELGARAHY et al., 2021).

Os métodos de conversão da matéria-prima lignocelulósica comumente empregados são os métodos bioquímicos e os termoquímicos. Os métodos bioquímicos consistem em utilizar uma população de microrganismos específica para produzir carboidratos fermentáveis e convertê-los em combustíveis líquidos ou moléculas gasosas. Enquanto os termoquímicos aquecem ou oxidam a biomassa, em atmosfera controlada, para produzir calor, eletricidade ou intermediários líquidos ou gasosos, os quais podem ser convertidos em combustíveis líquidos ou produtos químicos (GNANASEKARAN et al., 2023). Dessa forma, a seguir serão abordados os métodos descritos.

3 METODOLOGIA

Para realizar essa pesquisa bibliográfica, optou-se por utilizar a base de dados da Elsevier (ScienceDirect®) como fonte de pesquisa. As palavras-chave utilizadas foram “métodos de conversão”, “resíduos agrícolas”, “biocombustíveis”, “biodiesel”, “bioetanol” e “biometano”, filtrando os resultados para identificar apenas publicações de artigos de pesquisa e de revisão publicados entre 2021 e 2023. Ao todo, foram encontradas 392 publicações, das quais selecionou-se, por meio da leitura dos títulos e resumos, aquelas mais relevantes para o desenvolvimento desse trabalho.

4 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos agroindustriais são todos aqueles provenientes do cultivo e processamento de produtos agrícolas e podem ser divididos em 4 categorias: resíduos de animais, resíduos de processamento industrial, resíduos de culturas e resíduos provenientes do desperdício de alimentos (ASHOKKUMAR et al., 2022; RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022). Além disso, são classificados como biomassa lignocelulósica, compostos por estruturas moleculares complexas como celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e proteína. A maioria dos resíduos agroindustriais são compostos, em base seca, por 35 a 50% de celulose, 20 a 35% de hemicelulose, 15 a 20% de lignina e entre 15 a 20% de cinzas e proteína (AWOGBEMI; VON KALLON, 2022).

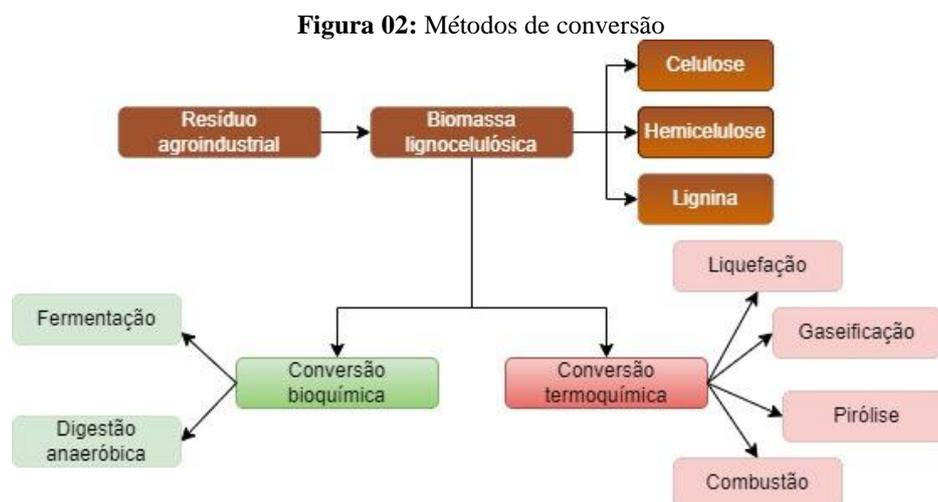
Devido à sua estrutura e as suas características físico-químicas como hidrofobicidade e composição heterogênea, a biomassa lignocelulósica é resistente a biodegradação, necessitando de pré-tratamentos que promovam sua biodisponibilidade e degradação biológica. Dessa forma, a aplicação de diferentes enzimas que sejam capazes de romper as cadeias poliméricas da celulose, hemicelulose e lignina mostra-se como uma alternativa para proporcionar sua conversão. A celulose é um polímero linear de glicose, constituído de monômeros de β -1,4-D-glicopirranose. A biodegradação da celulose é influenciada pelo grau de cristalinidade das moléculas, o qual é determinado pela orientação molecular e pelas ligações intra e intermoleculares de hidrogênio (SARAVANAN et al., 2023). Além disso, a celulose, devido ao fato de ser um polissacarídeo duro, fibroso e impenetrável, é responsável por manter a estabilidade mecânica da estrutura e sua resistência (AWOGBEMI; VON KALLON, 2022).

