REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

BIOMASSA E ECONOMIA CIRCULAR COMO ESTRATÉGIAS DE ENFRENTAMENTO AO AQUECIMENTO GLOBAL: INOVAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS NA PRODUÇÃO DE BIOENERGIA E REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

BIOMASS AND THE CIRCULAR ECONOMY AS STRATEGIES TO COMBAT GLOBAL WARMING: BIOTECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN BIOENERGY PRODUCTION AND GREENHOUSE GAS EMISSION REDUCTION

Ciências Biológicas, Ciências Agrárias, Engenharias • 18/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794848077

Maico Danúbio Duarte Abreu[1]

Daiane Aparecida Krewer[2]

Valdenir Pereira Morais[3]

RESUMO

O agravamento do aquecimento global e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm ampliado o interesse por alternativas energéticas capazes de conciliar desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, o aproveitamento da biomassa associado aos princípios da economia circular apresenta possibilidades para transformar resíduos orgânicos em recursos energéticos e produtos de maior valor agregado. O presente estudo tem como objetivo analisar as contribuições da biomassa e da economia circular para o enfrentamento do aquecimento global, com ênfase nas inovações biotecnológicas aplicadas à produção de bioenergia e ao potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa. Propõe-se uma revisão bibliográfica de abordagem qualitativa e caráter descritivo, fundamentada em publicações científicas e documentos técnicos relacionados à valorização de resíduos, à digestão anaeróbia, à fermentação microbiana e à produção de biocombustíveis. A discussão considera as possibilidades de aproveitamento de resíduos agroindustriais, agrícolas e urbanos, bem como os desafios associados à eficiência dos processos, à viabilidade econômica e aos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. Conclui-se que a integração entre biomassa, biotecnologia e economia circular pode contribuir para a transição energética e a mitigação climática, desde que sejam consideradas a origem das matérias-primas, a sustentabilidade das cadeias produtivas e as emissões efetivamente evitadas.

Palavras-chave: Valorização de resíduos; Transição energética; Biocombustíveis; Mitigação climática; Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Global warming and the need to reduce greenhouse gas emissions

have increased interest in energy alternatives that combine economic development with environmental sustainability. In this context, biomass utilization guided by circular economy principles offers opportunities to convert organic waste into energy resources and higher-value products. This study aims to analyze the contributions of biomass and the circular economy to climate change mitigation, emphasizing biotechnological innovations in bioenergy production and their potential to reduce greenhouse gas emissions. A qualitative, descriptive literature review is proposed, based on scientific publications and technical documents addressing waste valorization, anaerobic digestion, microbial fermentation, and biofuel production. The discussion considers opportunities for utilizing agricultural, agro-industrial, and municipal organic residues, as well as challenges related to process efficiency, economic feasibility, and environmental impacts throughout the life cycle. The study concludes that integrating biomass, biotechnology, and circular economy principles can contribute to the energy transition and climate change mitigation, provided that feedstock origin, supply chain sustainability, and actual avoided emissions are carefully assessed.
Keywords: Waste Valorization; Energy Transition; Biofuels; Climate Change Mitigation; Environmental Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, especialmente pelas alterações que provoca nos sistemas naturais, nas atividades econômicas e nas condições de vida da população. O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, associado principalmente à utilização de combustíveis fósseis, às mudanças no uso da terra e a

determinados processos produtivos, tem intensificado a necessidade de desenvolver alternativas capazes de reduzir os impactos ambientais das atividades humanas. Nesse cenário, a transição para fontes renováveis de energia e a adoção de modelos produtivos que utilizem os recursos naturais de maneira mais eficiente passaram a ocupar posição importante nas discussões sobre desenvolvimento sustentável e mitigação das mudanças climáticas.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) destaca que a redução das emissões globais exige transformações nos sistemas energéticos, industriais e agropecuários, acompanhadas de medidas voltadas à conservação dos recursos naturais e à melhoria da eficiência dos processos produtivos. Essas transformações envolvem não apenas a substituição de fontes energéticas convencionais, mas também a revisão das formas de produção, consumo e destinação de materiais. Nesse contexto, a utilização de recursos biológicos renováveis e o aproveitamento de resíduos orgânicos representam possibilidades para diminuir a dependência de matérias-primas fósseis e ampliar a participação de tecnologias de menor impacto ambiental.

Entre as alternativas disponíveis, a biomassa apresenta relevância por compreender materiais orgânicos de origem vegetal, animal ou microbiana que podem ser utilizados na produção de energia, combustíveis e outros produtos. Resíduos agrícolas, subprodutos agroindustriais, restos de alimentos, dejetos animais e materiais lignocelulósicos constituem exemplos de recursos que podem ser aproveitados por diferentes processos de conversão. Entretanto, a utilização energética da biomassa não deve ser considerada automaticamente sustentável, uma vez que seus benefícios

ambientais dependem da origem da matéria-prima, das tecnologias empregadas e das condições de produção, transporte e processamento.

Cherubini et al. (2009), ao analisarem os balanços energéticos e as emissões de gases de efeito estufa associados aos sistemas de bioenergia, demonstraram que os resultados ambientais variam conforme o tipo de biomassa, as tecnologias de conversão e os critérios utilizados na avaliação do ciclo de vida. Os autores ressaltam que aspectos como mudanças no uso da terra, consumo de energia durante o processamento e emissões relacionadas às atividades agrícolas precisam ser considerados na determinação dos benefícios efetivos desses sistemas. Essa perspectiva evidencia que a contribuição da biomassa para a mitigação climática não depende exclusivamente de sua origem renovável, mas do desempenho ambiental de toda a cadeia produtiva.

