

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE ENSINO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

*Análise Exergética da Produção de Biodiesel de Primeira e Segunda Geração e do
Aproveitamento de Resíduos Sólidos Agroindustriais*

Autor: Eduane Tavares Melo

Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Rio Verde, 2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE ENSINO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

*Análise Exergética da Produção de Biodiesel de Primeira e Segunda Geração e do
Aproveitamento de Resíduos Sólidos Agroindustriais*

Autor: Eduane Tavares de Melo

Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Trabalho de Curso apresentado como parte
das exigências para obtenção do título de
BACHAREL EM ENGENHARIA
QUÍMICA, no Curso de Engenharia
Química do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio
Verde.

Rio Verde, 2026

1. AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me sustentado ao longo de toda a minha trajetória, concedendo-me força, sabedoria e perseverança para superar cada desafio encontrado neste caminho.

Aos meus pais, por serem minha base, meu alicerce e meu maior exemplo de vida. Sou imensamente grata por todo amor, dedicação e ensinamentos que contribuíram para a construção de quem sou hoje.

Aos meus irmãos, pelo incentivo constante, apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus sobrinhos e sobrinhas, que, com sua alegria e carinho, foram fonte de motivação e leveza durante essa jornada. Aos meus cunhados, pelo apoio e convivência harmoniosa.

Ao meu esposo, por estar ao meu lado, apoiando meus sonhos, compreendendo minhas ausências e sendo meu companheiro em todos os momentos.

Ao meu filho, que é a razão maior de todas as minhas conquistas e a principal motivação para eu ter chegado até aqui. Tudo isso é por você.

Ao meu orientador, Prof. Hugo Leão, pela orientação, paciência, dedicação e pelos valiosos conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao coordenador do curso, Rogério Favareto, pelo apoio e por toda contribuição durante minha formação acadêmica.

A todos os professores da instituição, que, com comprometimento e excelência, contribuíram significativamente para minha formação profissional e pessoal.

Por fim, a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, deixo aqui minha eterna gratidão.

Muito obrigada.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	- 7 -
2.	OBJETIVOS.....	- 9 -
3.	FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA SOBRE EXERGIA.....	- 9 -
3.1.	1ª LEI E 2ª LEI DA TERMODINÂMICA.....	- 10 -
4.	ANÁLISE EXERGÉTICA: METODOLOGIA E INDICADORES	- 12 -
4.1.	DEFINIÇÃO DO AMBIENTE DE REFERÊNCIA	- 12 -
4.2.	COMPONENTES DA EXERGIA	- 13 -
4.2.1.	INDICADORES EXERGÉTICOS DE DESEMPENHO	- 13 -
4.2.2.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EXERGÉTICA EM SISTEMAS BIOENERGÉTICOS.....	- 14 -
4.2.3.	RELEVÂNCIA DA ANÁLISE EXERGÉTICA PARA ESTUDOS DE SUSTENTABILIDADE	- 16 -
5.	RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS COMO MATÉRIA-PRIMA.....	- 17 -
5.1.	CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS	- 17 -
5.1.1.	RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS	- 18 -
5.1.2.	RESÍDUOS OLEAGINOSOS.....	- 19 -
5.1.3.	RESÍDUOS ORGÂNICOS ÚMIDOS.....	- 19 -
5.2.	COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E IMPACTO EXERGÉTICO	- 19 -
5.3.	VARIABILIDADE, SAZONALIDADE E DESAFIOS OPERACIONAIS	- 20 -
6.	BIODIESEL DE SEGUNDA GERAÇÃO.....	- 22 -
6.1.	ANÁLISE EXERGÉTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SEGUNDA GERAÇÃO.....	- 24 -
6.1.1.	PRÉ-TRATAMENTO	- 25 -
6.1.2.	EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIPÍDIOS.....	- 26 -
6.1.3.	TRANSESTERIFICAÇÃO.....	- 26 -
6.1.4.	PURIFICAÇÃO.....	- 27 -
6.1.5.	DESAFIOS DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL	- 28 -
7.	EXERGIA E SUSTENTABILIDADE	- 29 -
7.1.	EXERGIA COMO INDICADOR DE SUSTENTABILIDADE EM SISTEMAS BIOENERGÉTICOS- 29 -	
7.2.	ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	- 30 -
7.3.	CONTRIBUIÇÕES DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SEGUNDA GERAÇÃO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	- 30 -
7.4.	EXERGIA COMO INDICADOR QUANTITATIVO DE SUSTENTABILIDADE	- 31 -
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	- 34 -
9.	REFERÊNCIAS	- 36 -

Resumo

MELO, Eduane Tavares de. **Estudo Exergético sobre o Aproveitamento de Resíduos Sólidos Agroindustriais para a Produção de Biodiesel de Segunda Geração**. Trabalho de Curso de Bacharelado de Engenharia Química. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada, a aplicação dos conceitos de exergia e da análise exergética no aproveitamento de resíduos sólidos agroindustriais para a produção de biodiesel de segunda geração, com ênfase na avaliação do desempenho termodinâmico e da sustentabilidade dos processos envolvidos. A metodologia adotada baseou-se na análise crítica de livros clássicos de Termodinâmica e artigos científicos nacionais e internacionais que abordam a exergia, seus componentes, indicadores de desempenho e aplicações em sistemas bioenergéticos. Os resultados evidenciaram que resíduos agroindustriais apresentam elevado conteúdo de exergia química, frequentemente superior a 90% do seu conteúdo energético, o que os caracteriza como matérias-primas estratégicas para a produção de biocombustíveis. Observou-se que as principais destruições de exergia ocorrem nas etapas de pré-tratamento, extração de lipídios e purificação do biodiesel, devido às irreversibilidades associadas a transferências de calor, separações físico-químicas e reações químicas afastadas do equilíbrio. A análise exergética mostrou-se superior à análise energética convencional ao permitir a identificação de perdas reais de potencial de trabalho útil e ao estabelecer relações diretas entre eficiência, uso de recursos naturais e impactos ambientais. Conclui-se que a exergia constitui um indicador quantitativo consistente de sustentabilidade e uma ferramenta essencial para a avaliação e otimização de rotas tecnológicas voltadas à produção de biodiesel de segunda geração a partir de resíduos sólidos agroindustriais, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais eficientes e alinhados às metas globais de transição energética.

Palavras-chave: Exergia; Biodiesel de segunda geração; Resíduos sólidos agroindustriais; Sustentabilidade.

Abstract

MELO, Eduane Tavares de. Exergy Study on the Use of Agro-industrial Solid Waste for the Production of Second Generation Biodiesel. Bachelor's Degree in Chemical Engineering. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

This study aimed to analyze, through a systematic literature review, the application of exergy concepts and exergy analysis in the utilization of agro-industrial solid waste for the production of second-generation biodiesel, with emphasis on the evaluation of the thermodynamic performance and sustainability of the processes involved. The methodology adopted was based on a critical analysis of classic Thermodynamics textbooks and national and international scientific articles that address exergy, its components, performance indicators, and applications in bioenergy systems. The results showed that agro-industrial waste has a high chemical exergy content, frequently exceeding 90% of its energy content, which characterizes it as a strategic raw material for biofuel production. It was observed that the main exergy destructions occur in the pretreatment, lipid extraction, and biodiesel purification stages, due to irreversibilities associated with heat transfers, physicochemical separations, and chemical reactions far from equilibrium. Exergy analysis proved superior to conventional energy analysis by allowing the identification of real losses in useful work potential and by establishing direct relationships between efficiency, use of natural resources, and environmental impacts. It is concluded that exergy constitutes a consistent quantitative indicator of sustainability and an essential tool for evaluating and optimizing technological routes aimed at producing second-generation biodiesel from agro-industrial solid waste, contributing to the development of more efficient energy systems aligned with global energy transition goals.

Keywords: Exergy; Second-generation biodiesel; Agro-industrial solid waste; Sustainability.

2. INTRODUÇÃO

O cenário energético mundial tem sido marcado, nas últimas décadas, por uma crescente demanda por energia, impulsionada pelo aumento populacional, pela expansão industrial e pela intensificação das atividades agrícolas e agroindustriais. Paralelamente, o uso predominante de combustíveis fósseis tem provocado impactos ambientais significativos, tais como a intensificação das emissões de gases de efeito estufa, a degradação de ecossistemas e a redução da disponibilidade de recursos naturais não renováveis. Diante desse contexto, a transição para matrizes energéticas mais sustentáveis tornou-se uma necessidade estratégica, estimulando o desenvolvimento de fontes renováveis de energia que conciliem eficiência técnica, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental.

Entre as alternativas energéticas renováveis, os biocombustíveis destacam-se por sua capacidade de substituir parcialmente os combustíveis fósseis no setor de transportes, além de apresentarem potencial de reduzir as emissões de poluentes atmosféricos. O biodiesel, em particular, tem sido amplamente estudado e aplicado devido à sua compatibilidade com motores do ciclo Diesel e à possibilidade de utilização de diversas matérias-primas de origem biológica. No entanto, a produção tradicional de biodiesel, classificada como de primeira geração, baseia-se majoritariamente no uso de óleos vegetais comestíveis, como óleo de soja, palma ou canola, o que gera preocupações relacionadas à competição com a produção de alimentos, ao uso intensivo da terra e à sustentabilidade de longo prazo desses sistemas produtivos.

Nesse sentido, o biodiesel de segunda geração surge como uma alternativa promissora e adequada, uma vez que se fundamenta no aproveitamento de resíduos sólidos agroindustriais e biomassas não alimentícias. Esses resíduos, provenientes de cadeias produtivas agrícolas, agroindustriais e alimentícias, incluem óleos residuais, tortas oleaginosas, bagaços, palhas, cascas e outros materiais ricos em compostos orgânicos e lignocelulósicos. Segundo Sikiru et al. (2024), a valorização energética desses resíduos representa uma estratégia alinhada aos princípios da economia circular, pois permite simultaneamente a mitigação de passivos ambientais e a geração de energia renovável.