Outro componente da biomassa, a hemicelulose é um heteropolímero curto, ramificado e composto de D-arabinose, D-xilose, D-glicose, D-manose e D-galactose, bem como de alguns ácidos orgânicos. Esse polímero pode ser formado por monômeros de açúcares diferentes ou do mesmo açúcar. Diferentemente da celulose, a hemicelulose é uma molécula amorfa e por

esse motivo apresenta uma menor resistência química (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022). Por possuir uma estrutura amorfa e viscoelasticidade, essas características proporcionam uma reação viscosa entre a estrutura cristalina da celulose e a lignina amorfa na biomassa lignocelulósica. Dessa forma, a hemicelulose é, entre os componentes em maior quantidade, a molécula mais fácil de ser degradada (SARAVANAN et al., 2023). Por conta disso, o conteúdo de hemicelulose determina o potencial da biomassa ser convertida em biocombustível (AWOGBEMI; VON KALLON, 2022).

A barreira física que impede o acesso à celulose e a hemicelulose é a lignina. Uma rede polimérica complexa que torna a biomassa resistente, impede a despolimerização enzimática, retardando a extração da celulose e hemicelulose (MUJTABA et al., 2023). A lignina é composta por unidades de fenilproprano ligadas entre si, formando um grande e complexo arranjo tridimensional. É aromática, hidrofóbica e um biopolímero de alto peso molecular (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022).

A rota de conversão da biomassa depende da sua composição. A conversão bioquímica é recomendada para matérias-primas com alta quantidade de celulose, hemicelulose, umidade e um proporção de carbono/nitrogênio menor que 30. Em contrapartida, a conversão termoquímica é preferível para biomassas com baixa umidade, alto teor de lignina e proporção de carbono/nitrogênio superior a 30 (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022). A Figura 2 apresenta os métodos de conversão normalmente empregados.



Fonte: Adaptado de Gnanasekaran et al. (2023); Zabed et al. (2023).

5 CONVERSÃO BIOQUÍMICA

A conversão bioquímica da biomassa é um processo eficaz, puro, barato e ambientalmente amigável. Além disso, a utilização de diferentes enzimas e microrganismos resulta em uma variedade de intermediários que podem ser utilizados na produção de

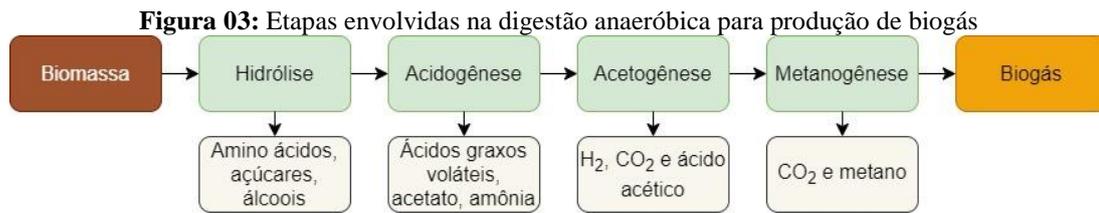
combustíveis, minerais ou produtos químicos (MANIKANDAN et al., 2023). Os processos bioquímicos são mais limpos e eficientes se comparados a outros métodos de conversão, sendo aplicados para a produção de biogás, biometano, biohidrogênio, bioetanol e outros compostos químicos (ROCHA-MENESES et al., 2022). Para que seja possível a conversão, é necessário que a biomassa passe por um pré-tratamento a fim de quebrar a cadeia polimérica. Dessa forma, os monômeros obtidos (derivados de açúcar ou de lignina) podem ser convertidos, pelo uso de microrganismos, por diferentes maneiras: fermentação, digestão anaeróbica, fotofermentação ou fermentação escura (ZABED et al., 2023).

5.1 DIGESTÃO ANAERÓBICA

A digestão anaeróbica é um processo bem estabelecido que faz uso de microrganismos anaeróbicos, que não utilizam oxigênio, para converter um material orgânico em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), biofertilizantes e outros gases. O metano e o dióxido de carbono são os maiores constituintes do biogás, um biocombustível que pode ser queimado ou convertido em gás natural para uso em motores CHP (ROCHA-MENESES et al., 2022; GNANASEKARAN et al., 2023).

Esse método de conversão pode ser dividido em 4 etapas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O primeiro passo envolve a decomposição das moléculas orgânicas complexas em monômeros solúveis de amino ácidos, peptídeos, açúcares, entre outros. Para que esse processo de decomposição ocorra, microrganismos hidrolíticos, tais como bacteroides, clostrídios e estreptococos, alteram o pH do sistema, sendo essa a etapa limitante de todo o processo (STANLEY et al., 2022). A velocidade dessa etapa depende, principalmente, da natureza da matéria-prima. Se essa apresentar uma maior quantidade de celulose e hemicelulose, as quais possuem uma estrutura mais resistente a degradação, esse processo irá ocorrer em uma taxa mais lenta (GNANASEKARAN et al., 2023).