A discussão sobre o aproveitamento da biomassa aproxima-se dos princípios da economia circular, modelo que busca reduzir a geração de resíduos, prolongar a utilização dos recursos e favorecer a recuperação de materiais e energia. Diferentemente da lógica linear de produção, caracterizada pela extração de matérias-primas, fabricação, consumo e descarte, a economia circular propõe maior integração entre as etapas produtivas, de modo que materiais anteriormente considerados rejeitos possam retornar aos processos econômicos. No campo da bioenergia, essa abordagem permite discutir o aproveitamento de resíduos orgânicos como insumos para a produção de combustíveis, eletricidade, calor e outros produtos de interesse industrial.

Kircher et al. (2023), ao examinarem alternativas de tratamento e valorização de resíduos biológicos, destacaram a importância de desenvolver processos capazes de recuperar recursos e ampliar as possibilidades de utilização da matéria orgânica. A pesquisa evidencia que o aproveitamento desses materiais pode contribuir para reduzir perdas e diversificar a obtenção de produtos de origem biológica. Entretanto, os autores também demonstram que a valorização dos resíduos envolve desafios tecnológicos, econômicos e organizacionais, especialmente quando se pretende integrar diferentes processos e alcançar maior eficiência no uso dos recursos disponíveis.

Nesse contexto, as inovações biotecnológicas assumem importância por possibilitarem a utilização de microrganismos, enzimas e processos biológicos na transformação de matérias-primas orgânicas. Entre as tecnologias empregadas destacam-se a digestão anaeróbia, a fermentação microbiana e os processos enzimáticos aplicados ao aproveitamento de materiais lignocelulósicos. Essas alternativas permitem converter diferentes resíduos em produtos energéticos, como biogás, biometano e bioetanol, além de possibilitarem a recuperação de substâncias com aplicações industriais e agrícolas.

A digestão anaeróbia constitui uma das rotas biotecnológicas utilizadas no tratamento de resíduos orgânicos e na produção de biogás. Nesse processo, comunidades microbianas promovem a decomposição da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio, resultando na formação de uma mistura gasosa composta principalmente por metano e dióxido de carbono. Quando adequadamente conduzida, essa tecnologia pode associar o tratamento de resíduos à recuperação energética, oferecendo

alternativas para setores como agropecuária, indústria alimentícia e gestão de resíduos urbanos. Contudo, sua contribuição ambiental depende de fatores como a eficiência da conversão, o controle de vazamentos de metano e a destinação adequada dos materiais remanescentes.

A produção de biocombustíveis também apresenta possibilidades de inovação, especialmente por meio do desenvolvimento de tecnologias capazes de utilizar resíduos agrícolas e agroindustriais. O aproveitamento de materiais lignocelulósicos, por exemplo, pode ampliar a diversidade de matérias-primas destinadas à produção de bioetanol e outros combustíveis renováveis. Entretanto, a estrutura desses materiais impõe dificuldades técnicas relacionadas à liberação dos açúcares fermentescíveis, exigindo etapas de pré-tratamento e processos enzimáticos adequados. A superação dessas limitações constitui um campo importante para o desenvolvimento de soluções biotecnológicas mais eficientes.

Além da produção energética, a integração entre diferentes tecnologias pode favorecer a implantação de biorrefinarias, estruturas produtivas voltadas ao aproveitamento de múltiplas frações da biomassa. Nesses sistemas, uma mesma matéria-prima pode ser direcionada à obtenção de energia, combustíveis, compostos químicos e outros produtos, buscando reduzir desperdícios e melhorar o aproveitamento dos recursos. Essa proposta apresenta aproximações com a economia circular, pois procura integrar fluxos de materiais e ampliar as possibilidades de recuperação de valor ao longo das cadeias produtivas.

Apesar dessas perspectivas, a expansão da bioenergia envolve questões que precisam ser examinadas com cautela. A produção de

biomassa em larga escala pode gerar pressões sobre o uso da terra, os recursos hídricos e a disponibilidade de áreas destinadas à produção de alimentos. Além disso, processos de cultivo, transporte, transformação e utilização energética podem produzir emissões de gases de efeito estufa, comprometendo parte dos benefícios esperados. O IPCC (2022) reconhece o potencial da bioenergia para contribuir com a mitigação climática, mas ressalta a necessidade de considerar os riscos ambientais e sociais associados às diferentes formas de obtenção e utilização da biomassa.

A avaliação do ciclo de vida constitui, nesse sentido, uma ferramenta importante para compreender o desempenho ambiental das alternativas bioenergéticas. Cherubini e Strømman (2011) destacam que a comparação entre sistemas de bioenergia depende de escolhas metodológicas relacionadas às unidades funcionais, aos limites dos sistemas, aos processos considerados e às referências utilizadas para calcular emissões evitadas. Essas diferenças podem produzir resultados distintos, mesmo entre tecnologias aparentemente semelhantes, demonstrando a necessidade de avaliações criteriosas antes de atribuir benefícios climáticos a determinada cadeia produtiva.

Outro aspecto relevante diz respeito à relação entre inovação tecnológica e viabilidade econômica. Embora diferentes processos biotecnológicos apresentem potencial para ampliar o aproveitamento da biomassa, sua implementação depende de fatores como disponibilidade e regularidade do fornecimento de resíduos, custos operacionais, infraestrutura, eficiência de conversão e existência de mercados para os produtos obtidos. Assim, o desenvolvimento tecnológico precisa estar associado a condições que favoreçam sua aplicação em escala produtiva, evitando que

soluções promissoras em ambiente experimental sejam consideradas imediatamente viáveis em contextos industriais.

No Brasil, essa discussão apresenta particular importância diante da diversidade de atividades agrícolas, pecuárias, agroindustriais e urbanas que geram materiais orgânicos passíveis de aproveitamento. Resíduos da produção de cana-de-açúcar, subprodutos de atividades agropecuárias, restos alimentares e efluentes orgânicos representam exemplos de recursos que podem integrar cadeias de valorização energética. Entretanto, o potencial de utilização desses materiais depende de características regionais, condições logísticas, tecnologias disponíveis e formas de organização das atividades produtivas. Por essa razão, a análise da biomassa como alternativa energética precisa considerar tanto suas possibilidades técnicas quanto os desafios ambientais e econômicos envolvidos.