A conversão de resíduos sólidos agroindustriais em biodiesel de segunda geração envolve um conjunto de processos físico-químicos, e, em alguns casos, bioquímicos, que apresentam uma complexidade termodinâmica. Etapas como pré-tratamento da biomassa, extração de lipídios, reações de transesterificação, separações de fases e purificação do produto demandam significativo aporte energético e estão associadas a diferentes níveis de irreversibilidade. Tradicionalmente, a avaliação desses processos tem sido realizada por meio

da análise energética, fundamentada na Primeira Lei da Termodinâmica, a qual se limita à quantificar as trocas de energia, sem considerar a qualidade dessa energia nem as perdas associadas ao sistema.

Diante das limitações da análise energética convencional, a análise exergética, baseada na Segunda Lei da Termodinâmica, tem se consolidado como uma ferramenta mais abrangente para a avaliação de processos de conversão de energia e matéria. A exergia é definida como o máximo trabalho útil que pode ser obtido quando um sistema é levado, de forma reversível, ao equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente de referência. Dessa forma, a exergia permite quantificar não apenas a quantidade de energia disponível, mas também sua capacidade real de realização de trabalho útil, incorporando os efeitos das irreversibilidades inerentes aos processos reais.

A aplicação da análise exergética em sistemas de bioenergia tem sido amplamente discutida na literatura científica, especialmente em estudos voltados à produção de biocombustíveis e à valorização energética de resíduos. Velásquez-Arredondo, Oliveira Junior e Benjumea (2012) destacam que a análise exergética possibilita a identificação das principais fontes de destruição de exergia em processos químicos e bioquímicos, como reações de hidrólise, fermentação e transesterificação, fornecendo subsídios técnicos para a otimização desses sistemas. Os autores demonstram que processos com elevada eficiência energética podem, ainda assim, apresentar baixos desempenhos exergéticos, evidenciando a importância da abordagem baseada na Segunda Lei da Termodinâmica.

No contexto de sistemas integrados de aproveitamento de resíduos agroindustriais, Ogorure et al. (2018) realizaram uma análise energética e exergética de uma planta de geração de energia a partir de resíduos agrícolas, evidenciando que as maiores taxas de destruição de exergia ocorrem em unidades associadas a processos de combustão e conversão termoquímica. Os resultados apresentados pelos autores reforçam a relevância da análise exergética como ferramenta para identificar gargalos termodinâmicos e propor melhorias no desempenho global de sistemas complexos de conversão de biomassa.

De forma semelhante, Khounani et al. (2021) aplicaram a análise exergética a uma biorrefinaria de cultura integral voltada à produção simultânea de biodiesel, bioetanol e outros coprodutos a partir de biomassa agrícola. Os autores identificaram que unidades como o tratamento de efluentes e os processos de pré-tratamento da biomassa concentram parcelas significativas da destruição de exergia total do sistema, demonstrando que a eficiência exergética global está fortemente associada à integração adequada das etapas de processo. Esses resultados evidenciam o potencial da análise exergética como ferramenta de apoio à tomada de

decisão em projetos de biorrefinarias e sistemas de produção de biocombustíveis de segunda geração.

Além de sua relevância técnica, a exergia tem sido amplamente reconhecida como um indicador consistente de sustentabilidade, ao estabelecer relações diretas entre eficiência termodinâmica, impactos ambientais e uso racional de recursos naturais. A destruição de exergia está associada não apenas a perdas energéticas, mas também ao consumo irreversível de recursos e à geração de impactos ambientais, o que torna a análise exergética particularmente adequada para estudos que envolvem resíduos e sustentabilidade. Nesse sentido, Sikiru et al. (2024) ressaltam que a integração de abordagens exergéticas em estudos de bioenergia contribui para uma avaliação mais realista do desempenho ambiental e energético de sistemas baseados em resíduos agroindustriais.

Diante do exposto, o estudo exergético do aproveitamento de resíduos sólidos agroindustriais para a produção de biodiesel de segunda geração apresenta ser relevante científica e tecnologicamente, especialmente no âmbito da Engenharia Química. A realização de uma revisão bibliográfica abrangente sobre os fundamentos da exergia, seus indicadores e sua aplicação em processos de conversão de biomassa permitem consolidar o estado da arte, identificar desafios técnicos e apontar oportunidades de melhoria na eficiência e sustentabilidade desses sistemas. Assim, este trabalho busca contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre o tema, fornecendo uma base teórica sólida para o desenvolvimento de processos mais eficientes, sustentáveis e alinhados às demandas energéticas e ambientais contemporâneas.

3. OBJETIVOS

Analisar, por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada, a aplicação dos conceitos de exergia no aproveitamento de resíduos sólidos agroindustriais para a produção de biodiesel de segunda geração, com ênfase na identificação das principais irreversibilidades, destruições de exergia e no desempenho termodinâmico e sustentável dos processos envolvidos.

4. FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA SOBRE EXERGIA

Tradicionalmente, os estudos termodinâmicos concentram-se na aplicação da Primeira e da Segunda Leis da Termodinâmica, as quais permitem avaliar, respectivamente, a conservação da energia e a direção natural dos processos. No entanto, a aplicação isolada da

Primeira Lei limita-se à quantificação das trocas energéticas, não sendo capaz de fornecer informações acerca da qualidade da energia envolvida nem do potencial real de conversão em trabalho útil (ÇENGEL; BOLES, 2015).

A necessidade de avaliar não apenas a quantidade, mas também a qualidade da energia, levou ao desenvolvimento do conceito de exergia, fundamentado na Segunda Lei da Termodinâmica. A análise exergética amplia a compreensão do desempenho real de sistemas térmicos, químicos e bioenergéticos, permitindo identificar irreversibilidades e oportunidades de melhoria nos processos.

4.1. 1ª LEI E 2ª LEI DA TERMODINÂMICA

A Primeira Lei da Termodinâmica expressa o princípio da conservação da energia e pode ser formulada, para sistemas fechados, como:

$$\Delta E = Q - W \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

ΔE - Variação da energia total do sistema;

Q - Calor transferido;

W - Trabalho realizado pelo sistema.

Para sistemas abertos em regime permanente, como reatores, trocadores de calor e colunas de separação, a equação assume a forma:

$$\sum \dot{m}_{in} e_{in} - \sum \dot{m}_{out} e_{out} + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

Embora essa abordagem seja essencial para o balanço energético de processos industriais, ela não distingue entre formas de energia com diferentes capacidades de realização de trabalho. Por exemplo, uma quantidade de energia térmica disponível a baixa temperatura possui menor potencial de conversão em trabalho útil do que a mesma quantidade de energia disponível a alta temperatura. Essa limitação torna a análise energética insuficiente para avaliações mais profundas de eficiência e sustentabilidade (MORAN; SHAPIRO, 2014).

A Segunda Lei da Termodinâmica introduz o conceito de entropia, estabelecendo que todo processo real é acompanhado pela geração de entropia, associada às irreversibilidades do sistema. Para um sistema fechado, a variação de entropia pode ser expressa como:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{gen} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

- $S_{gen} \geq 0$ - Representa a entropia gerada devido às irreversibilidades.

As irreversibilidades estão associadas a fenômenos como:

- Transferência de calor com diferença finita de temperatura;
- Atrito;
- Mistura de substâncias;
- Reações químicas não ideais;
- Dissipação viscosa.

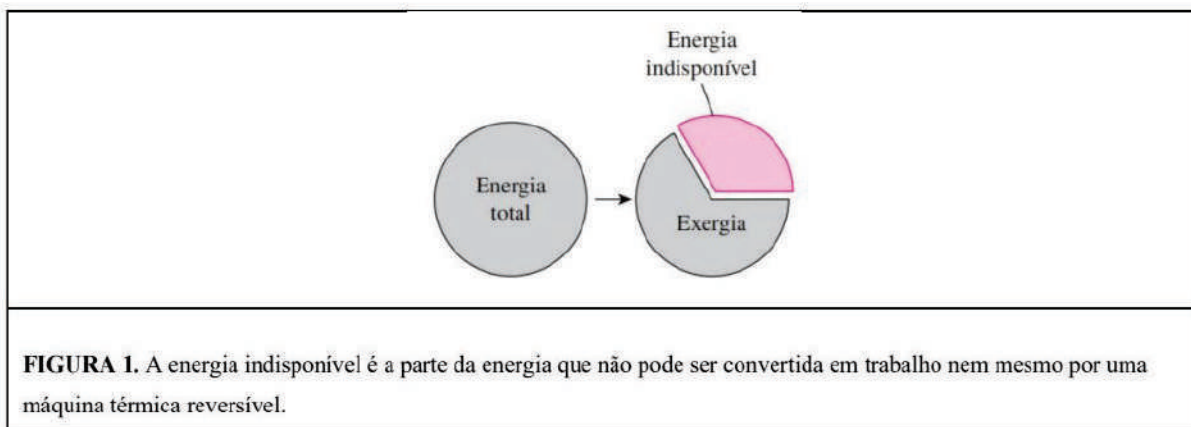
Segundo Çengel e Boles (2015), a entropia fornece uma medida da irreversibilidade, mas não quantifica diretamente a perda de potencial de trabalho útil. É justamente nesse ponto que o conceito de exergia se torna essencial.

A exergia é definida como o máximo trabalho útil que pode ser obtido quando um sistema é levado, de forma reversível, do seu estado inicial até o equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente de referência, denominado estado morto (MORAN; SHAPIRO, 2014). Diferentemente da energia, a exergia não é conservada: ela pode ser destruída devido às irreversibilidades dos processos. Essa destruição está diretamente relacionada à geração de entropia, conforme a expressão fundamental da análise exergética:

$$E_{dest} = T_0 S_{gen} \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

- E_{dest} - É a exergia destruída;
- T_0 - É a temperatura do meio ambiente de referência;
- S_{gen} - É a entropia gerada no processo.



5. ANÁLISE EXERGÉTICA: METODOLOGIA E INDICADORES

A análise exergética constitui uma ferramenta avançada da Termodinâmica aplicada, fundamentada na Primeira e na Segunda Leis, cuja finalidade é avaliar o desempenho real de sistemas energéticos e industriais por meio da quantificação da qualidade da energia e da matéria envolvidas nos processos. Diferentemente da análise energética convencional, a análise exergética permite identificar irreversibilidades, perdas de potencial de trabalho útil e oportunidades de otimização dos sistemas (KOTAS, 2013).

Segundo Moran e Shapiro (2014), a análise exergética baseia-se na comparação entre o estado termodinâmico de um sistema e um ambiente de referência, possibilitando quantificar a exergia associada às correntes de matéria, calor e trabalho. Essa abordagem torna-se particularmente relevante em sistemas complexos, como aqueles que envolvem múltiplas etapas de conversão e separação, nos quais a simples conservação de energia não fornece informações suficientes sobre a eficiência global do processo.

5.1. DEFINIÇÃO DO AMBIENTE DE REFERÊNCIA

A definição do ambiente de referência é uma etapa fundamental da análise exergética, pois todos os cálculos de exergia são realizados em relação a um estado de equilíbrio térmico, mecânico e químico com o meio ambiente. De forma geral, o ambiente de referência é caracterizado por temperatura, pressão e composição química constantes, frequentemente adotadas como $T_0 = 298 \text{ K}$ e $p_0 = 1 \text{ atm}$, com composição atmosférica padrão (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988).

A escolha adequada do ambiente de referência é crucial, uma vez que variações nesses parâmetros podem influenciar significativamente os valores calculados de exergia, especialmente a exergia química de sistemas multicomponentes, como biomassa e resíduos agroindustriais.

5.2. COMPONENTES DA EXERGIA

A exergia total associada a um sistema pode ser decomposta em diferentes parcelas, conforme descrito por Çengel e Boles (2015):

- **Exergia física:** associada às diferenças de temperatura e pressão entre o sistema e o ambiente;
- **Exergia química:** relacionada à diferença de composição química em relação ao ambiente de referência;
- **Exergia cinética:** associada à velocidade do sistema;
- **Exergia potencial:** relacionada à posição em um campo gravitacional.

Em análises de processos químicos e energéticos, as contribuições cinética e potencial são frequentemente desprezadas, enquanto a exergia física e química assumem papel predominante.

5.2.1. INDICADORES EXERGÉTICOS DE DESEMPENHO

Com base no balanço de exergia, diversos indicadores podem ser definidos para avaliar o desempenho dos sistemas energéticos. Entre os principais indicadores exergéticos utilizados na literatura, destacam-se:

- **Eficiência exergética** - A eficiência exergética (η_{ex}) é definida como a razão entre a exergia do produto útil e a exergia total fornecida ao sistema:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Ex}_{produto}}{\dot{Ex}_{entrada}} \quad (\text{Equação 5})$$

Esse indicador expressa o quão eficientemente um sistema converte os recursos disponíveis em trabalho útil ou produto de interesse.

- **Destruição de exergia específica** - A destruição de exergia específica ($Ex_{dest,esp}$) corresponde à exergia destruída por unidade de produto gerado, sendo um indicador relevante para a comparação entre diferentes rotas tecnológicas:

$$Ex_{dest,esp} = \frac{Ex_{destruída}}{\dot{m}_{produto}} \quad (\text{Equação 6})$$

Valores elevados indicam processos com alto grau de irreversibilidade e menor eficiência termodinâmica.

- **Grau de irreversibilidade** - O grau de irreversibilidade (I) pode ser definido como a fração da exergia de entrada que é destruída ao longo do processo:

$$I = \frac{Ex_{destruída}}{Ex_{entrada}} \quad (\text{Equação 7})$$

Esse indicador permite identificar quais etapas do processo contribuem de forma mais significativa para as perdas exergéticas.

5.2.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EXERGÉTICA EM SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

A análise exergética tem sido amplamente empregada na avaliação de sistemas bioenergéticos devido à sua capacidade de identificar perdas termodinâmicas e quantificar o aproveitamento efetivo dos recursos disponíveis. Em processos de conversão de biomassa, a metodologia permite avaliar não apenas a quantidade de energia gerada, mas também sua qualidade e potencial de realização de trabalho útil, tornando-se uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes (RAHMANI et al., 2021).

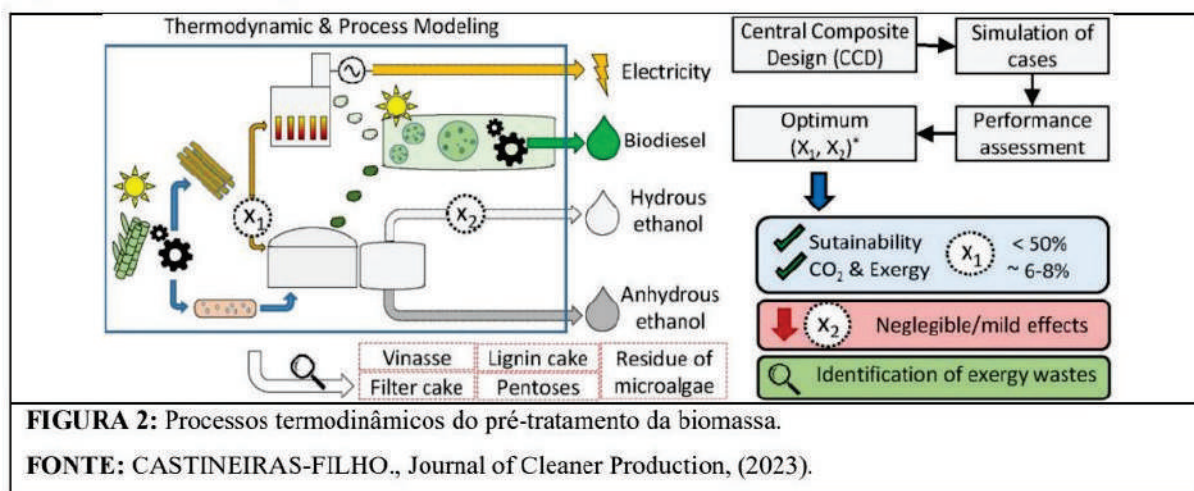
Nos últimos anos, diversos estudos têm aplicado a análise exergética em biorrefinarias e sistemas de aproveitamento de resíduos agroindustriais, buscando otimizar a produção de biocombustíveis e reduzir desperdícios energéticos. NAIR et al. (2022) destacam que a utilização de resíduos agrícolas e agroindustriais representa uma alternativa estratégica para ampliar a oferta de energia renovável sem competir diretamente com a produção de alimentos, contribuindo simultaneamente para a redução de passivos ambientais.

A aplicação da metodologia exergética é particularmente relevante em países com forte vocação agrícola, como o Brasil, onde grandes quantidades de resíduos são geradas anualmente pelas cadeias produtivas da cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e algodão. Estudos conduzidos em sistemas sucroenergéticos demonstram que a integração entre produção de etanol, cogeração de energia e aproveitamento de resíduos permite aumentar significativamente a eficiência global dos processos, reduzindo perdas exergéticas e melhorando o aproveitamento da biomassa disponível (PÉREZ-ALMADA et al., 2023).

Em plantas de produção de biodiesel de segunda geração, a análise exergética também tem sido utilizada para comparar diferentes rotas tecnológicas de conversão de resíduos

oleaginosos, óleos residuais e biomassas lignocelulósicas. Segundo BATTLE et al. (2022), a identificação das etapas responsáveis pelas maiores destruições de exergia possibilita direcionar investimentos para melhorias operacionais, aumentando a eficiência dos processos e reduzindo os custos de produção.

Outro aspecto relevante refere-se à avaliação das etapas de pré-tratamento da biomassa. Operações como secagem, moagem, hidrólise e extração frequentemente representam os maiores pontos de irreversibilidade dos sistemas bioenergéticos, sendo responsáveis por perdas significativas de exergia.



Nesse contexto, a metodologia exérgica fornece informações importantes para o desenvolvimento de processos mais eficientes e para a seleção das melhores tecnologias disponíveis (MOHAMMADI; MCGOUGH; ROSEN, 2020).

A integração de processos em biorrefinarias tem demonstrado potencial para elevar significativamente a eficiência exérgica dos sistemas bioenergéticos. Estudos conduzidos em usinas sucroenergéticas brasileiras verificaram que o aproveitamento simultâneo de coprodutos, como eletricidade, biofertilizantes e biomassa residual, pode elevar a eficiência exérgica global para valores próximos de 60%, reduzindo perdas termodinâmicas e aumentando a sustentabilidade dos processos produtivos (CASTINEIRAS-FILHO et al., 2023).

Dessa forma, a análise exérgica tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para o planejamento e otimização de sistemas bioenergéticos, permitindo aumentar a eficiência na utilização dos recursos naturais e fortalecer a viabilidade técnica e econômica da produção de biocombustíveis avançados.

5.2.3. RELEVÂNCIA DA ANÁLISE EXERGÉTICA PARA ESTUDOS DE SUSTENTABILIDADE

A crescente necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa e promover o uso racional dos recursos naturais tem ampliado a importância da análise exergética em estudos de sustentabilidade. Diferentemente dos indicadores energéticos convencionais, a exergia permite avaliar a degradação da qualidade energética ao longo dos processos produtivos, fornecendo informações mais consistentes sobre o consumo efetivo dos recursos naturais (RAHMANI et al., 2021).

Atualmente, a análise exergética é considerada uma ferramenta complementar à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), permitindo integrar aspectos ambientais, energéticos e econômicos em uma única abordagem de análise. Segundo Pérez-Almada et al. (2023), a combinação dessas metodologias tem sido amplamente utilizada para avaliar sistemas bioenergéticos e biorrefinarias, proporcionando uma visão mais abrangente da sustentabilidade dos processos.

Casos observados na União Europeia, Estados Unidos e Brasil demonstram que indicadores exergéticos vêm sendo utilizados para apoiar decisões relacionadas ao aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, produção de biocombustíveis avançados e implementação de biorrefinarias integradas. Essas iniciativas têm contribuído para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, aumentar a eficiência dos sistemas produtivos e promover a valorização de resíduos agroindustriais (YONG et al., 2022).

Além disso, a utilização da exergia como indicador de sustentabilidade permite avaliar simultaneamente o desempenho ambiental e termodinâmico dos processos, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à transição energética. Essa abordagem tem se mostrado especialmente relevante em sistemas de produção de biodiesel de segunda geração, nos quais a maximização do aproveitamento dos resíduos constitui um dos principais objetivos tecnológicos e ambientais (PÉREZ-ALMADA et al., 2023).

Portanto, a análise exergética representa uma ferramenta fundamental para a construção de sistemas bioenergéticos mais sustentáveis, eficientes e alinhados aos princípios da economia circular, contribuindo para a valorização de resíduos agroindustriais e para a promoção de modelos produtivos de baixo impacto ambiental.

6. RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS COMO MATÉRIA-PRIMA

Os resíduos sólidos agroindustriais constituem uma classe heterogênea de materiais gerados ao longo das cadeias produtivas agrícolas e agroindustriais, abrangendo desde resíduos do beneficiamento de grãos até subprodutos da indústria de alimentos, óleos vegetais e biocombustíveis. Tradicionalmente tratados como rejeitos, esses materiais vêm sendo progressivamente reconhecidos como matérias-primas estratégicas, devido ao seu elevado conteúdo orgânico, disponibilidade contínua e significativo potencial energético e exergético.

Do ponto de vista da Engenharia Química, a valorização desses resíduos requer uma compreensão detalhada de suas propriedades físico-químicas, composição elementar e comportamento termodinâmico, aspectos essenciais para sua integração eficiente em rotas de conversão energética.

Agro-industrial residues and biomass wastes are increasingly recognized as valuable resources rather than disposal materials, due to their high organic content, wide availability and significant energy and exergy potential, which make them suitable feedstocks for advanced biofuel and energy conversion systems.(AL-HAMAMRE et al., 2024).

6.1. CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos sólidos agroindustriais constituem uma categoria ampla e diversificada de materiais gerados durante as etapas de produção, processamento, armazenamento e comercialização de produtos agrícolas e agroindustriais. Historicamente tratados como passivos ambientais, esses resíduos passaram a ser reconhecidos como recursos estratégicos devido ao seu potencial para geração de energia, produção de biocombustíveis, recuperação de compostos de alto valor agregado e aplicação em sistemas de economia circular (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e a necessidade de reduzir os impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas para sua valorização energética. Nesse contexto, a caracterização físico-química dos resíduos torna-se fundamental para a seleção das rotas tecnológicas mais adequadas de conversão, incluindo processos termoquímicos, físico-químicos e biológicos (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

Do ponto de vista energético e exergético, os resíduos agroindustriais podem ser agrupados em três grandes categorias: resíduos lignocelulósicos, resíduos oleaginosos e

resíduos orgânicos úmidos. Cada grupo apresenta características específicas relacionadas à composição química, teor de umidade, densidade energética e potencial de aproveitamento tecnológico.

6.1.1. RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

Os resíduos lignocelulósicos representam a maior fração da biomassa residual produzida mundialmente e incluem materiais provenientes de atividades agrícolas, florestais e agroindustriais, tais como bagaço e palha de cana-de-açúcar, palha de milho, sabugo de milho, casca de arroz, casca de café, resíduos de algodão, serragem e resíduos madeireiros (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

A estrutura desses materiais é composta predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, formando uma matriz complexa responsável por sua elevada resistência mecânica e estabilidade química. Em geral, a biomassa lignocelulósica apresenta teores de celulose variando entre 35 e 50%, hemicelulose entre 20 e 35% e lignina entre 10 e 30%, dependendo da espécie vegetal e das condições de cultivo (AL-HAMAMRE et al., 2024).

Do ponto de vista exergético, esses resíduos apresentam elevado potencial para geração de energia devido à sua alta concentração de carbono estrutural. A exergia química específica da biomassa lignocelulósica seca normalmente varia entre 18 e 25 MJ·kg⁻¹, podendo atingir valores superiores em materiais com maior teor de lignina, componente que apresenta maior estabilidade termodinâmica e maior conteúdo energético (AL-HAMAMRE et al., 2024).

No Brasil, os principais exemplos dessa categoria são o bagaço e a palha de cana-de-açúcar. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a cadeia sucroenergética gera anualmente milhões de toneladas desses resíduos, os quais vêm sendo amplamente utilizados para cogeração de eletricidade, produção de etanol de segunda geração, biogás, biochar e outros bioprodutos de elevado valor agregado (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2018).

Além do aproveitamento energético, a biomassa lignocelulósica desempenha papel estratégico na transição para uma bioeconomia sustentável, uma vez que sua utilização reduz a dependência de combustíveis fósseis e contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

6.1.2. RESÍDUOS OLEAGINOSOS

Incluem tortas e farelos provenientes da extração de óleos vegetais, como soja, algodão, girassol e palma, além de resíduos da indústria alimentícia rica em lipídios. Esses resíduos caracterizam-se por elevado teor de lipídios residuais (5–20%), proteínas e carboidratos.

Devido à alta densidade energética dos lipídios, resíduos oleaginosos apresentam exergia química específica entre 20 e 30 MJ·kg⁻¹, podendo superar a de biomassas lignocelulósicas secas, o que os torna particularmente atrativos para a produção de biocombustíveis líquidos (DINCER; ROSEN, 2013).

6.1.3. RESÍDUOS ORGÂNICOS ÚMIDOS

Devido ao elevado teor de água, a exergia química específica desses resíduos geralmente varia entre 8 e 15 MJ·kg⁻¹. Entretanto, quando submetidos a tecnologias adequadas de recuperação energética, podem gerar quantidades significativas de energia renovável e contribuir para a redução de passivos ambientais associados ao descarte inadequado (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

A utilização desses resíduos em sistemas integrados de biorrefinarias tem sido considerada uma estratégia promissora para promover a economia circular. Nesse modelo, materiais anteriormente destinados a aterros ou lagoas de estabilização passam a ser convertidos em biocombustíveis, fertilizantes orgânicos e energia renovável, aumentando a eficiência global dos sistemas produtivos e reduzindo impactos ambientais.

Dessa forma, os resíduos orgânicos úmidos assumem papel relevante no contexto da sustentabilidade e da bioeconomia, contribuindo para o aproveitamento integral dos recursos disponíveis e para a diversificação das fontes renováveis de energia.

6.2. COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E IMPACTO EXERGÉTICO

A composição elementar dos resíduos sólidos agroindustriais — expressa em termos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre — exerce influência direta sobre seu conteúdo de exergia química. Resíduos com maior razão H/C e menor teor de oxigênio tendem a apresentar maior exergia, conforme discutido por Kotas (2013).

Do ponto de vista termodinâmico, a exergia química está relacionada ao potencial máximo de realização de trabalho útil a partir da composição química de uma substância quando esta é levada ao equilíbrio com o ambiente de referência. Assim, resíduos com maiores teores

de carbono e hidrogênio tendem a apresentar valores mais elevados de exergia química, uma vez que esses elementos possuem maior potencial de oxidação e liberação de energia durante processos de conversão (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

Por outro lado, elevados teores de oxigênio reduzem a densidade energética dos resíduos. Isso ocorre porque a biomassa já se encontra parcialmente oxidada quando comparada aos combustíveis fósseis, resultando em menor disponibilidade de energia química para transformação em trabalho útil. Apesar dessa limitação, os resíduos agroindustriais apresentam vantagens ambientais significativas devido ao seu caráter renovável e ao potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

A composição elementar também influencia diretamente as rotas tecnológicas de conversão. Resíduos lignocelulósicos, por exemplo, apresentam elevados teores de carbono estrutural associados à celulose, hemicelulose e lignina, favorecendo processos termoquímicos como combustão, gaseificação e pirólise. Já resíduos oleaginosos apresentam maiores concentrações de hidrogênio e lipídios, tornando-se matérias-primas particularmente adequadas para a produção de biodiesel e outros biocombustíveis líquidos (AL-HAMAMRE et al., 2024).

Além disso, a determinação da composição elementar é fundamental para a realização de balanços exergéticos em sistemas bioenergéticos. A caracterização detalhada da biomassa permite estimar com maior precisão seu potencial energético, avaliar a eficiência das rotas de conversão e identificar oportunidades de otimização tecnológica. Em sistemas de biorrefinaria, informações relacionadas ao teor de carbono, hidrogênio, oxigênio e lignina são essenciais para o dimensionamento de processos e para a avaliação do desempenho termodinâmico global das unidades de conversão (RABELO et al., 2023).

No contexto das biorrefinarias modernas, a análise conjunta da composição elementar e da exergia química tem sido amplamente utilizada para selecionar matérias-primas mais eficientes e desenvolver estratégias de aproveitamento integral dos resíduos agroindustriais. Dessa forma, a caracterização química deixa de ser apenas uma etapa laboratorial e passa a representar uma ferramenta estratégica para o planejamento de sistemas energéticos mais sustentáveis e economicamente viáveis.

6.3. VARIABILIDADE, SAZONALIDADE E DESAFIOS OPERACIONAIS

Embora os resíduos agroindustriais apresentem elevado potencial para geração de energia e biocombustíveis, sua utilização em escala industrial está associada a desafios relacionados à variabilidade da matéria-prima. Diferentemente dos combustíveis fósseis, que

possuem composição relativamente homogênea, os resíduos agroindustriais apresentam características físico-químicas que podem variar significativamente em função da espécie vegetal, condições climáticas, práticas agrícolas, localização geográfica, métodos de colheita e processamento industrial (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

A sazonalidade da produção agrícola representa um dos principais fatores que afetam a disponibilidade desses resíduos ao longo do ano. No Brasil, por exemplo, a geração de bagaço e palha de cana-de-açúcar está diretamente vinculada ao período de safra da cultura, enquanto resíduos provenientes da soja, milho e algodão acompanham os respectivos ciclos produtivos. Essa característica pode ocasionar flutuações no fornecimento de biomassa, exigindo estratégias de armazenamento, logística e planejamento operacional para garantir a continuidade dos processos industriais (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2018).

Do ponto de vista exergético, as variações na composição química e no teor de umidade impactam diretamente a quantidade de energia útil disponível nos resíduos. Biomassas com maior teor de umidade apresentam menor exergia específica, pois parte significativa da energia do sistema é consumida na evaporação da água durante os processos de conversão energética. Consequentemente, a eficiência global do processo tende a ser reduzida quando não são adotadas etapas adequadas de pré-tratamento ou secagem (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

Outro aspecto relevante refere-se à heterogeneidade estrutural dos resíduos. Diferenças na granulometria, densidade aparente e composição química podem comprometer o desempenho de equipamentos industriais, dificultar a transferência de calor e massa e aumentar as irreversibilidades termodinâmicas ao longo das etapas de processamento. Dessa forma, a variabilidade da matéria-prima constitui um dos principais fatores responsáveis pela redução da eficiência exergética observada em diversas rotas de conversão de biomassa (MORAN; SHAPIRO, 2014).

Casos reais observados em biorrefinarias de etanol de segunda geração evidenciam que a variabilidade da composição do bagaço e da palha de cana pode afetar significativamente o rendimento da hidrólise enzimática e da fermentação, influenciando diretamente a produção de biocombustíveis. Situação semelhante ocorre em plantas de biodiesel que utilizam resíduos oleaginosos, onde diferenças no teor de ácidos graxos livres podem impactar o rendimento da transesterificação e aumentar o consumo de insumos químicos (IEA BIOENERGY, 2023).

Diante desses desafios, estratégias como padronização da matéria-prima, monitoramento contínuo da qualidade dos resíduos, integração energética, pré-tratamentos físicos e químicos e utilização de sistemas de controle avançados têm sido amplamente empregadas para reduzir as perdas exergéticas e aumentar a confiabilidade operacional dos

sistemas bioenergéticos. Essas medidas contribuem para melhorar a eficiência dos processos e ampliar a competitividade dos biocombustíveis produzidos a partir de resíduos agroindustriais.

Além das variações sazonais e da heterogeneidade físico-química, a logística de coleta e transporte representa um desafio relevante para o aproveitamento energético dos resíduos agroindustriais. Biomassas com elevada umidade e baixa densidade energética demandam maiores custos de transporte e armazenamento, podendo comprometer a viabilidade econômica de determinadas rotas de conversão. Dessa forma, estratégias como compactação, secagem, peletização e implantação de unidades de processamento próximas às fontes geradoras têm sido adotadas para aumentar a eficiência operacional e reduzir perdas energéticas ao longo da cadeia logística (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022; AL-HAMAMRE et al., 2024).

Portanto, compreender a variabilidade e a sazonalidade dos resíduos não é apenas uma questão operacional, mas um requisito fundamental para a implementação de sistemas bioenergéticos sustentáveis, capazes de maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis e minimizar os impactos ambientais associados à geração de energia.

7. BIODIESEL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Os biocombustíveis podem ser classificados em diferentes gerações de acordo com a natureza da matéria-prima utilizada e com o grau de desenvolvimento tecnológico dos processos de conversão. Essa classificação permite avaliar aspectos relacionados à sustentabilidade, eficiência produtiva, disponibilidade de recursos e impactos ambientais associados à produção energética.

Os biocombustíveis de primeira geração são produzidos a partir de matérias-primas convencionais, incluindo óleos vegetais e gorduras animais. No caso brasileiro, a soja possui papel de destaque na cadeia de biodiesel, em razão da grande escala de produção agrícola e de processamento de seu grão. Embora essas tecnologias estejam amplamente consolidadas em escala comercial, existem limitações relacionadas à competição por terras agricultáveis, ao uso de recursos naturais e à possível interferência na cadeia de produção de alimentos (ATABANI et al., 2023).

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE BIODIESEL E DISPONIBILIDADE DE MATÉRIAS-PRIMAS

A análise da produção brasileira de biodiesel deve considerar a diferença entre as rotas de primeira e de segunda geração. Na primeira geração, predominam matérias-primas

convencionais, especialmente óleos vegetais e gorduras animais, cuja transformação em biodiesel é uma tecnologia comercial consolidada. Já a segunda geração busca ampliar o aproveitamento de matérias-primas residuais, como óleos usados, gorduras residuais e resíduos agroindustriais, reduzindo a competição direta com matérias-primas destinadas à alimentação.

No Brasil, os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) evidenciam a elevada disponibilidade de matérias-primas agrícolas associadas à cadeia convencional do biodiesel. Na safra 2024/25, a produção de soja foi estimada em 171,5 milhões de toneladas, enquanto 58,6 milhões de toneladas foram destinadas ao processamento no mercado doméstico. Na safra 2025/26, a produção de soja alcançou 180,6 milhões de toneladas, e o processamento do grão foi estimado em 62,57 milhões de toneladas. Esses números demonstram a dimensão da cadeia de processamento da soja e sua relação com a oferta de óleo vegetal utilizada na produção de biodiesel.

Os dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) mostram que a produção nacional de biodiesel alcançou aproximadamente 9,1 milhões de m³ em 2024 e 9,8 milhões de m³ em 2025, indicando crescimento da atividade produtiva. É importante destacar, contudo, que as séries públicas da ANP apresentam a produção total de biodiesel e informações sobre matérias-primas, sem uma segregação nacional específica entre biodiesel de primeira e de segunda geração. Assim, para este trabalho, os dados da Conab e da ANP são utilizados para caracterizar a dimensão da produção convencional e, em seguida, discutir o potencial de diversificação associado ao aproveitamento de resíduos na segunda geração.

Nesse contexto, o biodiesel de segunda geração surge como uma alternativa tecnológica voltada ao aproveitamento de resíduos agroindustriais, subprodutos oleaginosos, óleos residuais e outras biomassas não destinadas à alimentação humana. Essa abordagem promove a valorização de resíduos, reduz impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado e contribui para a implementação dos princípios da economia circular e da bioeconomia sustentável (RASHID; SHER; HAZRAT, 2022).

Além dos benefícios ambientais, o aproveitamento de resíduos como matéria-prima permite ampliar a disponibilidade de recursos para produção de biocombustíveis sem aumentar a pressão sobre áreas agrícolas destinadas à produção de alimentos. Dessa forma, o biodiesel de segunda geração vem sendo considerado uma das principais alternativas para diversificação da matriz energética renovável e redução das emissões associadas aos combustíveis fósseis (AL-HAMAMRE et al., 2024).

Por sua vez, os biocombustíveis de terceira geração estão associados principalmente à utilização de microalgas e outros microrganismos capazes de acumular elevados teores lipídicos. Apesar do elevado potencial produtivo dessas matérias-primas, desafios relacionados aos custos operacionais, à colheita da biomassa e ao consumo energético das etapas de processamento ainda limitam sua aplicação em larga escala industrial (CHEN et al., 2023).

As rotas tecnológicas empregadas na produção de biodiesel de segunda geração dependem diretamente das características da matéria-prima utilizada. Resíduos oleosos, como óleos de fritura usados e resíduos da indústria alimentícia, podem ser convertidos por processos semelhantes aos empregados na produção convencional de biodiesel, exigindo, entretanto, etapas adicionais de purificação e adequação da matéria-prima. Já resíduos sólidos agroindustriais frequentemente requerem etapas complementares de pré-tratamento, extração de lipídios ou conversão bioquímica para obtenção de compostos adequados à produção de biocombustíveis (ATABANI et al., 2023).

Nesse cenário, a análise exergética torna-se uma ferramenta estratégica para avaliar o desempenho dessas rotas tecnológicas, permitindo identificar perdas termodinâmicas, quantificar destruições de exergia e propor melhorias capazes de aumentar a eficiência global dos processos de produção de biodiesel de segunda geração (AL-HAMAMRE et al., 2024).

7.1. ANÁLISE EXERGÉTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SEGUNDA GERAÇÃO

A produção de biodiesel de segunda geração envolve uma sequência de operações unitárias destinadas à conversão de resíduos agroindustriais em biocombustíveis líquidos com elevado valor agregado. Diferentemente do biodiesel convencional obtido a partir de óleos vegetais refinados, os processos de segunda geração necessitam de etapas adicionais de adequação da matéria-prima, em razão da heterogeneidade dos resíduos, da presença de contaminantes e da variabilidade de composição química.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA Bioenergy, 2023), a integração energética entre as operações unitárias pode elevar a eficiência exergética global dos processos de produção de biodiesel em até 25%, reduzindo simultaneamente o consumo de energia fóssil e as emissões de gases de efeito estufa.

7.1.1. PRÉ-TRATAMENTO

O pré-tratamento constitui uma das etapas mais críticas da produção de biodiesel de segunda geração, sendo responsável pela preparação da biomassa residual para as etapas subsequentes de extração e conversão química.

Dependendo da matéria-prima empregada, podem ser necessárias operações como:

- secagem;
- moagem;
- peneiramento;
- redução granulométrica;
- hidrólise;
- explosão a vapor;
- tratamento alcalino;
- tratamento ácido.

Essas operações têm como finalidade aumentar a área superficial disponível para reação, romper estruturas lignocelulósicas e facilitar o acesso aos compostos de interesse energético.

No Brasil, resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, casca de arroz e tortas oleaginosas apresentam grande potencial para aproveitamento energético, porém demandam pré-tratamentos específicos devido ao elevado teor de fibras estruturais e à presença de lignina (EMBRAPA, 2023).

Do ponto de vista exergético, o pré-tratamento é frequentemente identificado como uma das etapas de maior destruição de exergia em sistemas de produção de biocombustíveis lignocelulósicos. Isso ocorre devido ao elevado consumo de energia térmica, à utilização de reagentes químicos e às irreversibilidades associadas às transferências de calor e massa. Revisões recentes demonstram que a eficiência global dos processos bioenergéticos depende fortemente da seleção e otimização das tecnologias de pré-tratamento, uma vez que essa etapa influencia diretamente o balanço exergético das operações subsequentes (AMIRI et al., 2020).

Além disso, a umidade excessiva da biomassa reduz significativamente a exergia útil disponível, uma vez que parte considerável da energia fornecida ao sistema é consumida na evaporação da água presente no material.

7.1.2. EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIPÍDIOS

Após o pré-tratamento, procede-se à recuperação da fração lipídica presente nos resíduos agroindustriais. Essa etapa é particularmente importante quando se utilizam resíduos oleaginosos, como:

- borra de óleos vegetais;
- resíduos de fritura;
- tortas de oleaginosas;
- resíduos da indústria alimentícia;
- subprodutos do processamento de grãos.

Os métodos mais empregados incluem prensagem mecânica, extração por solventes orgânicos, extração assistida por ultrassom, micro-ondas e fluidos supercríticos.

A extração com dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂) tem se destacado como uma alternativa ambientalmente mais sustentável para a recuperação de lipídios, uma vez que reduz ou elimina o uso de solventes orgânicos tóxicos e permite a obtenção de extratos com elevada pureza. Entretanto, sua aplicação em escala industrial ainda é limitada pelos elevados custos operacionais associados às altas pressões de operação e ao consumo energético dos sistemas de compressão e recuperação do solvente (TZIMA et al., 2023).

Sob a perspectiva exergética, as maiores perdas ocorrem durante:

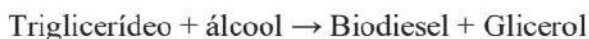
- aquecimento dos solventes;
- evaporação;
- destilação;
- recuperação de solventes.

No contexto brasileiro, resíduos provenientes das cadeias da soja, algodão, girassol e macaúba têm sido amplamente estudados como fontes alternativas de lipídios para produção de biodiesel avançado (EMBRAPA, 2023).

7.1.3. TRANSESTERIFICAÇÃO

A transesterificação corresponde à etapa central da produção de biodiesel, na qual triglicerídeos reagem com um álcool de cadeia curta, normalmente metanol ou etanol, formando ésteres graxos e glicerol.

A reação pode ser representada de forma simplificada:



No Brasil, a rota etílica tem despertado crescente interesse devido à elevada disponibilidade de etanol proveniente da cana-de-açúcar, fortalecendo a integração entre os setores sucroenergético e de biocombustíveis (EPE, 2024).

Apesar de apresentar elevado rendimento químico, a transesterificação gera irreversibilidades associadas à:

- mistura dos reagentes;
- transferência de massa;
- dissipação térmica;
- reações secundárias.

Pesquisas recentes demonstram que catalisadores heterogêneos e biocatalisadores enzimáticos têm contribuído para reduzir perdas exergéticas e simplificar etapas posteriores de purificação (ATADASHI et al., 2021).

Estudos realizados em plantas-piloto brasileiras apontam eficiências exergéticas entre 75% e 90% para a etapa de transesterificação quando as condições operacionais são adequadamente controladas (ANP, 2024).

7.1.4. PURIFICAÇÃO

Após a reação química, o biodiesel produzido necessita passar por etapas de purificação para atender às especificações estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Entre os contaminantes removidos encontram-se:

- Glicerol residual;
- Álcool excedente;
- Sabões;
- Catalisadores;
- Água;
- Impurezas sólidas.

Historicamente, a lavagem com água tem sido o método mais utilizado. Entretanto, pesquisas recentes apontam um crescimento expressivo da utilização de técnicas de purificação a seco, como adsorção em resinas e materiais minerais, reduzindo o consumo hídrico e os impactos ambientais (SILVA et al., 2023).

Sob o ponto de vista exergético, as operações de separação representam uma das maiores fontes de destruição de exergia em processos químicos, especialmente devido ao consumo energético associado às etapas de evaporação e destilação.

Segundo MORALES, (2023), a integração térmica dos sistemas de purificação pode elevar a eficiência exergética global da planta em aproximadamente 10%.

7.1.5. DESAFIOS DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL

A produção de biodiesel de segunda geração enfrenta desafios técnicos relacionados à variabilidade das matérias-primas residuais, à complexidade das rotas tecnológicas e à integração eficiente das etapas de processo.

Os principais desafios incluem:

- Variabilidade da matéria-prima;
- Elevada umidade dos resíduos;
- Sazonalidade da oferta;
- Custos logísticos;
- Necessidade de pré-tratamentos complexos;
- Eficiência limitada em algumas rotas de extração;
- Dificuldades de integração energética.

Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) indicam que a disponibilidade de resíduos agroindustriais no Brasil supera 400 milhões de toneladas anuais, evidenciando um enorme potencial para expansão da bioeconomia nacional. Entretanto, grande parte desse potencial ainda permanece subutilizada devido às limitações tecnológicas e econômicas associadas à coleta, transporte e processamento desses materiais.

Nesse contexto, a análise exergética assume papel estratégico, pois permite identificar onde ocorrem as maiores perdas de trabalho útil ao longo do processo, fornecendo subsídios para otimização energética, redução de custos operacionais e aumento da sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Estudos recentes publicados no *Journal of Cleaner Production* e na *Renewable and Sustainable Energy Reviews* demonstram que a combinação entre análise exergética, avaliação de ciclo de vida e conceitos de economia circular representa uma das principais tendências para o desenvolvimento de biorrefinarias sustentáveis baseadas em resíduos agroindustriais (CASTINEIRAS-FILHO, 2023).

8. EXERGIA E SUSTENTABILIDADE

A crescente necessidade de transição para sistemas energéticos mais sustentáveis tem impulsionado o uso da análise exergética como ferramenta complementar às avaliações energéticas convencionais. Enquanto a análise baseada apenas na Primeira Lei da Termodinâmica considera a conservação da energia, a análise exergética incorpora os efeitos da irreversibilidade dos processos, permitindo avaliar a qualidade da energia e sua capacidade efetiva de realizar trabalho útil. Dessa forma, a exergia tornou-se um importante indicador para o desenvolvimento de tecnologias de conversão de biomassa e resíduos agroindustriais em biocombustíveis, contribuindo para a identificação de gargalos operacionais, redução de desperdícios e melhoria da sustentabilidade dos sistemas produtivos (CASTINEIRAS-FILHO; PRADELLE, 2023; AMIRI et al., 2020).

Além da eficiência termodinâmica, a abordagem exergética possibilita relacionar aspectos ambientais, econômicos e energéticos em uma mesma estrutura de avaliação, favorecendo análises mais abrangentes sobre o aproveitamento de recursos renováveis e a implementação dos princípios da economia circular (MENDES et al., 2024).

8.1. EXERGIA COMO INDICADOR DE SUSTENTABILIDADE EM SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

A sustentabilidade de sistemas bioenergéticos não depende apenas da quantidade de energia produzida, mas também da eficiência com que os recursos naturais são convertidos em produtos úteis. Nesse contexto, a análise exergética tem sido amplamente utilizada como ferramenta complementar às avaliações energéticas tradicionais, pois permite quantificar as irreversibilidades dos processos e identificar pontos de desperdício de recursos ao longo da cadeia produtiva (CASTINEIRAS-FILHO; PRADELLE, 2023).

A melhoria da eficiência energética é responsável por parcela significativa das reduções de emissões necessárias para atingir as metas globais de neutralidade de carbono até 2050. Relatórios recentes destacam que o aumento da eficiência nos sistemas industriais e energéticos pode responder por mais de um terço das reduções acumuladas de emissões de gases de efeito estufa previstas nos cenários de transição energética sustentável (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024). Assim, indicadores exergéticos tornam-se ferramentas relevantes para avaliar a eficiência real dos sistemas de conversão de biomassa e resíduos em biocombustíveis.

8.2. ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

O aproveitamento de resíduos agroindustriais para produção de biocombustíveis representa uma das aplicações mais relevantes dos princípios da economia circular no setor agroenergético. Em vez de serem descartados ou destinados a aplicações de baixo valor agregado, resíduos provenientes das cadeias da soja, milho, cana-de-açúcar, algodão e agroindústrias alimentícias podem ser reinseridos em novos ciclos produtivos, contribuindo para a redução da geração de resíduos e para o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais. (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2023).

Aproximadamente um terço dos alimentos produzidos no mundo é perdido ou desperdiçado ao longo das cadeias produtivas. Parte significativa desses materiais possui elevado conteúdo energético e potencial para conversão em biocombustíveis, biogás e bioprodutos. (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2023). No Brasil, resíduos provenientes das cadeias da cana-de-açúcar, soja, milho e outras culturas agrícolas apresentam elevado potencial para geração de energia e produção de biocombustíveis avançados (EMBRAPA, 2023).

Sob a ótica exergética, resíduos agroindustriais não devem ser interpretados como rejeitos, mas como reservatórios de energia química ainda não aproveitada. A análise exergética permite demonstrar quantitativamente esse potencial ao avaliar a qualidade energética dos resíduos e sua capacidade de gerar trabalho útil em processos industriais. (IEA BIOENERGY, 2024)

8.3. CONTRIBUIÇÕES DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE SEGUNDA GERAÇÃO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A produção de biodiesel de segunda geração insere-se diretamente nas estratégias globais de descarbonização e diversificação da matriz energética. Diferentemente do biodiesel convencional obtido a partir de matérias-primas alimentícias, o biodiesel de segunda geração utiliza resíduos agroindustriais e subprodutos, reduzindo conflitos relacionados ao uso da terra e à competição com a produção de alimentos (ENERGY INSTITUTE, 2024).

Segundo a Energy Institute, o consumo global de energia continua fortemente dependente de combustíveis fósseis, o que reforça a necessidade de ampliar a participação de fontes renováveis. Nesse cenário, os biocombustíveis avançados desempenham papel

estratégico, especialmente em setores de difícil eletrificação, como transporte pesado, aviação e logística agrícola.

No contexto brasileiro, políticas públicas como o RenovaBio têm incentivado a redução da intensidade de carbono dos combustíveis por meio da valorização de matérias-primas renováveis e da ampliação da eficiência dos processos produtivos (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2024; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024). A aplicação da análise exergética nesses sistemas contribui para identificar rotas tecnológicas mais eficientes, capazes de maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis e reduzir impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos combustíveis.

Além disso, compromissos internacionais assumidos durante a COP28 reforçam a necessidade de acelerar a transição energética global por meio da expansão das energias renováveis e da melhoria da eficiência energética. (UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE, 2023).

Nesse contexto, a análise exergética oferece uma base quantitativa robusta para avaliar o desempenho de tecnologias de conversão de resíduos em biocombustíveis, contribuindo para decisões mais alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

8.4. EXERGIA COMO INDICADOR QUANTITATIVO DE SUSTENTABILIDADE

Dincer e Rosen (2013) propõem o uso da exergia como um indicador quantitativo de sustentabilidade, uma vez que ela permite avaliar simultaneamente eficiência, uso de recursos e impactos ambientais. A redução da destruição de exergia ao longo do processo está associada à diminuição do consumo específico de recursos naturais e à melhoria do desempenho ambiental global.

Embora a exergia não contemple diretamente aspectos sociais e econômicos, sua aplicação integrada a outras ferramentas de avaliação fornece uma base científica sólida para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais sustentáveis. No contexto do aproveitamento de resíduos agroindustriais, a análise exergética demonstra, de forma quantitativa, que esses materiais possuem elevado valor termodinâmico e grande potencial para a produção sustentável de biocombustíveis.

Recurso energético	Exergia química específica (MJ·kg ⁻¹)	Relação Exergia/Energia	Observações termodinâmicas
Biomassa lignocelulósica seca (madeira, palha)	18 – 25	0,90 – 0,95	Elevado conteúdo de exergia química associado às ligações C–H e C–C
Resíduos agroindustriais oleaginosos (tortas, resíduos alimentares)	20 – 30	0,90 – 0,98	Alto potencial exergético, dependente do teor lipídico
Resíduos orgânicos úmidos	8 – 15	0,60 – 0,80	Exergia reduzida devido ao elevado teor de umidade
Óleo vegetal refinado	37 – 39	0,98 – 1,00	Quimicamente próximo aos combustíveis líquidos
Biodiesel	37 – 40	0,95 – 0,98	Levemente inferior ao diesel fóssil devido ao oxigênio na molécula
Diesel fóssil	42 – 45	≈ 1,00	Alto conteúdo exergético, porém recurso não renovável
Gás natural	48 – 50	≈ 1,00	Elevada qualidade energética e exergética

TABELA 1. Valores típicos de exergia química específica para biomassa, resíduos agroindustriais e combustíveis fósseis

FONTE: Adaptado de Kotas (2013); Dincer e Rosen (2013); Çengel e Boles (2015).

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam que biomassa e resíduos agroindustriais apresentam relações exergia/energia elevadas, frequentemente superiores a 90%, o que comprova seu significativo potencial termodinâmico. Em especial, resíduos oleaginosos destacam-se por apresentarem valores de exergia química comparáveis aos de óleos vegetais e biodiesel, reforçando sua viabilidade como matérias-primas estratégicas para a produção de biocombustíveis.

No âmbito internacional, instituições como a Agência Internacional de Energia (IEA) e as iniciativas vinculadas às Conferências das Partes (COP) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima destacam a eficiência energética como um dos pilares centrais para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Relatórios da IEA indicam que melhorias em eficiência podem responder por parcela significativa da redução necessária de emissões globais até 2030, reforçando a importância da redução de perdas e do uso racional dos recursos energéticos — princípios diretamente associados à análise exergética.

Na COP28, realizada em 2023, foi firmado um compromisso explícito entre os países signatários no sentido de acelerar a transição energética global, conforme expresso na seguinte declaração oficial:

Comprometemo-nos a trabalhar de forma colaborativa e expedita para triplicar a capacidade global instalada de energia renovável até pelo menos 11 000 GW e,

simultaneamente, dobrar a taxa média anual de melhorias em eficiência energética até 2030, colocando o princípio da eficiência energética como ‘combustível principal’ no cerne das políticas públicas e decisões de investimento. (COP28, 2023)

Essas metas globais reforçam a relevância de abordagens técnicas capazes de quantificar perdas e eficiências reais dos sistemas energéticos, destacando a exergia como uma ferramenta alinhada aos objetivos internacionais de sustentabilidade.

No contexto do G20, o Brasil tem assumido papel de destaque na articulação de políticas de transição energética com foco em sustentabilidade, inclusão social e valorização de fontes renováveis. Segundo informações oficiais do governo brasileiro, o país possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com participação expressiva de fontes renováveis.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, conforme divulgado no âmbito do G20:

O Brasil consome quase metade de sua energia proveniente de fontes renováveis, com destaque para a hidroeletricidade, energia solar, eólica, biocombustíveis e biomassa. (BRASIL, 2024).

Essa característica confere ao país posição estratégica nas discussões globais sobre transição energética e bioenergia, especialmente no que se refere ao aproveitamento de biomassa e resíduos agroindustriais. A valorização desses resíduos está alinhada tanto aos princípios da economia circular quanto às metas globais de descarbonização, nas quais a exergia pode ser empregada como indicador técnico complementar para avaliar a eficiência e a sustentabilidade das rotas tecnológicas adotadas.

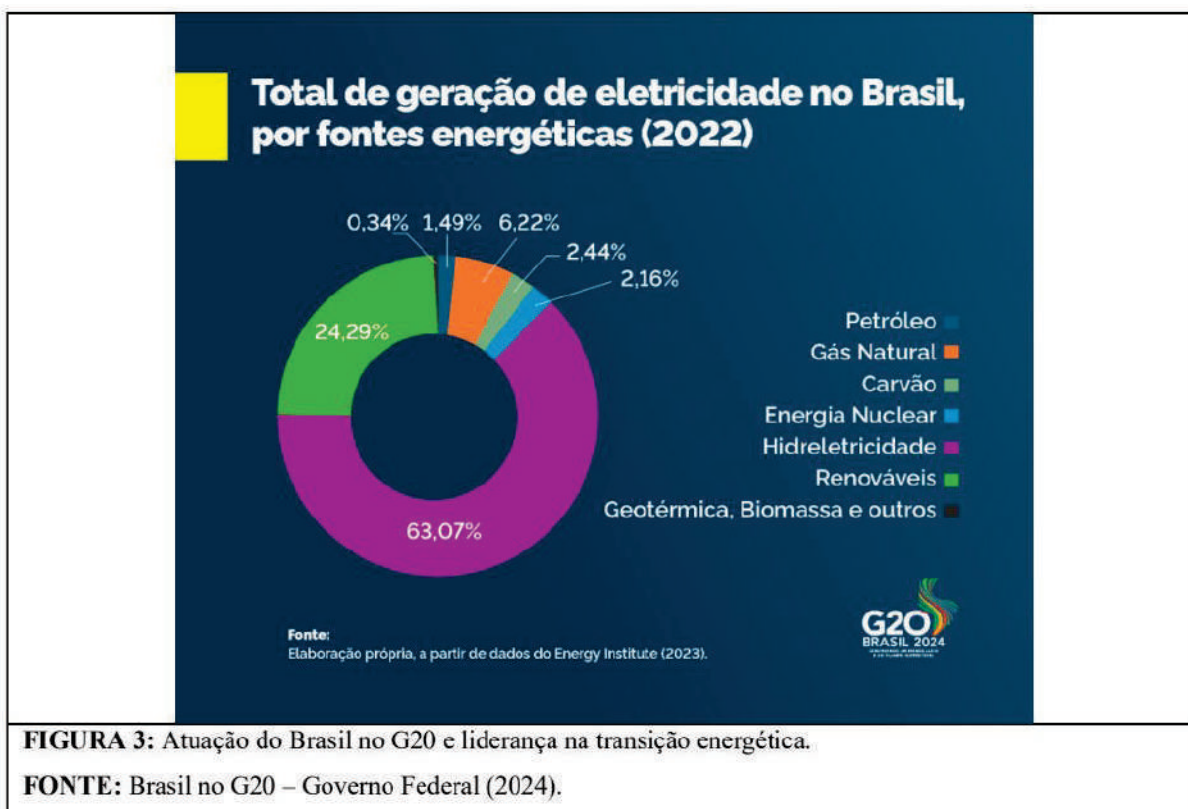


FIGURA 3: Atuação do Brasil no G20 e liderança na transição energética.

FONTE: Brasil no G20 – Governo Federal (2024).

Dessa forma, a análise exergética pode ser compreendida não apenas como uma ferramenta acadêmica ou industrial, mas também como um instrumento técnico complementar às políticas públicas e às estratégias internacionais de sustentabilidade energética, fornecendo uma base termodinâmica consistente para a avaliação do uso racional dos recursos naturais.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu compreender a relevância da análise exergética como ferramenta para avaliação do aproveitamento de resíduos sólidos agroindustriais na produção de biodiesel de segunda geração. A partir da revisão da literatura, verificou-se que a exergia fornece uma abordagem mais abrangente que as análises energéticas convencionais, ao considerar não apenas a quantidade de energia envolvida nos processos, mas também sua qualidade e capacidade efetiva de realização de trabalho útil.

Os estudos analisados demonstraram que resíduos agroindustriais, como biomassas lignocelulósicas, resíduos oleaginosos e subprodutos orgânicos provenientes das cadeias agrícolas e agroindustriais, possuem elevado potencial de valorização energética. Além de contribuírem para a redução da geração de resíduos, esses materiais podem atuar como

matérias-primas estratégicas para a produção de biocombustíveis avançados, favorecendo a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de recursos fósseis.

A revisão também evidenciou que as etapas de pré-tratamento, extração de lipídios, transesterificação e purificação representam pontos críticos dos processos produtivos, concentrando grande parte das irreversibilidades e das perdas exergéticas. Nesse contexto, a aplicação da análise exergética permite identificar gargalos operacionais, orientar melhorias tecnológicas e contribuir para o desenvolvimento de rotas mais eficientes de conversão da biomassa.

Sob a perspectiva da sustentabilidade, observou-se que a utilização de resíduos agroindustriais para a produção de biodiesel de segunda geração está alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o aproveitamento de materiais anteriormente considerados rejeitos e reduzindo impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Além disso, a integração entre indicadores exergéticos, energéticos e ambientais possibilita avaliações mais consistentes sobre o desempenho dos sistemas bioenergéticos.

No cenário brasileiro, caracterizado pela elevada disponibilidade de biomassa residual e pela importância do agronegócio na economia nacional, o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento energético desses resíduos representa uma oportunidade estratégica para ampliar a produção sustentável de biocombustíveis. Nesse sentido, a análise exergética constitui uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisão, contribuindo para a seleção de processos mais eficientes e para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Por fim, conclui-se que a análise exergética possui papel fundamental no estudo e na otimização de sistemas de produção de biodiesel de segunda geração, fornecendo subsídios técnicos para o avanço de tecnologias mais sustentáveis e eficientes. Recomenda-se que pesquisas futuras contemplem estudos experimentais e modelagens quantitativas aplicadas a sistemas reais, permitindo avaliar de forma integrada aspectos termodinâmicos, ambientais e econômicos relacionados ao aproveitamento de resíduos agroindustriais em biorrefinarias e processos de conversão energética.

10. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **RenovaBio: Relatório Anual de Certificação de Biocombustíveis 2024**. Rio de Janeiro: ANP, 2024.
- AL-HAMAMRE, Z.; SAID, S.; DINCER, I. **Exergy-based sustainability assessment of biofuel production from biomass and waste resources: A critical review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 190, p. 114089, 2024.
- AMIRI, Mohamad T.; MIELENZ, Jonathan R.; KARIMI, Keikhosro et al. **A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels**. *Energy Conversion and Management*, v. 212, p. 112792, 2020.
- ATABANI, A. E. et al. **Second-generation biodiesel production from waste biomass and agro-industrial residues: a review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 181, 113370, 2023.
- ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. A. **Biodiesel separation and purification: a review of current status and prospects**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 146, p. 111-124, 2021.
- BATLLE, E. A. O.; JULIO, A. A. V.; SANTIAGO, Y. C.; PALACIO, J. C. E.; et al. **Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: an energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment**. *Energy Conversion and Management*, v. 268, p. 116066, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116066.
- BRASIL. Presidência da República. **Lei Federal 9.795, de 27 de abril de 1999 - Dispõe sobre educação ambiental**. Acessado em: Dez. 2024. – (Brasil, 1999)
- ALLOUI, F.; DINCER, I. (orgs.) **Exergy for a Better Environment and Improved Sustainability 1: Fundamentals**. Cham: Springer, 2018.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **O Brasil no G20 e a liderança na transição energética**. Brasília: MME, 2024.
- BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016
- CASTINEIRAS-FILHO, S. L. P.; PRADELLE, F. **Energy, exergy, environmental and sustainability assessment of an integrated Brazilian sugarcane biorefinery producing ethanol and microalgae biodiesel**. *Journal of Cleaner Production*, v. 395, p. 136461, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136461.
- CASTIÑEIRAS-FILHO, S. L. P.; PRADELLE, F. A. Y. **Modeling of microalgal biodiesel production integrated to a sugarcane ethanol plant: Energy and exergy efficiencies and environmental impacts due to trade-offs in the usage of bagasse in the Brazilian context**. *Journal of Cleaner Production*, v. 395, p. 136461, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136461.
- CASTINEIRAS-FILHO, S. L. P.; PRADELLE, F. **Exergy analysis as a tool for improving sustainability in integrated bioenergy systems: a review**. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 385, 2023.
- CHEN, W. H. et al. **Recent advances in microalgae-based biofuel production and sustainability assessment**. *Energy Conversion and Management*, v. 286, 117021, 2023.
- CONFERÊNCIA DAS PARTES (COP28). **UAE Consensus: outcome of the first global stocktake**. Dubai: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023.

- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica: uma abordagem para engenharia**. Tradução de Paulo Maurício Costa Gomes e Antônio Pertence Júnior. 7. ed. São Paulo: AMGH, 2015.
- DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2013.
- DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Sustainability aspects of energy systems**. *Energy Policy*, London, v. 39, n. 6, p. 3461–3470, 2011.
- EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2024: Ano Base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the True Cost of Food to Transform Agrifood Systems**. Rome: FAO, 2023.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY BIOENERGY (IEA BIOENERGY). **Advanced biorefineries and biomass conversion technologies: status and future perspectives**. Paris: IEA Bioenergy, 2023.
- KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. London: Butterworths, 2013.
- KOUTINAS, A. A.; DORADO, M. P.; WANG, R.; WEBB, C. **Process intensification and sustainability metrics for second-generation biodiesel production from waste and residues**. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 297, p. 126622, 2021.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia Científica**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2011.
- MOHAMMADI, A.; MCGOUGH, D.; ROSEN, M. A. **A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels**. *Energy Conversion and Management*, v. 212, p. 112792, 2020.
- NAIR, L. G.; AGRAWAL, K.; VERMA, P. **An overview of sustainable approaches for bioenergy production from agro-industrial wastes**. *Energy Nexus*, v. 6, p. 100086, 2022. DOI: 10.1016/j.nexus.2022.100086.
- MORALES, M.; GÓMEZ, X.; ARAUZO, J. **Sustainability and exergy assessment of biofuel production from agricultural residues**. *Journal of Cleaner Production*, v. 403, p. 136841, 2023.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Fundamentos de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- PÉREZ-ALMADA, D. et al. **Integrated techno-economic and environmental assessment of biorefineries: review and future research directions**. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 7, p. 4031–4050, 2023.
- OGORURE, O. J.; OKO, C. O. C.; DIEMUODEKE, E. O.; OWEBOR, K. **Energy, exergy, environmental and economic analysis of an agricultural waste-to-energy integrated multigeneration thermal power plant**. *Energy Conversion and Management*, Amsterdam, v. 171, p. 222–240, 2018.

RABELO, Sarita Cândida; NAKASU, Pedro Yoritomo Souza; SCOPEL, Eupídio; ARAÚJO, Michelle Fernandes; CARDOSO, Luiz Henrique; COSTA, Aline Carvalho da. **Organosolv pretreatment for biorefineries: current status, perspectives, and challenges**. *Bioresource Technology*, v. 369, p. 128331, 2023.

RAHMANI, F. et al. **Exergoenvironmental analysis of bioenergy systems: a comprehensive review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 149, p. 111399, 2021.

RASHID, T.; SHER, F.; HAZRAT, M. A. **Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 158, p. 112122, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112122.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN21). **Renewables 2024 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2024.

RIGHETTO, F. G.; MADY, C. E. K. **Exergy Analysis of a Sugarcane Crop: A Planting-to-Harvest Approach**. *Sustainability*, v. 15, n. 20, p. 14686, 2023. DOI: 10.3390/su152014686.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (org.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2018.

SONNTAG, R. E.; BORGNACKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

TZIMA, S.; GEORGIOPOULOU, I.; LOULI, V.; MAGOULAS, K. **Recent advances in supercritical CO₂ extraction of pigments, lipids and bioactive compounds from microalgae**. *Molecules*, Basel, v. 28, n. 3, p. 1410, 2023.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **UAE Consensus: Outcome of the First Global Stocktake**. Dubai: United Nations Climate Change Conference (COP28), 2023.

YONG, K. J.; WU, T. Y. **Second-generation bioenergy from oilseed crop residues: recent technologies, techno-economic assessments and policies**. *Energy Conversion and Management*, v. 267, p. 115869, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115869.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Produção de grãos atinge novo recorde com 350,2 milhões de toneladas colhidas na safra 2024/25. Brasília, DF: Conab, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-atinge-novo-recorde-com-350-2-milhoes-de-toneladas-colhidas-na-safra-2024-25>>. Acesso em: 9 ago. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Produção de grãos é estimada em 360,1 milhões de toneladas no ciclo 2025/2026. Brasília, DF: Conab, 2026. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-estimada-em-360-1-milhoes-de-toneladas-no-ciclo-2025-2026>>. Acesso em: 9 ago. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2026. Rio de Janeiro: ANP, 2026. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico>>. Acesso em: 9 ago. 2026.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 36/2026 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 17º dias do mês de junho de dois mil e vinte e seis, às 16:00 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Hugo Leonardo Souza Lara Leão, Prof. Rogério Favareto e Prof. Marconi Batista Teixeira, para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "Estudo Exegético sobre o Aproveitamento de Resíduos Sólidos Agroindustriais para a Produção de Biodiesel de Segunda Geração" de Eduana Tavares de Melo, estudante do curso de Engenharia Química do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2020102203540376. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)

Rogério Favareto

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Marconi Batista Teixeira

Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Hugo Leonardo Souza Lara Leão, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 22/06/2026 17:29:02.
- Marconi Batista Teixeira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 22/06/2026 17:33:50.
- Rogério Favareto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 22/06/2026 17:49:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 830412

Código de Autenticação: 33a4e44e67



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 76901-970

(64) 3624-1000



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiás a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiás (RIIF Goiás), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiás.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

EDUANE TAVARES DE MELO NASCIMENTO

Matrícula:

2020102203540376

Título do trabalho:

Análise Exergética da Produção de Biodiesel de Primeira e Segunda Geração e do Aproveitamento de Resíduos Sólidos Agroindustriais

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiás: 14 / 08 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiás.

Documento assinado digitalmente

gov.br
EDUANE TAVARES DE MELO NASCIMENTO
Data: 14/08/2026 18:02:45-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

RIO VERDE-GO
Local

14 / 08 / 2026
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente

gov.br
HUGO LEONARDO SOUZA LARA LEÃO
Data: 14/08/2026 18:20:51-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>