Na segunda etapa, os monômeros obtidos na hidrólise são convertidos, por meio de microrganismos existentes na fermentação acidogênica, em ácidos graxos voláteis, acetato, amônia, dióxido de carbono, hidrogênio (H_2) e álcoois (STANLEY et al., 2022; GNANASEKARAN et al., 2023). Os ácidos graxos voláteis obtidos são transformados em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono na acetogênese (SIKARWAR et al., 2021). Por fim, a metanogênese faz uso de bactérias anaeróbicas heterotróficas produtoras de metano para produzir biometano a partir do acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. Essa etapa é considerada como o mecanismo de bioconversão mais lento do processo de digestão anaeróbica (STANLEY et al., 2022). A Figura 3 descreve as principais etapas do processo.



Fonte: Adaptado de Stanley et al. (2022); Rocha-Meneses et al. (2022).

A utilização desse método para produção de biogás enfrenta alguns desafios como baixos rendimentos de metano, produção de substâncias inibidoras, alta produção de dióxido de carbono e alta concentração de nitrogênio amoniacal. Dessa forma, necessita-se a implementação de melhorias, tanto no pré-tratamento da biomassa lignocelulósica quanto nos parâmetros de processo (carga orgânica, temperatura, pH). Um dos fatores que afeta a conversão da biomassa orgânica pelos microrganismos é a quantidade de macro e micronutrientes disponíveis. Logo, a suplementação de micronutrientes em nanoescala demonstra-se como uma alternativa para o aumento do rendimento da produção de biogás e de biometano. Para tanto, podem-se utilizar nanopartículas, visto que, pela sua dimensão, área superficial, composição e natureza catalítica, elas podem se infiltrar nas membranas celulares, aumentando os rendimentos de biometano e diminuindo a fase de atraso dos microrganismos. No entanto, sua utilização ainda carece de estudos quanto aos impactos econômicos e ambientais (ROCHA-MENESES et al., 2022).

Outra maneira inclui novas formas de pré-tratamento pois, é por meio desse processo que ocorre a quebra de ligações químicas dos componentes principais da biomassa, o que promove o aumento da conversão e dos sítios ativos para que as bactérias anaeróbicas possam reagir. Existem três tipos principais de pré-tratamento, o físico, o químico e o biológico. (STANLEY et al., 2022). Uma estratégia, seria a aplicação de subprodutos da digestão anaeróbica, como o líquido resultante da digestão e o dióxido de carbono, que demonstraram aumentar o teor de monômeros de açúcar ao passo que reduzem a cristalinidade da celulose, aumentando a produção de metano (MA et al., 2022).

Por vezes, para que a conversão seja maior, ocorre a utilização de mais de uma forma de pré-tratamento, sendo necessário um estudo a fim de determinar os efeitos de sinergia entre eles (RAHMANI et al., 2022). Portanto, por ser um método atrativo e promissor para obtenção de biocombustíveis, mais estudos devem ser realizados visando proporcionar um maior entendimento dos fenômenos microbiológicos, bioquímicos e termodinâmicos envolvidos na digestão anaeróbica de biomassa lignocelulósica (PAULINETTI et al., 2022).

5.2 FERMENTAÇÃO

A fermentação é um processo que utiliza os produtos da hidrólise enzimática da lignocelulose, ricos em açúcares, em conjunto com microrganismos para obtenção de bioetanol. Para tanto, faz-se uso de microrganismos como *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis*, *Escherichia coli*, *Pachysolen tannophilus* e *Candida shehatae*, para promover a conversão da glicose em etanol (GNANASEKARAN et al., 2023). A fermentação pode ocorrer de diversas maneiras, o que difere é a etapa em que ocorre a hidrólise enzimática, a qual pode ser separada (SHF) ou ocorrer simultaneamente com a fermentação (SSF). Além disso, a SHF e a SSF também pode apresentar cofermentação, sendo então descritas com SHCF e SSCF. A SHF e a SHCF envolvem a fermentação de hexoses ou pentoses (glicose da celulose ou xilose da hemicelulose), a SSF faz a fermentação do açúcar celulósico (glicose) e a SSCF a fermentação de xilose e glicose. Dentre esses sistemas, o SSCF apresenta uma melhor viabilidade técnica e econômica, pois é capaz de realizar a conversão simultânea de açúcares derivados de celulose e hemicelulose, diminuindo a quantidade de energia necessária para o processo (ZABED et al., 2023).

Esses processos de fermentação são influenciados pelo pH do meio, disponibilidade de oxigênio, temperatura, bem como pela quantidade de celulose, hemicelulose e lignina, que determinam o seu rendimento. Durante essa etapa, os microrganismos fermentadores convertem os carboidratos em etanol, ácido lático e outros compostos (GNANASEKARAN et al., 2023). Nesse sentido, um dos maiores desafios encontrados no processo de produção de etanol de segunda geração, está no fato de que os microrganismos geralmente empregados apresentam dificuldades em fermentar a xilose e a glicose. Logo, a fermentação de açúcares misturados por bactérias apresenta uma menor eficiência se comparado a outros microrganismos, como as leveduras. Visando solucionar esse problema, tem se utilizado engenharia metabólica em leveduras e cepas bacterianas, tem se trabalho com co-culturas e também tem se realizado a fermentação em duas fases (ZABED et al., 2023). Além da produção de bioetanol pelo processo de fermentação, também é possível obter biohidrogênio, nesse caso por meio da fotofermentação e da fermentação no escuro.

A fermentação sem dependência da luz, conhecida como *dark fermentation*, é um processo que envolve a conversão de um substrato complexo por meio do uso de microrganismos anaeróbicos facultativos ou obrigatórios. Nesse caso, o biohidrogênio é produzido de duas maneiras, via nicotinamida adenina dinucleotídeo hidreto (NADH) e pelo formato (ARUN et al., 2022). Ao contrário, a fotofermentação depende da luz para que ocorra a conversão da biomassa, em condições anaeróbicas, por bactérias fotossintéticas, as quais

fazem uso da luz para produzir hidrogênio e dióxido de carbono. Ambos são processos heterotróficos, mas a *dark fermentation* apresenta-se como uma técnica mais promissora, promovendo uma maior eficiência, maior conversão e produtividade (ZABED et al., 2023).

6 CONVERSÃO TERMOQUÍMICA

O processo de conversão termoquímica da biomassa lignocelulósica pode ser caracterizado como a quebra de ligações químicas e a reforma da matéria orgânica em diversos produtos de valor agregado, como biocarvão, biocombustíveis e bio-óleos (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022). Esse processo ocorre por meio do aquecimento ou oxidação, sob condições controladas (GNANASEKARAN et al., 2023). A biomassa pode ser convertida em gases, sólidos ou combustíveis líquidos, dependendo apenas de condições de reação como taxa de aquecimento, temperatura, pressão e tempo de residência (OKOLIE et al., 2022). Tendo como base os parâmetros de reação, a conversão termoquímica pode ser dividida em quatro processos principais: combustão, pirólise, liquefação e gaseificação (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022).

A aplicação desse processo pode não necessitar de um pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, visto que o carbono, hidrogênio e oxigênio presentes na celulose, lignina e hemicelulose podem ser degradados termicamente e posteriormente convertidos em gás de síntese (JUNG et al., 2021). Além disso, esse método apresenta como vantagens a capacidade de utilizar diferentes tipos de resíduos, inclusive os que apresentam dificuldade de serem convertidos pelo método bioquímico, bom controle do ambiente de reação, ecologicamente compatível, possibilidade de recuperação de energia, rapidez, baixo efeito ambiental e capacidade de produzir diversos combustíveis (SIKARWAR et al., 2021; RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022; AWASTHI et al., 2021). No entanto, a baixa conversão de matérias-primas úmidas, consumo elevado de energia, alto teor de cinzas, alto custo de conversão catalítica, necessidade de limpeza dos intermediários, geração de subprodutos de difícil descarte e o custo elevado mostram-se como algumas das dificuldades que precisam ser superadas (GNANASEKARAN et al., 2023; SIKARWAR et al., 2021; OKOLIE et al., 2022).

6.1 COMBUSTÃO

A combustão consiste na queima da biomassa, em condições controladas, para gerar calor, o qual é aplicado em turbinas a vapor para gerar eletricidade e/ou em trocadores de calor para promover o aquecimento (AWASTHI et al., 2021). A oxidação dessa biomassa, apresenta diversas reações químicas e processos físicos, que, em condições adequadas de oxigênio,

promovem a combustão completa da matéria-prima obtendo como produtos vapor de água e gás carbônico (ELGARAHY et al., 2021).

Esse processo é utilizado para a produção de gás combustível, biocombustível líquido, biomassa sólida e energia elétrica. Seu processo compreende quatro etapas consecutivas, secagem da biomassa para promover a eliminação de umidade, devolatilização (quebra) de macromoléculas existentes no material orgânico, queima de compostos voláteis como hidrogênio, monóxido (CO) e dióxido de carbono, metano, nitrogênio, vapor de água e carvão, e a gaseificação que é a decomposição térmica de compostos orgânicos complexos em compostos mais simples a partir da utilização de altas temperaturas e oxigênio, os quais levam a formação de gás de síntese (ELGARAHY et al., 2021). Todavia, esse método de conversão apresenta grandes emissões de carbono e outros poluentes como SO_x, NO_x e cinzas, por vezes carregadas com metais pesados (AWASTHI et al., 2021).

6.2 PIRÓLISE

Como uma alternativa ao processo de combustão, tem-se a utilização da pirólise da biomassa. Esse método também se baseia no rompimento das ligações químicas existentes na biomassa por meio do uso de energia térmica, porém, difere-se pela ausência ou menor quantidade de oxigênio do que seria necessário para a combustão completa. Como produtos estão o biocarvão, o bio-óleo e o gás de pirólise, o qual apresenta hidrogênio, metano, monóxido e dióxido de carbono, entre outros hidrocarbonetos (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022; AWASTHI et al., 2021).