A relevância desta pesquisa está na necessidade de compreender como os princípios da economia circular podem ser articulados às inovações biotecnológicas para ampliar o aproveitamento energético de resíduos e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Embora a literatura apresente diferentes tecnologias de conversão da biomassa, torna-se importante discutir seus benefícios e limitações de maneira integrada, considerando que a sustentabilidade de uma alternativa energética não pode ser determinada apenas pelo caráter renovável da matéria-prima utilizada.

Do ponto de vista científico, o estudo busca aproximar conhecimentos relacionados à biotecnologia, à gestão de resíduos, à produção de bioenergia e à mitigação das mudanças climáticas.

Essa articulação permite compreender que o aproveitamento da biomassa envolve processos biológicos, escolhas tecnológicas e decisões econômicas que influenciam diretamente seus resultados ambientais. Além disso, a discussão pode contribuir para identificar possibilidades de aplicação de tecnologias de valorização de resíduos em diferentes setores produtivos, respeitando as condições necessárias para sua implementação sustentável.

Diante dessas considerações, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão: de que maneira a integração entre biomassa, economia circular e inovações biotecnológicas pode contribuir para a produção sustentável de bioenergia e para a redução das emissões de gases de efeito estufa, considerando os benefícios, as limitações e os desafios associados às diferentes tecnologias de conversão?

O objetivo geral deste estudo é analisar as contribuições da biomassa e da economia circular para o enfrentamento do aquecimento global, com ênfase nas inovações biotecnológicas aplicadas à produção de bioenergia e ao potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa. Especificamente, busca-se compreender os fundamentos da economia circular aplicados à valorização de resíduos orgânicos; caracterizar as principais tecnologias biotecnológicas utilizadas na conversão da biomassa; discutir as possibilidades de produção de biogás, biometano e biocombustíveis; examinar os fatores que influenciam o desempenho ambiental dessas alternativas; e identificar desafios relacionados à eficiência tecnológica, à viabilidade econômica e à sustentabilidade das cadeias produtivas.

Para alcançar esses objetivos, propõe-se o desenvolvimento de uma revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, fundamentada em artigos científicos e documentos técnicos relacionados à bioenergia, à economia circular, às tecnologias de conversão da biomassa e à mitigação das mudanças climáticas. A análise buscará reunir e discutir as contribuições da literatura, considerando as possibilidades de inovação, os limites de aplicação das tecnologias e a importância da avaliação ambiental para compreender sua efetiva contribuição à transição energética.

2. METODOLOGIA

O presente estudo será desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, com a finalidade de analisar as contribuições da biomassa e da economia circular para o enfrentamento do aquecimento global, considerando as inovações biotecnológicas aplicadas à produção de bioenergia e à redução das emissões de gases de efeito estufa. A escolha desse procedimento metodológico está relacionada à necessidade de reunir, examinar e discutir conhecimentos científicos produzidos sobre o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, os processos de conversão biotecnológica e os desafios associados à sustentabilidade das cadeias produtivas.

A revisão bibliográfica permitirá compreender diferentes perspectivas teóricas e resultados de pesquisas relacionadas ao tema, favorecendo a identificação de aproximações, divergências e lacunas na produção científica. Segundo Snyder (2019), as revisões de literatura constituem procedimentos relevantes para organizar conhecimentos existentes, desenvolver perspectivas integradas sobre determinado campo de investigação e identificar questões

que necessitam de aprofundamento. Dessa maneira, a pesquisa buscará ultrapassar a simples apresentação de estudos individuais, priorizando a análise crítica das contribuições encontradas.

O levantamento bibliográfico será realizado em bases de dados e plataformas de pesquisa científica, incluindo Scientific Electronic Library Online (SciELO), ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Acadêmico, conforme as condições de acesso disponíveis. Também poderão ser consultados documentos técnicos e relatórios de organismos internacionais, especialmente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), quando apresentarem informações pertinentes à mitigação das mudanças climáticas, à transição energética e ao uso sustentável da biomassa. A utilização dessas fontes buscará contemplar publicações de diferentes áreas do conhecimento, considerando o caráter interdisciplinar da temática investigada.

Para a localização das publicações, serão empregados descritores em português e inglês relacionados aos principais eixos do estudo, como “biomassa”, “economia circular”, “bioenergia”, “biotecnologia”, “biocombustíveis”, “digestão anaeróbia”, “valorização de resíduos”, “aquecimento global” e “gases de efeito estufa”, além de seus correspondentes *biomass*, *circular economy*, *bioenergy*, *biotechnology*, *biofuels*, *anaerobic digestion*, *waste valorization*, *global warming* e *greenhouse gas emissions*. Os termos poderão ser combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, buscando identificar estudos que relacionem tecnologias de aproveitamento da biomassa, princípios da circularidade e desempenho ambiental dos sistemas bioenergéticos.

Serão priorizadas publicações científicas recentes, especialmente aquelas divulgadas entre 2021 e 2026, sem excluir estudos anteriores considerados fundamentais para a compreensão dos conceitos e processos tecnológicos investigados. A inclusão de trabalhos clássicos permitirá recuperar contribuições relevantes sobre avaliação do ciclo de vida, conversão energética da biomassa e fundamentos da economia circular, enquanto a literatura mais recente será utilizada para discutir avanços tecnológicos, possibilidades de aplicação e desafios atuais. A delimitação temporal será empregada como critério de priorização, e não como restrição absoluta à seleção das fontes.

Como critérios de inclusão, serão considerados artigos científicos originais, estudos de revisão e documentos técnicos que apresentem relação direta com os objetivos da pesquisa, estejam disponíveis em português ou inglês e abordem pelo menos um dos eixos centrais da investigação. Terão prioridade trabalhos que examinem tecnologias biotecnológicas de conversão da biomassa, aproveitamento de resíduos agrícolas, agroindustriais e urbanos, produção de biogás, biometano e biocombustíveis, avaliação de emissões de gases de efeito estufa e integração entre bioenergia e economia circular.

Serão excluídas publicações duplicadas, materiais sem identificação adequada de autoria ou procedência, textos que não apresentem fundamentação científica suficiente e estudos cujo conteúdo não esteja diretamente relacionado à temática proposta. Também serão desconsiderados trabalhos que abordem fontes renováveis de energia sem estabelecer relação pertinente com biomassa, valorização de resíduos ou processos biotecnológicos. A aplicação

desses critérios buscará assegurar a coerência entre o material selecionado e os objetivos da investigação.

A seleção das publicações será realizada mediante leitura dos títulos e resumos, seguida da avaliação integral dos textos considerados relevantes. Durante essa etapa, serão observados os objetivos de cada estudo, os procedimentos metodológicos empregados, as tecnologias investigadas e as principais contribuições apresentadas pelos autores. As informações serão organizadas em um instrumento de registro bibliográfico, contemplando autoria, ano de publicação, título, tipo de estudo, matéria-prima utilizada, tecnologia de conversão, produtos obtidos e aspectos ambientais discutidos.

A análise do material selecionado será conduzida de maneira qualitativa, por meio da leitura interpretativa e da comparação entre as contribuições dos estudos. A organização das informações seguirá eixos temáticos previamente relacionados aos objetivos da pesquisa, com possibilidade de ajustes conforme os conteúdos identificados. Esses eixos compreenderão os fundamentos da biomassa e da economia circular; as principais tecnologias biotecnológicas de conversão energética; as possibilidades de produção de biocombustíveis e recuperação de recursos; os impactos ambientais e o potencial de mitigação das emissões; e os desafios tecnológicos, econômicos e socioambientais para a implementação dessas alternativas.

A interpretação dos estudos considerará as convergências e divergências existentes na literatura, especialmente em relação à eficiência dos processos, à origem das matérias-primas e às condições necessárias para que a utilização da biomassa produza benefícios ambientais. Será dada atenção às pesquisas que

empreguem avaliação do ciclo de vida, uma vez que a comparação entre tecnologias depende dos limites adotados, das etapas produtivas consideradas e dos critérios utilizados para estimar emissões de gases de efeito estufa. Dessa maneira, serão evitadas generalizações que atribuam automaticamente à bioenergia um desempenho ambiental superior ao dos combustíveis fósseis.

A discussão também buscará identificar limitações recorrentes nas tecnologias analisadas, incluindo custos de implementação, necessidade de pré-tratamento das matérias-primas, eficiência dos processos microbiológicos, disponibilidade de resíduos, infraestrutura de transporte e possíveis impactos sobre o uso da terra e dos recursos naturais. Esses aspectos serão examinados em conjunto com as oportunidades de integração produtiva oferecidas pela economia circular, considerando a possibilidade de transformar resíduos em insumos para novas atividades econômicas.

Por se tratar de uma pesquisa baseada em publicações científicas e documentos de acesso público, sem participação direta de seres humanos ou coleta de informações pessoais, não se prevê a necessidade de submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa. Serão observados os princípios de integridade acadêmica, mediante identificação adequada das fontes consultadas, respeito às contribuições dos autores e apresentação fiel das informações encontradas.

Por fim, os resultados da revisão serão apresentados de forma descritiva e interpretativa, organizados em categorias temáticas que permitam relacionar os avanços biotecnológicos às possibilidades de produção sustentável de bioenergia e de mitigação das mudanças climáticas. A síntese buscará evidenciar tanto as contribuições

quanto as limitações das tecnologias investigadas, oferecendo uma compreensão integrada sobre o papel da biomassa e da economia circular na transição para sistemas produtivos e energéticos ambientalmente mais sustentáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A literatura científica sobre biomassa e economia circular apresenta diferentes possibilidades de aproveitamento de resíduos orgânicos para a produção de energia, combustíveis e produtos de interesse econômico. Essas alternativas estão relacionadas à necessidade de reduzir o desperdício de recursos, diversificar a matriz energética e desenvolver processos produtivos capazes de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, os benefícios ambientais da utilização da biomassa não são uniformes, pois dependem das características das matérias-primas, das tecnologias de conversão e das condições de funcionamento de cada sistema.

Cherubini et al. (2009) demonstram que a avaliação dos sistemas bioenergéticos exige considerar o consumo de energia, as emissões associadas às diferentes etapas produtivas e os impactos decorrentes da obtenção das matérias-primas. Essa abordagem permite compreender que o caráter renovável da biomassa, isoladamente, não garante a redução das emissões de gases de efeito estufa. Para que essa contribuição seja efetiva, é necessário examinar o conjunto de processos envolvidos, desde a geração ou produção da matéria orgânica até a utilização dos produtos energéticos obtidos.

A discussão foi organizada em eixos temáticos que contemplam o aproveitamento de resíduos, as tecnologias biotecnológicas de

conversão, as possibilidades de mitigação das emissões e os desafios relacionados à implementação de sistemas bioenergéticos sustentáveis.

3.1. Biomassa e Economia Circular: Aproveitamento de Resíduos e Valorização de Recursos

A utilização da biomassa no contexto da economia circular representa uma alternativa para ampliar o aproveitamento de materiais orgânicos que, em determinadas condições, seriam descartados ou destinados a formas de tratamento com recuperação limitada de recursos. Resíduos agrícolas, subprodutos agroindustriais, dejetos animais e frações orgânicas dos resíduos urbanos podem apresentar características adequadas para diferentes processos de conversão energética. A possibilidade de transformar esses materiais em insumos produtivos contribui para aproximar a gestão de resíduos das estratégias de desenvolvimento sustentável.