A formação dos produtos depende de alguns fatores, sendo que a produção de biocarvão é favorecida em temperaturas mais baixas e altos tempos de residência, a de bio-óleo é promissora em temperaturas moderadas e baixo tempo de residência, enquanto a do gás de pirólise ocorre, preferencialmente, em altas temperaturas e longos tempos de residência (SIKARWAR et al., 2021). Dessa forma, o tempo de residência, a temperatura, a pressão, o tipo de reator, entre outras condições operacionais, são aspectos que precisam ser levados em conta pois, são eles que irão controlar a taxa de reação de pirólise bem como o tipo de produto formado. Baseado nisso, a pirólise pode ser dividida em três tipos: lenta, rápida e *flash*. Na pirólise lenta, a biomassa é queimada em baixa temperatura, baixa taxa de aquecimento e por longos tempos de residência, como resultado tem-se a produção de biocarvão, acetona, metanol e ácido acético. O oposto é observado na pirólise rápida, a qual ocorre em altas temperaturas, altas taxas de aquecimento e baixos tempos de residência, resultando na produção de bio-óleo e biogás. No caso da pirólise *flash*, a temperatura utilizada é maior e os tempos de residência

são menores se comparados à pirólise rápida, favorecendo a produção de bio-óleo. Dentre os três tipos, a pirólise rápida mostra-se como a mais vantajosa, visto que na pirólise lenta é necessário um longo tempo e uma maior quantidade de energia e a pirólise *flash* apresenta caráter corrosivo, devido às condições extremas, e o bio-óleo gerado apresenta variação térmica (ELGARAHY et al., 2021).

Diante disso, a pirólise rápida apresenta como vantagem a obtenção direta de um combustível líquido, o qual é mais fácil de ser transportado e reservado (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022). O gás de pirólise pode ser diretamente empregado como combustível ou utilizado para a síntese de outros produtos de valor agregado. Enquanto o biocarvão, após algumas modificações em suas propriedades físico-químicas, pode ser utilizado para correção do solo, para adsorção de CO₂, no tratamento de águas residuais, como suporte e como catalisador (JUNG et al., 2021).

6.3 LIQUEFAÇÃO

Diferentemente dos processos descritos anteriormente, a liquefação caracteriza-se pela possibilidade de utilização de biomassa úmida. Esse método ocorre na presença de água, sendo chamado também por liquefação hidrotérmica (HTL), e envolve reações de desidratação e descarboxilação das macromoléculas da biomassa para a produção de bio-óleo, produtos gasosos e resíduo sólido (ROUT et al., 2023). Em altas temperaturas, a água atua como um catalisador e como um reagente, desintegrando e modificando a matéria orgânica a partir de ligações de íons de hidrogênio aos hidrocarbonetos. A utilização de água como solvente possibilita a aplicação de temperaturas mais baixas das utilizadas no processo de pirólise *flash* (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022).

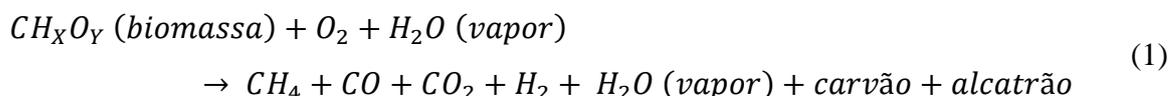
Para que esse processo ocorra, é necessário que a pressão e temperatura estejam acima do ponto crítico da água. Dessa forma, é descrito como reações que ocorrem, em meio aquoso, em condições de alta temperatura e pressão (GHIMIRE; BAKKE; BERGLAND, 2021). Esses dois parâmetros servem para categorizar esse processo em três tipos: carbonização hidrotérmica (HTC), liquefação hidrotérmica e gaseificação hidrotérmica (HTG). A carbonização hidrotérmica ocorre em temperaturas amenas, entre 180 e 260 °C, e baixas pressões (2-5 MPa), gerando como produto principal um combustível sólido rico em carbono chamado *hydrochar*. Na liquefação hidrotérmica, há um aumento na temperatura e pressão, atingindo valores entre 250-400 °C e 5-20 MPa, promovendo a formação de bio-óleo, similar ao petróleo bruto, e de produtos bioquímicos. No caso da gaseificação hidrotérmica, é necessário que a água passe para a fase de gás, por esse motivo opera-se com valores de pressão e temperatura superiores a

22,1 MPa e 374 °C, os quais correspondem aos valores críticos da água. Como produto da HTG, tem-se a produção do gás de síntese que é formado pela mistura de CO₂, CO, H₂, CH₄ e pequenas frações de outros hidrocarbonetos (ELGARAHY et al., 2021; ROUT et al., 2023).

Visto que esse método utiliza água como reagente, solvente e catalisador, uma grande quantidade de água residual é gerada, necessitando que haja a reutilização desse recurso para que o processo seja econômico e ambientalmente amigável. Diante disso, a água gerada pode ser reutilizada diretamente para a degradação da biomassa seca e os subprodutos existentes na fase aquosa podem ser reciclados (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022). No entanto, se descartada, poderia ser potencialmente tóxica para diferentes seres vivos e microrganismos devido à sua composição. Esse efluente apresenta ácidos orgânicos, compostos nitrogenados, proteínas, carboidratos, aminas, nutrientes como N-P-K (nitrogênio, fósforo e potássio) e alta quantidade de matéria orgânica. Dessa forma, sua valorização tem recebido crescente interesse, sendo investigada para produção de biocombustíveis, bioeletricidade, biocarvão e bio-óleos através do processo de digestão anaeróbica (ROUT et al., 2023).

6.4 GASEIFICAÇÃO

A conversão da biomassa lignocelulósica pelo processo de gaseificação ocorre através de reações paralelas e sequenciais em uma atmosfera deficiente de oxigênio (FAIZAN; SONG, 2023). Caracteriza-se como uma reação endotérmica, em que as macromoléculas da biomassa são decompostas em substâncias de valor agregado na presença de um agente oxidante, produzindo combustíveis gasosos e líquidos. Consiste em quatro etapas principais: secagem, pirólise, oxidação e reações de redução. Na secagem ocorre a redução do teor de umidade, para tanto, a biomassa é aquecida acima de 150 °C. Na etapa seguinte, entre 250 e 700 °C, as ligações químicas das moléculas de cadeia longa são quebradas em componentes de menores massas moleculares, formando produtos sólidos, líquidos e gasosos. Na oxidação ocorre a manutenção da temperatura, pois fornece a energia necessária para que o processo seja mantido. Por último, ocorre a produção do gás de síntese, obtido pela reação da mistura de gases formada nas etapas anteriores e o carvão sólido. A Equação 1 descreve a reação de gaseificação (ELGARAHY et al., 2021).



Logo, esse processo consiste em diminuir a razão mássica carbono/hidrogênio para que, dessa maneira, haja um incremento na fração de H₂ e conseqüentemente um aumento no

conteúdo energético do produto formado (SIKARWAR et al., 2021). O principal objetivo desse método de conversão é a obtenção do gás de síntese, que devido a presença de CO e H₂ é considerado como um combustível ecologicamente correto. Além disso, pode ser aplicado na produção de amônia, células de combustível e transformado em combustível líquido através da utilização do processo de Fischer-Tropsch (FAIZAN; SONG, 2023).

No entanto, a formação de alcatrão é um dos desafios a serem superados para a utilização desse método. Essa impureza, composta pela combinação de substâncias aromáticas, pode se depositar nas superfícies de motores, tubulações e turbinas, causando seu bloqueio. Dessa forma, o desenvolvimento e utilização de procedimentos eficientes para a remoção do alcatrão é fundamental (RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022).

7 PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E A INTEGRAÇÃO DA CONVERSÃO BIOQUÍMICA E TERMOQUÍMICA

Os métodos de conversão abordados apresentam potencial de produzir diversos tipos de biocombustíveis, conforme pode ser visto na Tabela 1. No entanto, conforme exposto, cada um apresenta vantagens e desvantagens, sendo que sua aplicação e eficiência dependerá do tipo de biomassa disponível.

Tabela 01: Formas de biocombustíveis e seus métodos de obtenção

Biocombustível	Método de conversão	Aplicação	Referências
Bioetanol	Fermentação	Substituto da gasolina	MANIKANDAN et al. 2023
Biodiesel	Reações químicas de transesterificação e esterificação	Misturado junto ao diesel para aplicação em veículos	MANIKANDAN et al. 2023
Biogás	Digestão anaeróbica	Geração de calor e após tratamento pode ser convertido a gás natural	ROCHA-MENESES et al., 2022; GNANASEKARAN et al., 2023
Biohidrogênio	Fotofermentação e fermentação <i>dark</i>	Utilizado em células de combustível	MANIKANDAN et al. 2023
Gás de síntese	Pirólise, liquefação e gaseificação	Pode ser diretamente utilizado para gerar calor e energia elétrica, ou posterior tratamento pode ser empregue para produção de metano, hidrogênio e combustíveis líquidos.	RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022
Bio-óleo	Pirólise, liquefação e gaseificação	Após alguns tratamentos, pode ser utilizado para combustão em caldeiras, motores a diesel, turbinas, fabricação de produtos químico, entre outros	RAHIMI; ANAND; GAUTAM, 2022
Calor e Energia	Combustão	Geração de eletricidade em turbinas e fonte de aquecimento	AWASTHI et al., 2021

Fonte: Própria (2023).

Nesse sentido, novas tecnologias vêm sendo estudadas visando aumentar a eficiência dos processos de conversão. Um estudo feito por Manikandan e demais autores (2023), demonstra como a utilização de nanomateriais pode ser uma alternativa para a conversão bioquímica de biomassa em biogás. Podem ser utilizados nanopartículas de óxidos metálicos, de carbono e de ferro zero-valente. No entanto, seu efeito na produção de biogás dependerá da sua concentração, tipo, tamanho e da biomassa que está sendo convertida. Apesar de recente, a utilização desses materiais mostra-se como uma forma promissora para acelerar o processo de digestão através da dosagem de íons. Logo, se projetada corretamente, essas nanopartículas fornecerão íons na medida adequada, permitindo que os microrganismos decomponham a matéria orgânica, proporcionando a máxima produção de biogás.

A produção de biohidrogênio por fermentação *dark* também pode ser melhorada por meio do uso de nanopartículas. Por conta da sua especificidade, área superficial, atividade catalítica e aplicação em dosagens não tóxicas, as nanopartículas são capazes de aumentar a eficiência de transferência de elétrons, melhorar a atividade das metaloenzimas, imobilizar outras enzimas e utilizar a matéria-prima de forma mais eficiente. Isso faz com que sua utilização na fermentação *dark* aumente o rendimento de biohidrogênio produzido (ARUN et al., 2022).

O biocarvão, um produto gerado na conversão termoquímica da biomassa, também pode ser utilizado como catalisador em processos de pirólise, gaseificação e liquefação. Devido às suas propriedades, quando utilizado como catalisador, o biocarvão reduz a produção de alcatrão, aumenta o rendimento do gás de síntese, diminuindo a quantidade de CO₂ gerado, influencia na formação de bio-óleo e aumenta a seletividade para diferentes compostos (KANG; NANDA; HU, 2022).

A utilização de métodos termoquímicos não se restringe apenas à biomassa lignocelulósica. Um estudo realizado por Agarwal et al. (2022) demonstra a aplicação desses métodos de conversão no resíduo sólido gerado pelo processo de digestão anaeróbica. Esse resíduo apresenta uma grande quantidade de matéria orgânica, devido à existência de lignina, que é resistente ao processo de digestão, e nutrientes como fósforo, nitrogênio e potássio. Por conta disso, pode ser utilizado para o cultivo de algas ou para a sua conversão termoquímica em combustíveis ou biocarvão. A combustão híbrida desse resíduo melhorou a qualidade do gás de síntese e aumentou a quantidade de energia gerada, demonstrando um aumento na eficiência energética do sistema se comparado ao convencional. Além disso, a pirólise do resíduo produz um biocarvão com elevada área superficial e propriedades desejáveis para a

remediação de solos e águas contaminadas, podendo ser utilizado, também, para aumentar a produção de metano na digestão anaeróbica.

Esse tipo de aplicação demonstra a importância da integração de processos, buscando uma economia circular. Os métodos demonstrados, quando aplicados em conjunto apresentam capacidade de reduzir os resíduos gerados, reduzindo os riscos à saúde e ao meio ambiente, e fazem com que os recursos sejam usados de forma eficiente (SIKARWAR et al. 2021). Essa forma de produção, por ser uma tecnologia inovadora, ainda necessita de pesquisas que possam providenciar soluções para problemas como a diversidade de matéria-prima, a construção de um sistema de pré-tratamento que leve em conta a necessidade de cada método acoplado, o carregamento e manutenção dos reatores, entre outros (AWASTHI et al., 2021).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis desempenha um papel importante tanto no gerenciamento de resíduos quanto na redução das emissões de gases do efeito estufa. Os biocombustíveis de segunda geração podem ser utilizados de diversas maneiras, seja para aplicação direta como combustível ou para a produção de outros produtos de valor agregado. No entanto, o rendimento de produção desses biocombustíveis depende de vários fatores e está diretamente ligado ao tipo de matéria-prima utilizada para a sua obtenção. Devido à complexidade química e estrutural da biomassa lignocelulósica, baixos rendimentos são obtidos, necessitando a utilização de novas tecnologias como nanopartículas, biocatalisadores (biocarvão) e a integração de processos de conversão bioquímica e termoquímica. Logo, para que esses métodos de produção sejam desenvolvidos em larga escala, são necessárias mais pesquisas para compreender profundamente os mecanismos reacionais envolvidos, as necessidades industriais, a elaboração e manutenção de políticas de apoio e incentivo e criação de um senso de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABIB – Associação Brasileira das Indústria de Biomassa, Bioenergia, Bioeletricidade, Pelletes e Energias Renováveis. **Potencial de biomassa de resíduos agroindustriais no Brasil**. 2022.
- AGARWAL, N. K. et al. Anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas production and digestate valorization. **Chemosphere**, v. 295, n. 133893, 2022.
- AGROADVANCE. **Subprodutos da soja: conheça os destinos e usos da soja brasileira**. 2023a.
- AGROADVANCE. **Etanol de milho no Brasil: 3 razões que impulsionam o crescimento**.

2023b.

ARUN, J. et al. Influence of biomass and nanoadditives in dark fermentation for enriched bio-hydrogen production: A detailed mechanistic review on pathway and commercialization challenges. **Fuel**, v. 327, n. 125112, 2022.

ASHOKKUMAR, V. et al. Advanced technologies on the sustainable approaches for conversion of organic waste to valuable bioproducts: Emerging circular bioeconomy perspective. **Fuel**, v. 324, n. 124313, 2022.

AWASTHI, M. K. et al. Techno-economics and life-cycle assessment of biological and thermochemical treatment of bio-waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, n. 110837, 2021.

AWOGBEMI, O; VON KALLON, D. V. Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. **Heliyon**, v. 8, n. e11117, 2022.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 8 oitavo levantamento, maio 2023a.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 11, n. 1 abril 2023b.

ELGARAHY, A. M. et al. Thermochemical conversion strategies of biomass to biofuels, techno-economic and bibliometric analysis: A conceptual review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 106503, 2021.

FAIZAN, M.; SONG, H. Critical review on catalytic biomass gasification: State-of-Art progress, technical challenges, and perspectives in future development. **Journal of Cleaner Production**, v. 408, n. 137224, 2023.

GHIMIRE, N.; BAKKE, R.; BERGLAND, W. H. Liquefaction of lignocellulosic biomass for methane production: A review. **Bioresource Technology**, v. 332, n. 125068, 2021.

GNANASEKARAN, L. et al. The conversion of biomass to fuels via cutting-edge technologies: Explorations from natural utilization systems. **Fuel**, v. 331, n. 125668, 2023.

GRANGEIA, C. SANTOS, L. LAZARO, L. L. B. The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. **Energy Conversion and Management: X**, v. 13, n. 100156, 2022.

JUNG, S. et al. Synthesis of different biofuels from livestock waste materials and their potential as sustainable feedstocks – A review. **Energy Conversion and Management**, v. 236, n. 114038, 2021.

KANG, K.; NANDA, S.; HU, Y. Current trends in biochar application for catalytic conversion of biomass to biofuels. **Catalysis Today**, v. 404, p. 3-18, 2022.

MA, S. et al. Biomethane enhancement from corn straw using anaerobic digestion by-products as pretreatment agents: A highly effective and green strategy. **Bioresource Technology**, v. 344,

n. 126177, 2022.

MALODE, S. J. et al. Recent advances and viability in biofuel production. **Energy Conversion and Management: X**, v. 10, n. 100070, 2021.

MANIKANDAN, S. et al. Critical review of biochemical pathways to transformation of waste and biomass into bioenergy. **Bioresource Technology**, v. 372, n. 128679, 2023.

MUJTABA, M. et al. Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. **Journal of Cleaner Production**, v. 402, n. 136815, 2023.

OKOLIE, J. A. et al. 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**, v. 159, p. 323-344, 2022.

PAULINETTI, A. P. et al. Anaerobic digestion as a core process for sustainable energy production in the soybean biorefinery: A techno-economic assessment. **Sustainable Horizons**, v. 3, n. 100024, 2022.

RAHIMI, Z.; ANAND, A.; GAUTAM, S. An overview on thermochemical conversion and potential evaluation of biofuels derived from agricultural wastes. **Energy Nexus**, v. 7, n. 100125, 2022.

RAHMANI, A. M. et al. Pretreatment methods to enhance solubilization and anaerobic biodegradability of lignocellulosic biomass (wheat straw): Progress and challenges. **Fuel**, v. 319, n. 123726, 2022.

ROCHA-MENESES, L. et al. Application of nanomaterials in anaerobic digestion processes: A new strategy towards sustainable methane production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 188, n. 108694, 2022.

ROUT, P. R. et al. Technological advancements in valorisation of industrial effluents employing hydrothermal liquefaction of biomass: Strategic innovations, barriers and perspectives. **Environmental Pollution**, v. 316, n. 120667, 2023.

SARAVANAN, A. et al. A comprehensive review on techno-economic analysis of biomass valorization and conversional technologies of lignocellulosic residues. **Industrial Crops & Products**, v. 200, n. 116822, 2023.

SIKARWAR, V. S. et al. Potential of coupling anaerobic digestion with thermochemical technologies for waste valorization. **Fuel**, v. 294, n. 120533, 2021.

STANLEY, J. T. et al., Potential pre-treatment of lignocellulosic biomass for the enhancement of biomethane production through anaerobic digestion- A review. **Fuel**, v. 318, n. 123593, 2022.

ZABED, H. M. et al. Towards the sustainable conversion of corn stover into bioenergy and bioproducts through biochemical route: Technical, economic and strategic perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 400, n. 136699, 2023.