A economia circular propõe mudanças na organização dos sistemas produtivos, buscando reduzir a extração de recursos, evitar a geração desnecessária de resíduos e favorecer a recuperação de materiais. Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) destacam que esse conceito envolve diferentes interpretações, mas apresenta como elemento recorrente a substituição de práticas lineares por estratégias que mantenham recursos e produtos em circulação. Quando aplicado à biomassa, esse princípio permite discutir a utilização de resíduos orgânicos como matérias-primas para a produção de energia e de outros produtos, desde que sejam observadas as condições ambientais e econômicas envolvidas.

No setor agroindustrial, o aproveitamento de subprodutos pode favorecer a integração entre atividades produtivas e sistemas de recuperação energética. Materiais provenientes do processamento de alimentos, da produção agrícola e da criação de animais apresentam possibilidades de utilização em processos biológicos, térmicos ou físico-químicos. Entretanto, a escolha da tecnologia depende de fatores como composição química, teor de umidade, disponibilidade da matéria-prima e necessidade de tratamento prévio.

Outro aspecto importante está relacionado à hierarquia de aproveitamento dos recursos. Nem todo resíduo orgânico deve ser direcionado prioritariamente à produção energética, uma vez que determinados materiais podem apresentar alternativas de utilização com maior benefício ambiental ou econômico. A recuperação de nutrientes, a produção de insumos agrícolas e a obtenção de compostos de maior valor agregado precisam ser consideradas na definição das rotas de valorização.

Nesse sentido, a economia circular não deve ser compreendida apenas como uma estratégia de transformação de resíduos em energia. Sua contribuição depende da integração entre prevenção do desperdício, recuperação de materiais, eficiência dos processos e redução dos impactos ambientais. A produção de bioenergia pode integrar esse modelo, especialmente quando utiliza matérias-primas residuais e contribui para diminuir perdas ao longo das cadeias produtivas.

3.2. Inovações Biotecnológicas na Conversão da Biomassa em Bioenergia

As tecnologias biotecnológicas utilizadas na conversão da biomassa envolvem processos nos quais microrganismos, enzimas ou sistemas biológicos participam da transformação da matéria orgânica em produtos energéticos. Entre as alternativas de maior interesse encontram-se a digestão anaeróbia, a fermentação microbiana e a hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicos.

A digestão anaeróbia constitui uma tecnologia utilizada para o tratamento de resíduos orgânicos e a produção de biogás. Durante o processo, diferentes grupos de microrganismos participam de etapas sucessivas de degradação da matéria orgânica, que incluem hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O resultado é a formação de biogás, composto principalmente por metano e dióxido de carbono, além de um material residual que pode apresentar possibilidades de aproveitamento, conforme suas características e condições sanitárias.

Appels et al. (2008) descrevem a digestão anaeróbia como um processo complexo, influenciado por fatores operacionais e pelas interações entre comunidades microbianas. Os autores demonstram que parâmetros como temperatura, composição do substrato, tempo de retenção e estabilidade do sistema interferem no desempenho da conversão. Essas condições evidenciam a importância do controle tecnológico para garantir eficiência e evitar problemas que comprometam a produção energética.

A produção de biometano representa outra possibilidade associada à digestão anaeróbia. Após etapas de purificação e remoção de componentes indesejáveis, o biogás pode ser enriquecido em metano e utilizado em aplicações energéticas compatíveis com suas especificações técnicas. Entretanto, os benefícios climáticos dessa

alternativa dependem do controle de perdas durante a produção, o tratamento, o armazenamento e a distribuição, considerando o elevado potencial de aquecimento global do metano.

A fermentação microbiana também apresenta relevância para a produção de biocombustíveis, especialmente o bioetanol. Nesse processo, microrganismos convertem açúcares fermentescíveis em etanol, permitindo o aproveitamento de diferentes matérias-primas. Quando são utilizados resíduos lignocelulósicos, torna-se necessário superar a resistência estrutural desses materiais, geralmente por meio de etapas de pré-tratamento e hidrólise.

Himmel et al. (2007) discutem as dificuldades relacionadas à conversão da biomassa lignocelulósica, destacando a resistência da parede celular vegetal à degradação. Essa característica representa um desafio para a liberação dos açúcares necessários à fermentação e justifica o desenvolvimento de tecnologias enzimáticas e processos de pré-tratamento mais eficientes.

As inovações nesse campo incluem o aprimoramento de enzimas, a seleção de microrganismos com características específicas e a integração de diferentes etapas de processamento. Essas estratégias podem contribuir para ampliar o aproveitamento da matéria-prima e reduzir limitações tecnológicas. Contudo, sua aplicação em escala industrial exige avaliação dos custos, da estabilidade dos processos e da disponibilidade de infraestrutura adequada.

A Tabela 1 apresenta uma síntese das principais rotas de conversão biotecnológica discutidas na literatura.

Tabela 1. Principais tecnologias biotecnológicas de conversão da biomassa e suas características

Tecnologia	Matérias-primas possíveis	Produtos principais	Aspectos relevantes
Digestão anaeróbia	Dejetos animais, resíduos alimentares e efluentes orgânicos	Biogás e digestato	Recuperação energética e tratamento de resíduos; exige estabilidade operacional
Purificação de biogás	Biogás proveniente da digestão anaeróbia	Biometano	Ampliação das aplicações energéticas; exige controle de perdas de metano
Fermentação microbiana	Açúcares e hidrolisados de biomassa	Bioetanol	Conversão biológica de açúcares; depende da composição do substrato
Hidrólise enzimática	Resíduos lignocelulósicos previamente preparados	Açúcares fermentescíveis	Etapa intermediária para obtenção de biocombustíveis; enfrenta dificuldades relacionadas à resistência da biomassa
Processos integrados de biorrefinaria	Diferentes frações de biomassa	Biocombustíveis, energia e bioprodutos	Aproveitamento diversificado de recursos; requer integração tecnológica e econômica

Fonte: Elaboração própria, com base em Appels et al. (2008), Himmel et al. (2007) e Cherubini et al. (2009).

A comparação evidencia que as tecnologias apresentam aplicações distintas e não devem ser avaliadas exclusivamente pela quantidade de energia produzida. A escolha de determinada rota depende das características dos resíduos, da infraestrutura disponível e dos objetivos de aproveitamento. Além disso, a integração entre processos pode ampliar as possibilidades de valorização da biomassa, embora também possa aumentar a complexidade operacional.

3.3. Produção de Bioenergia e Potencial de Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa

A contribuição da bioenergia para o enfrentamento do aquecimento global está relacionada à possibilidade de substituir determinadas fontes energéticas fósseis e de recuperar energia a partir de materiais orgânicos. Entretanto, essa substituição não resulta necessariamente em benefícios climáticos equivalentes em todos os sistemas. As emissões associadas à produção, ao transporte, ao processamento e à utilização da biomassa precisam ser consideradas para compreender seu desempenho ambiental.

Cherubini e Strømman (2011) destacam que a avaliação do ciclo de vida constitui uma ferramenta relevante para examinar os impactos ambientais dos sistemas bioenergéticos. Segundo os autores, os resultados podem variar conforme os limites adotados na análise, os processos incluídos e as alternativas utilizadas como referência. Dessa maneira, comparações entre combustíveis fósseis e biocombustíveis exigem critérios consistentes, evitando conclusões baseadas apenas nas emissões produzidas durante a etapa final de utilização energética.

A origem da biomassa representa um fator determinante nessa avaliação. O aproveitamento de resíduos já disponíveis pode apresentar vantagens quando evita formas de destinação ambientalmente inadequadas e reduz a necessidade de obtenção de novas matérias-primas. Por outro lado, a produção dedicada de biomassa energética pode envolver mudanças no uso da terra, consumo de água, utilização de fertilizantes e outras atividades que influenciam o balanço de emissões.

O IPCC (2022) reconhece que a bioenergia pode integrar estratégias de mitigação das mudanças climáticas, mas ressalta a existência de riscos e compensações associados ao uso da terra, à biodiversidade, à segurança alimentar e à disponibilidade de recursos naturais. Essa avaliação demonstra que a expansão dos sistemas bioenergéticos precisa ser acompanhada de critérios de sustentabilidade, especialmente quando envolve grandes áreas de cultivo ou cadeias produtivas complexas.

No caso da digestão anaeróbia, o aproveitamento energético do metano produzido pode contribuir para reduzir emissões quando substitui combustíveis fósseis ou evita a liberação de metano que ocorreria em determinadas formas de manejo dos resíduos. Entretanto, vazamentos durante a produção e a utilização do biogás podem comprometer os benefícios ambientais. Por essa razão, a eficiência da captura e o controle das emissões fugitivas constituem aspectos essenciais para a avaliação climática desses sistemas.

A produção de bioetanol a partir de resíduos lignocelulósicos também apresenta possibilidades de redução da dependência de matérias-primas fósseis. Contudo, os processos de pré-tratamento, hidrólise e fermentação demandam energia e insumos que devem

ser incorporados às avaliações ambientais. Assim, o potencial de mitigação precisa ser determinado a partir das condições específicas de produção, e não apenas da classificação do combustível como renovável.

A Tabela 2 apresenta os principais fatores que podem favorecer ou limitar a contribuição ambiental dos sistemas bioenergéticos.

Tabela 2. Fatores relacionados ao potencial de mitigação das emissões nos sistemas de bioenergia

Dimensão	Possíveis contribuições	Limitações e cuidados
Aproveitamento de resíduos	Recuperação energética e redução de perdas de recursos	Necessidade de avaliar usos alternativos dos materiais
Substituição de combustíveis fósseis	Possibilidade de redução das emissões em determinadas aplicações	Dependência do combustível substituído e do desempenho da cadeia produtiva
Produção de biogás	Aproveitamento energético do metano gerado	Risco de emissões fugitivas durante produção e utilização
Produção de biocombustíveis	Diversificação das fontes energéticas	Consumo de energia e insumos nas etapas de conversão
Uso da terra	Aproveitamento de áreas e recursos já disponíveis	Possíveis impactos sobre biodiversidade, água e produção de alimentos
Avaliação do ciclo de vida	Identificação de impactos em diferentes etapas produtivas	Resultados dependentes dos limites e critérios metodológicos adotados

Fonte: Elaboração própria, com base em Cherubini et al. (2009), Cherubini e Strømman (2011) e IPCC (2022).

A síntese demonstra que a contribuição da bioenergia para a mitigação climática depende da combinação entre eficiência tecnológica, origem sustentável da biomassa e controle das emissões ao longo da cadeia produtiva. Portanto, a avaliação ambiental deve considerar as condições específicas de cada sistema, evitando generalizações sobre os benefícios de determinada tecnologia.

3.4. Integração Entre Biotecnologia, Biorrefinarias e Economia Circular

A integração entre diferentes processos de conversão representa uma possibilidade de ampliar o aproveitamento da biomassa e reduzir a quantidade de materiais descartados. Nesse contexto, as biorrefinarias constituem sistemas que procuram utilizar diferentes componentes das matérias-primas biológicas para produzir energia, combustíveis, substâncias químicas e outros produtos de interesse econômico.

Cherubini (2010) destaca que o conceito de biorrefinaria está relacionado à integração de processos capazes de transformar biomassa em diferentes produtos, buscando maior eficiência na utilização dos recursos. Essa abordagem apresenta semelhanças com as refinarias convencionais quanto à diversificação produtiva, mas utiliza matérias-primas de origem biológica e pode incorporar tecnologias de conversão distintas.

A articulação entre biorrefinarias e economia circular permite discutir alternativas de organização produtiva nas quais os

subprodutos de determinada etapa possam ser utilizados em outros processos. Por exemplo, materiais residuais provenientes de uma conversão biológica podem apresentar possibilidades de recuperação de nutrientes ou de aproveitamento complementar, desde que sejam observadas suas características físico-químicas e condições de segurança.

Entretanto, a integração tecnológica não garante, por si só, maior sustentabilidade. Sistemas com múltiplas etapas podem exigir investimentos elevados, maior consumo energético e estruturas complexas de operação. Por essa razão, a definição das rotas de aproveitamento deve considerar a viabilidade econômica, a disponibilidade das matérias-primas e os impactos ambientais associados a cada alternativa.

Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) ressaltam que a economia circular envolve mudanças mais amplas nos padrões de produção e consumo. Assim, sua aplicação à bioenergia não deve ficar restrita à recuperação energética dos resíduos, mas incluir estratégias de prevenção do desperdício, eficiência no uso dos recursos e valorização de materiais ao longo das cadeias produtivas.

Essa perspectiva evidencia que o desenvolvimento de sistemas bioenergéticos circulares depende tanto das inovações biotecnológicas quanto de decisões relacionadas à gestão de resíduos, à infraestrutura e à organização das atividades econômicas. A contribuição ambiental dessas alternativas será maior quando houver compatibilidade entre as tecnologias adotadas e as condições locais de produção e consumo.

3.5. Desafios Tecnológicos, Econômicos e Socioambientais da Utilização da Biomassa

Apesar das possibilidades apresentadas, a utilização da biomassa para produção de bioenergia enfrenta limitações que dificultam sua expansão em diferentes contextos. Entre os desafios tecnológicos encontram-se a heterogeneidade das matérias-primas, a necessidade de pré-tratamento, as dificuldades de armazenamento e transporte e a manutenção da estabilidade dos processos biológicos.

No caso dos resíduos lignocelulósicos, a resistência estrutural dos materiais vegetais exige processos capazes de disponibilizar os componentes necessários à conversão. Himmel et al. (2007) demonstram que essa característica representa um dos obstáculos ao aproveitamento eficiente da biomassa, justificando a busca por soluções que reduzam a complexidade e os custos das etapas de processamento.

Na digestão anaeróbia, as dificuldades estão relacionadas à variabilidade dos substratos, ao equilíbrio das comunidades microbianas e ao controle das condições operacionais. Appels et al. (2008) destacam que a estabilidade do processo depende de fatores que precisam ser acompanhados continuamente para evitar redução da eficiência e interrupções na produção de biogás.

Do ponto de vista econômico, a implementação de tecnologias bioenergéticas exige investimentos em equipamentos, infraestrutura, manutenção e qualificação técnica. A disponibilidade de resíduos em quantidade suficiente e sua proximidade das unidades de processamento também influenciam os custos. Em

determinadas situações, a dispersão geográfica das matérias-primas pode comprometer a viabilidade do empreendimento, especialmente quando o transporte representa parcela relevante das despesas operacionais.

As questões socioambientais constituem outro elemento importante. A expansão de culturas destinadas à produção energética pode provocar conflitos relacionados ao uso da terra, à disponibilidade de água e à concorrência com outras atividades agrícolas. O IPCC (2022) destaca que as estratégias de mitigação baseadas em recursos biológicos precisam considerar esses riscos, evitando que a redução de emissões em determinado setor seja acompanhada de impactos negativos em outras dimensões ambientais ou sociais.

No contexto brasileiro, a diversidade de atividades agrícolas e agroindustriais oferece oportunidades para o aproveitamento de resíduos orgânicos, mas também exige soluções adaptadas às características regionais. A implantação de tecnologias de bioenergia depende de condições como disponibilidade de matérias-primas, acesso a financiamento, infraestrutura, assistência técnica e capacidade de gestão dos processos.

Assim, a expansão da bioenergia deve ser compreendida como parte de um conjunto mais amplo de estratégias de transição energética. Seu desenvolvimento precisa estar associado à melhoria da eficiência dos processos, ao controle dos impactos ambientais e à avaliação das condições necessárias para sua aplicação em diferentes escalas produtivas.

3.6. Contribuições da Biomassa e da Economia Circular para a Transição Energética

A análise dos diferentes eixos evidencia que a biomassa pode desempenhar papel complementar na diversificação das fontes energéticas, especialmente quando seu aproveitamento está associado à recuperação de resíduos e à utilização de tecnologias adequadas. A integração com os princípios da economia circular amplia essa perspectiva ao considerar não apenas a produção de energia, mas também a redução do desperdício e a valorização de materiais.

As inovações biotecnológicas contribuem para ampliar as possibilidades de conversão da matéria orgânica, permitindo o desenvolvimento de processos destinados à produção de biogás, biometano, bioetanol e outros produtos. Entretanto, os avanços tecnológicos precisam ser acompanhados de avaliações que considerem eficiência energética, emissões de gases de efeito estufa, custos operacionais e impactos socioambientais.

A literatura também indica que não existe uma única tecnologia capaz de atender, de maneira igualmente eficiente, às diferentes condições de disponibilidade e composição da biomassa. A escolha das alternativas deve considerar as características dos resíduos, as necessidades energéticas, a infraestrutura disponível e as possibilidades de integração entre processos produtivos.

Nesse sentido, a economia circular oferece uma perspectiva de organização dos sistemas bioenergéticos que pode favorecer o aproveitamento mais eficiente dos recursos. Contudo, seus

benefícios dependem da aplicação de critérios de sustentabilidade e da avaliação das consequências ambientais de cada processo.

Dessa forma, a discussão permite compreender que a contribuição da biomassa para o enfrentamento do aquecimento global não está relacionada apenas à substituição de combustíveis fósseis, mas à possibilidade de desenvolver cadeias produtivas que integrem recuperação de recursos, inovação tecnológica e redução de impactos ambientais. O avanço dessas estratégias exige investimentos em pesquisa, aperfeiçoamento dos processos de conversão e políticas que favoreçam soluções compatíveis com as necessidades e características de cada região.

4. CONCLUSÃO

A presente revisão bibliográfica permitiu compreender que a utilização da biomassa associada aos princípios da economia circular representa uma alternativa relevante para o aproveitamento de resíduos orgânicos e a diversificação das fontes de energia. A discussão desenvolvida evidenciou que as inovações biotecnológicas podem contribuir para transformar materiais provenientes de atividades agrícolas, agroindustriais e urbanas em produtos energéticos, reduzindo o desperdício de recursos e ampliando as possibilidades de recuperação de valor ao longo das cadeias produtivas. Dessa maneira, o objetivo de analisar as contribuições da biomassa e da economia circular para o enfrentamento do aquecimento global foi contemplado a partir da avaliação das tecnologias disponíveis, de suas possibilidades de aplicação e dos fatores que influenciam seu desempenho ambiental.

Entre as alternativas discutidas, destacam-se a digestão anaeróbia, a fermentação microbiana e os processos enzimáticos empregados na conversão de materiais lignocelulósicos. Essas tecnologias apresentam possibilidades distintas de produção de biogás, biometano e bioetanol, além de favorecerem a utilização de matérias-primas que poderiam ser descartadas sem aproveitamento energético. Entretanto, sua eficiência depende de condições específicas, como a composição dos resíduos, a estabilidade dos processos biológicos, a infraestrutura disponível e os custos de implementação. A integração dessas tecnologias em sistemas de biorrefinaria também se apresenta como uma possibilidade de ampliar o aproveitamento da biomassa, embora exija planejamento e avaliação das condições necessárias à sua viabilidade.

A análise da literatura reforçou que a contribuição da bioenergia para a redução das emissões de gases de efeito estufa não pode ser determinada exclusivamente pela origem renovável das matérias-primas. Os benefícios climáticos dependem das emissões produzidas durante a obtenção, o transporte, o processamento e a utilização da biomassa, bem como das fontes energéticas efetivamente substituídas. Nesse sentido, a avaliação do ciclo de vida constitui um instrumento importante para identificar impactos ambientais e evitar conclusões generalizadas sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis. O controle de perdas de metano, a utilização responsável dos recursos naturais e a prevenção de impactos relacionados ao uso da terra também são aspectos fundamentais para que essas alternativas contribuam efetivamente para a mitigação das mudanças climáticas.

A discussão demonstrou, ainda, que a economia circular oferece uma perspectiva mais ampla para a organização dos sistemas

produtivos, ao incentivar a redução de desperdícios, a recuperação de materiais e a integração entre diferentes atividades econômicas. No entanto, a implementação dessas estratégias enfrenta desafios relacionados à disponibilidade de resíduos, aos investimentos tecnológicos, à infraestrutura e à necessidade de conciliar eficiência produtiva com proteção ambiental. No contexto brasileiro, a diversidade de atividades agropecuárias e agroindustriais apresenta oportunidades para o desenvolvimento de soluções bioenergéticas, mas sua aplicação precisa considerar as características regionais e as condições econômicas e sociais de cada território.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se seu caráter bibliográfico, sem realização de experimentos, levantamento de dados primários ou avaliação quantitativa das emissões associadas às tecnologias discutidas. Além disso, a diversidade de matérias-primas, métodos de conversão e critérios utilizados nos estudos dificulta a comparação direta entre os resultados apresentados na literatura. Recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise do desempenho ambiental e econômico dos sistemas bioenergéticos, especialmente por meio de avaliações do ciclo de vida, estudos de viabilidade e investigações sobre a aplicação de tecnologias biotecnológicas em diferentes contextos produtivos.

Conclui-se, portanto, que a integração entre biomassa, economia circular e inovação biotecnológica pode contribuir para a transição energética e para a redução das emissões de gases de efeito estufa, desde que sua implementação esteja fundamentada em critérios técnicos, econômicos e ambientais consistentes. Mais do que substituir fontes convencionais de energia, essas estratégias oferecem possibilidades de reorganizar o aproveitamento dos recursos orgânicos e reduzir perdas nos processos produtivos. O

fortalecimento da pesquisa científica, o aperfeiçoamento das tecnologias de conversão e a adoção de políticas voltadas à valorização sustentável de resíduos constituem caminhos importantes para ampliar essas contribuições e favorecer modelos de produção mais compatíveis com os desafios climáticos contemporâneos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPELS, L. *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002.

CHERUBINI, F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. Energy Conversion and Management, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015.

CHERUBINI, F.; BIRD, N. D.; COWIE, A.; JUNGMEIER, G.; SCHLAMADINGER, B.; WOESS-GALLASCH, S. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: key issues, ranges and recommendations. Resources, Conservation and Recycling, v. 53, n. 8, p. 434-447, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. Bioresource Technology, v. 102, n. 2, p. 437-451, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.010.

HIMMEL, M. E. *et al.* Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. Science, v. 315, n. 5813, p. 804-807, 2007. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1137016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2022: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157926.

KIRCHER, M. *et al.* Treatment and valorization of bio-waste in the EU. EFB Bioeconomy Journal, v. 3, art. 100051, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2023.100051.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, v. 127, p. 221-232, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: an overview and guidelines. Journal of Business Research, v. 104, p. 333-339, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

---

[1] Licenciatura em Física e Matemática. Escola Técnica Everardo Passos. Pelotas/RS. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8654-8493. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Ciências Biológicas. Universidade do Vale do Rio do Sinos-Unisinos. Pelotas/RS. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6193-3600. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Agronomia. Universidade Federal do Maranhão. Chapadinha/MA. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4433-6230. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail