

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIA EUNICE FERNANDES

LUIS FELIPE DALLANO

**IDENTIFICAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA BIOECONOMIA CIRCULAR
NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA**

PONTA GROSSA

2025

JULIA EUNICE FERNANDES

LUIS FELIPE DALLANO

**IDENTIFICAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA BIOECONOMIA CIRCULAR
NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA**

**Identification Of Technological Routes For Circular Bioeconomy In The Sugar-
Alcoholic Industry**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Fabio Neves Puglieri.

PONTA GROSSA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JULIA EUNICE FERNANDES
LUIS FELIPE DALLANO

**IDENTIFICAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA BIOECONOMIA CIRCULAR
NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/ fevereiro/ 2025

Fabio Neves Puglieri
Doutorado
Universidade Federal Tecnológica do Paraná

Antonio Carlos de Francisco
Doutorado
Universidade Federal Tecnológica do Paraná

Diego Alexis ramos Huarachi
Mestrado
Universidade Federal Tecnológica do Paraná

PONTA GROSSA
2025

Dedicamos este trabalho à Deus e a
nossa família, pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de nossas vidas. Portanto, desde já pedimos desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do nosso pensamento e de nossa gratidão.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri, pela sabedoria, paciência e dedicação com que nos guiou nesta trajetória.

Aos nossos colegas de sala, pelo apoio e pelas trocas de conhecimento que tornaram essa jornada mais enriquecedora.

À Secretaria do Curso, pela cooperação e pelo suporte ao longo do caminho.

Queremos também expressar nosso reconhecimento e gratidão às nossas famílias, pois sem o apoio incondicional de cada um de vocês, teria sido muito mais difícil vencer este desafio. A paciência, o incentivo e a motivação que recebemos de nossos pais, irmãos e demais familiares foram fundamentais para chegarmos até aqui.

Aos nossos amigos, que nos incentivaram e estiveram ao nosso lado nos momentos mais desafiadores, tornando essa caminhada mais leve e significativa.

Por fim, agradecemos a Deus, por nos dar força, sabedoria e resiliência para superar cada obstáculo e conquistar mais esta etapa em nossas vidas.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, nosso mais sincero muito obrigado!

RESUMO

A crescente degradação ambiental e a volatilidade dos preços das commodities evidenciam a inviabilidade dos modelos lineares de produção, reforçando a necessidade da transição para a bioeconomia circular, especialmente no setor sucroenergético. A bioeconomia circular se baseia no uso eficiente de recursos biológicos e na valorização de subprodutos, promovendo sustentabilidade e inovação tecnológica. Diante desse cenário, a pesquisa busca responder à questão: quais são as rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor sucroenergético no Brasil? O objetivo principal é identificar e mapear essas rotas tecnológicas, destacando oportunidades de inovação e contribuindo para a otimização da produção e da sustentabilidade do setor. Para isso, a metodologia adotada incluiu uma revisão sistemática da literatura, análise de patentes e a aplicação da técnica de *technology roadmapping*. Foram utilizadas bases de dados científicas e de patentes para identificar tendências tecnológicas e avaliar a transferência e aplicabilidade de inovações no setor sucroenergético. Os principais resultados indicam que o setor apresenta grande potencial para práticas circulares, especialmente na valorização de resíduos da cana-de-açúcar, cogeração de energia, biocombustíveis avançados e biorrefinarias. A análise das patentes revelou oportunidades estratégicas na transferência de tecnologias entre setores industriais, promovendo maior eficiência produtiva e impacto econômico positivo. No entanto, desafios como a falta de infraestrutura e de incentivos para P&D ainda limitam a adoção em larga escala dessas inovações. Conclui-se que a bioeconomia circular no setor sucroenergético representa uma alternativa viável e estratégica para o desenvolvimento sustentável no Brasil. A implementação das rotas tecnológicas mapeadas pode gerar benefícios ambientais e econômicos significativos, mas requer esforços coordenados entre governo, indústria e centros de pesquisa para superar as barreiras existentes e maximizar o potencial do setor.

Palavras-chave: rotas tecnológicas; bioeconomia; economia circular; Brasil.

ABSTRACT

The increasing environmental degradation and the volatility of commodity prices highlight the unsustainability of linear production models, reinforcing the need for a transition to a circular bioeconomy, particularly in the sugar-energy sector. The circular bioeconomy is based on the efficient use of biological resources and the valorization of by-products, promoting sustainability and technological innovation. Given this scenario, the research aims to answer the question: what are the technological pathways for the circular bioeconomy in the sugar-energy sector in Brazil? The main objective is to identify and map these technological routes, highlighting innovation opportunities and contributing to the optimization of production and sustainability in the sector. To achieve this, the methodology included a systematic literature review, patent analysis, and the application of the technology roadmapping technique. Scientific and patent databases were used to identify technological trends and assess the transferability and applicability of innovations in the sugar-energy sector. The main results indicate that the sector has significant potential for circular practices, particularly in the valorization of sugarcane residues, energy cogeneration, advanced biofuels, and biorefineries. The patent analysis revealed strategic opportunities for technology transfer between industrial sectors, promoting greater production efficiency and a positive economic impact. However, challenges such as lack of infrastructure and incentives for R&D still limit the widespread adoption of these innovations. It is concluded that the circular bioeconomy in the sugar-energy sector represents a viable and strategic alternative for sustainable development in Brazil. The implementation of the mapped technological pathways can generate significant environmental and economic benefits, but requires coordinated efforts between the government, industry, and research centers to overcome existing barriers and maximize the sector's potential.

Keywords: technological routes; bioeconomy; circular economy; Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) Identificados na Pesquisa.	17
Figura 2 - Seções para Condução deste Trabalho.	20
Figura 3 - Economia Linear e Circular	22
Figura 4 - Diagrama Borboleta da Economia Circular.	23
Figura 5 - Categorização de abordagens lineares e circulares para reduzir o uso de recursos.....	25
Figura 6 - Interface entre Bioeconomia e Economia Circular.....	28
Figura 7 - Processos Sucroenergéticos.	35
Figura 8 - Palavras-chave recorrentes na Revisão Sistemática.....	50
Figura 9 - Fluxograma das rotas tecnológicas do portfólio.	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de patentes registradas por empresa.....	57
Gráfico 2 - Rede de nós entre empresas e patentes no Mendeley.....	58
Gráfico 3 - Empresas com maior número de relações em patentes	59
Gráfico 4 - Localização geográfica do registro das patentes.....	59
Gráfico 5 - Distribuição de patentes por setor.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Mapeamento de Oportunidade de Tecnologias.	33
Quadro 2 - Classificação da Pesquisa Realizada.	37
Quadro 3 - Etapas de Pesquisa.	39
Quadro 4 - Resultado da Revisão Sistemática.	48
Quadro 5 - Priorização de tecnologias.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de patentes por setor industrial.....	63
Tabela 2 - Matriz de Potencial de Adaptação Tecnológica por Indústria	69
Tabela 3 - Lacunas Tecnológicas no Mercado Brasileiro	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL - Alagoas

EC - Economia Circular

BE - Bioeconomia

BEC - Bioeconomia Circular

RT - Rotas Tecnológicas

BCG - Bussines CEO Guide

EMF - Ellen Macarthur Foundation

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

CEO - Chief Executive Officer

CGEE - Centro de Gestão de Estudos Estratégicos

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

WCED - Western Cape Education Department

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development

IPC - Internacional de Patentes

CPC – Classificação Cooperativa de Patentes

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Problemática	16
1.2.	Objetivos	16
1.2.1.	Objetivo Geral.....	16
1.2.2.	Objetivos Específicos	16
1.3.	Justificativa.....	16
1.4.	Delimitação do Tema.....	19
1.5.	Organização do Trabalho	19
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1.	Economia Circular.....	21
2.2.	Bioeconomia e Bioeconomia Circular	27
2.3.	Rotas tecnológicas para a Bioeconomia Circular	30
2.4.	Setor sucroenergético	34
3.	METODOLOGIA	37
3.1.	Linhas Gerais da Pesquisa	37
3.2.	Metodologia de Elaboração da Pesquisa	38
3.2.1.	Etapa 1: Caracterização Bioeconomia Circular.	40
3.2.2.	Etapa 2: Identificação de rotas tecnológicas para bioeconomia circular	41
3.2.2.1.	<u>Colaboração: mapeamento de relações tecnológicas</u>	42
3.2.2.2.	<u>Transferibilidade: análise de transferência tecnológica</u>	42
3.2.2.3.	<u>Integração dos resultados e elaboração de rotas tecnológicas</u>	43
3.2.2.4.	<u>Etapa 3: Caracterização da bioeconomia circular no setor sucroenergético</u> 43	
3.2.2.5.	<u>Etapa 4: Discussão das Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético.</u>	44
3.2.2.6.	<u>Integração colaboração e transferibilidade</u>	44
3.2.2.7.	<u>Análise das tecnologias globais e setoriais</u>	45
3.2.2.8.	<u>Exploração do ciclo de vida dos produtos sucroenergéticos</u>	45
3.2.2.9.	<u>Contribuição para a sustentabilidade e competitividade</u>	46
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1.	Caracterização da Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético.	47
4.1.1.	Revisão Sistemática	47
4.1.2.	Bioeconomia Circular	49

4.1.3. Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético	52
4.1.3.1. <u>Valorização Integral de Subprodutos</u>	52
4.1.3.2. <u>Eficiência Energética</u>	53
4.1.3.3. <u>Ciclo de Vida Sustentável</u>	53
4.1.3.4. <u>Integração de Práticas Circulares</u>	53
4.2 Rotas tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético com base na análise de Patentes.	54
4.2.1. Busca de Patentes	54
4.2.2. Mapa de Relação	56
4.3. Mapeamento de Oportunidades de Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético do Brasil	60
4.3.1. Aplicação de Tecnologias.....	60
4.3.2. Mapa de Transferibilidade	61
4.3.2.1. <i>Etapa 1: Definir as Indústrias em Relação às Patentes</i>	62
4.3.2.2. <u>Etapa 2: Relacionar a Tecnologia a uma Indústria Relevante</u>	63
4.3.2.3. <u>Etapa 3: Analisar Patentes entre as Indústrias e as Tecnologias</u>	64
4.3.2.3.1. <i>Identificar patentes já aplicáveis a várias indústrias</i>	65
4.3.2.3.2. <i>Avaliar quais tecnologias podem ser facilmente transferíveis.</i>	66
4.3.2.3.3. <i>Examinar como a adaptação dessas tecnologias pode agregar valor a setores adjacentes.</i>	67
4.3.2.3.4. <i>Influência da Localização Geográfica na Adaptação das Tecnologias</i>	70
4.3.2.4. <i>Etapa 4: Desenvolver um Mapa de Portfólio</i>	70
4.3.3. Lacunas Tecnológicas no Mercado Brasileiro	73
4.3.4. Oportunidades de Negócios	76
4.3.5. Análise de Palavras das Patentes	78
5. CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais crescentes, como a degradação do solo, o esgotamento de recursos naturais e a volatilidade dos preços de commodities, evidenciam a inviabilidade dos modelos lineares de produção, que desconsideram os limites dos recursos materiais e energéticos. Segundo a Ellen MacArthur Foundation (2019), torna-se urgente adotar sistemas produtivos mais sustentáveis, capazes de promover eficiência no uso de recursos e reduzir os impactos ambientais.

A economia circular sustenta o crescimento em um mundo de recursos finitos, transformando cadeias de valor em círculos de valor. De acordo com o Boston Consulting Group (2023), a circularidade reduz riscos e custos de fornecimento, melhora a eficiência operacional e abre oportunidades para novos produtos e mercados. Entretanto, a geração linear de valor não considera a finitude dos recursos, contribuindo para degradação ambiental e aumento da competição por commodities, o que leva à instabilidade nos preços e inviabiliza modelos lineares de produção (Gonçalves; Barroso, 2019).

Para enfrentar esses desafios, a transição para sistemas circulares é essencial, pois permite maior valorização de recursos ao longo de todo o ciclo produtivo, promovendo sua reutilização e prolongando sua vida útil (BCG, 2019). O modelo econômico circular não apenas reduz impactos ambientais, mas busca regenerar o capital natural, equilibrando economia e meio ambiente para beneficiar todo o sistema produtivo (Gonçalves; Barroso, 2019).

Nesse contexto, a bioeconomia surge como uma estratégia complementar, promovendo o uso de recursos renováveis e biológicos. Segundo Dahiya *et al.* (2018), a bioeconomia depende de características regionais e da disponibilidade de biorecursos, exigindo o desenvolvimento de tecnologias que otimizem seu uso (PANT *et al.*, 2019). Essa abordagem permite não apenas a produção de bens e energia a partir de biorecursos, mas também a redução do consumo de matérias-primas virgens, integrando os conceitos de circularidade (Klitkou *et al.*, 2019).

O uso em cascata de recursos naturais minimiza desperdícios e transforma resíduos em produtos de alto valor agregado, consolidando o conceito de bioeconomia circular (Mohan *et al.*, 2018). Para que as empresas adotem esse modelo, é necessário redesenhar estratégias de negócios e mapear tecnologias existentes que maximizem o aproveitamento de recursos (Bian *et al.*, 2020). Estudos de caso

identificam oportunidades de intercâmbio entre processos produtivos, levando em conta a viabilidade técnica e econômica, além de fatores como sazonalidade e saída de insumos potenciais (Trombeta; Caixeta, 2017).

Rotas tecnológicas desempenham papel crucial na transição para a bioeconomia circular. Esses estudos de prospecção, fundamentados por Firat *et al.* (2008), mapeiam e preveem soluções tecnológicas para otimizar recursos e promover inovação (Fellows, 2017). No contexto da bioeconomia circular, essas rotas destacam a biomassa como uma grande oportunidade para a geração de energia renovável, superando a necessidade global (Fradj *et al.*, 2015; TURSI, 2019).

O reaproveitamento de insumos renováveis e o uso eficiente de resíduos orgânicos, como biomateriais e biomassa, são essenciais para reduzir a pegada ecológica e garantir um fornecimento seguro de recursos renováveis (Berto; Ferraz; Rebelatto, 2020; FARIA; Caldeira, 2018). No Brasil, o agronegócio, que representa 25,5% do PIB nacional (CEPEA, 2022), possui grande potencial para adotar práticas circulares, contribuindo significativamente para a sustentabilidade.

O setor sucroenergético brasileiro é exemplo desse potencial, utilizando a cana-de-açúcar para gerar energia renovável por meio do bagaço e da palha, além de desempenhar papel relevante na economia nacional, com impacto significativo no PIB e geração de empregos formais (UNICA, 2023). Contudo, desafios como a monocultura, a competição por água e o manejo inadequado de resíduos ainda persistem.

A introdução de novas tecnologias e processos coloca o Brasil na vanguarda da produção de alimentos e bioenergia. Em 2016, o país contava com 523 usinas de biomassa em operação, das quais 79,33% estavam vinculadas ao setor agroindustrial (Miranda *et al.*, 2019). A cogeração de energia a partir da palha residual e do bagaço de cana-de-açúcar exemplifica a transição para uma economia circular no setor sucroenergético (Trombeta; Caixeta, 2017).

Essa abordagem reforça o potencial do Brasil para liderar iniciativas de bioeconomia circular, promovendo o uso sustentável de recursos renováveis e destacando a biodiversidade do país. Para maximizar esse potencial, é essencial empregar uma abordagem sistêmica, considerando proteção ambiental, justiça social e viabilidade econômica (Bavaresco *et al.*, 2017). Assim, mapear rotas tecnológicas para o setor sucroenergético é fundamental para uma gestão mais eficiente e

sustentável, posicionando o setor como referência global na transição para uma economia circular (FAO, 2020).

1.1. Problemática

Sendo assim, considerando tudo isso, a pergunta central deste trabalho é: “quais são as rotas tecnológicas para a bioeconomia circular do setor Sucroenergético no Brasil?”

1.2. Objetivos

Para responder à questão problema deste estudo foram estabelecidos os seguintes objetivos:

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é a identificação das rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor Sucroenergético no Brasil.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral do trabalho traçou-se cinco objetivos específicos, sendo eles:

- Caracterizar Bioeconomia Circular;
- Identificar Rotas Tecnológicas de Bioeconomia Circular;
- Caracterizar Bioeconomia Circular no setor Sucroenergético;
- Discutir rotas tecnológicas para bioeconomia circular no setor sucroenergético;

1.3. Justificativa

Os objetivos do presente trabalho e seu principal tema estão relacionados com a identificação de rotas tecnológicas para a bioeconomia circular, de forma a atingir a sustentabilidade diante das projeções de escassez dos recursos biológicos do planeta. Diante disso, a bioeconomia circular se destaca como uma das soluções que trazem melhor desenvolvimento sustentável e geram melhores oportunidades de mercado - seu desenvolvimento exige grandes mudanças e engloba a execução de diversas condutas sustentáveis em sua implementação, capazes de proporcionar

diferencial competitivo e atender diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentando um grande potencial ambiental e econômico de aplicação (BCG, 2019).

O Brasil possui um papel estratégico na bioeconomia circular, especialmente no setor sucroenergético, que se destaca pela sua relevância econômica e ambiental. O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, matéria-prima essencial para a produção de biocombustíveis, bioquímicos e biomateriais (MAPA, 2021). Além disso, políticas públicas, como o RenovaBio (Lei nº 13.576/2017), reforçam a importância da transição para modelos sustentáveis, incentivando a descarbonização e a inovação tecnológica no setor (Brasil, 2017). Estudos indicam que a bioeconomia pode agregar valor à cadeia produtiva ao ampliar a eficiência na utilização de resíduos e subprodutos da cana, impulsionando a competitividade do Brasil no mercado global de bioenergia (Tomaz *et al.*, 2020).

Ao identificar as oportunidades de rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor Sucroenergético no Brasil, este trabalho busca obter contribuições para os ODS ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Principais Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) Identificados na Pesquisa.



Fonte: Adaptado Nações Unidas Brasil (2022)

Apesar de impactar direta ou indiretamente para todas as ODS o trabalho possui maior relação com as ODS 8, 9 e 12, conforme detalhado a seguir:

- Objetivo 8. Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todas e todos: ao diversificar as fontes econômicas por meio da modernização tecnológica voltada para inovação com a geração de empregos decentes e o aumento do valor agregado à produtos sustentáveis, esta pesquisa

dissocia o desenvolvimento e crescimento econômico da degradação ambiental e contribui para o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentável.

- Objetivo 9. Construir infra estruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação: a bioeconomia circular aplicada na indústria sucroenergética promove industrialização sustentável ao desenvolver uma infraestrutura de qualidade que apoie o desenvolvimento econômico com uma alta eficiência na utilização de recursos tornando os processos mais limpos graças ao fortalecimento das pesquisas científicas voltadas às melhorias tecnológicas do setor, facilitando o acesso à tecnologia de informação.
- Objetivo 12. Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis: com a utilização de bioprodutos tem-se um uso mais eficiente dos recursos naturais e uma utilização menor de produtos químicos ao longo do ciclo de vida dos materiais. O setor sucroenergético possui empresas grandes e transnacionais, ao mapear oportunidades de desenvolvimento tecnológico para atingir a bioeconomia circular no setor, racionaliza-se a utilização de combustíveis fósseis, além de reduzir a geração de resíduos e fortalecer as capacidades científicas para mudar padrões de produção e consumo e torná-los mais sustentáveis.

Sendo uma solução para os maiores desafios ambientais de hoje - alterações climáticas, escassez de recursos, perda e desperdício alimentar, alterações do solo e perda de biodiversidade; a bioeconomia circular é uma oportunidade avaliada em 7,7 Trilhões de dólares no mundo todo até 2030 (BCG, 2019). Seu potencial renovável e de reutilização proporciona resultados muito significativos em todos os contextos, principalmente em países como o Brasil, que possui grande biodiversidade - cenário empresarial repleto de oportunidades bioeconomias - financeiras e sustentáveis (Trombeta; Caixeta, 2017).

De acordo com a FAO (2022), a bioeconomia circular tem ganhado destaque como uma das abordagens mais promissoras para enfrentar as demandas globais por sustentabilidade. Essa abordagem não apenas mitiga os impactos ambientais de cadeias produtivas tradicionais, mas também promove soluções inovadoras, como o uso de biotecnologias avançadas, a integração de sistemas agrícolas regenerativos e a conversão de resíduos orgânicos em produtos de alto valor agregado. No setor

sucroenergético, essas iniciativas são impulsionadas por políticas internacionais, como o Acordo de Paris e a Agenda 2030, que enfatizam a necessidade de transições para modelos econômicos baseados na eficiência de recursos e na regeneração dos ecossistemas. Tais avanços tecnológicos têm potencial para atender às exigências crescentes por energia limpa e bioprodutos, reforçando a importância estratégica do Brasil, dada sua rica biodiversidade e capacidade produtiva, no cenário global de bioeconomia circular.

1.4. Delimitação do Tema

A Embrapa (2011) apresenta a importância do estudo das rotas tecnológicas ao observar os avanços contínuos da ciência e da tecnologia que levaram ao desenvolvimento de novas biomassas, bem como ao desenvolvimento de novos processos agroindustriais que antes eram considerados resíduos.

A transformação de resíduos agroindustriais em produtos valiosos destaca a importância das rotas tecnológicas, que ajudam a tornar esse processo eficiente e sustentável. Isso não apenas reduz o impacto ambiental, mas também pode gerar novas oportunidades econômicas e tecnológicas, impulsionando a inovação e promovendo a economia circular (Mehmood *et al.*, 2021).

O setor sucroenergético já possui uma grande reutilização de seus resíduos e em comparação com outros setores industriais aplica muitas práticas de circularidade (Cezarino *et.al.*, 2020). Porém ele possui um grande potencial biológico inexplorado (Trombeta; Caixeta, 2017).

Por este motivo e por conta da representatividade do setor no Brasil, o mapeamento de rotas tecnológica para identificação de tecnologias ainda não implementadas busca neste trabalho apresentar um mapa de oportunidades de bioeconomia circular para o setor sucroenergético no Brasil, visando uma redução ainda maior dos impactos ambientais do setor e um aumento de valor agregado de seus produtos, visando uma maior produtividade e lucratividade.

1.5. Organização do Trabalho

É apresentado na Figura 2 uma visão geral da organização deste trabalho, bem como a estrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 2 - Seções para Condução deste Trabalho.

Contextualização do Tema de Pesquisa			
Detalhamento e transição da Economia Linear para Economia Circular	Perspectivas ambientais do setor sucroenergético	Perspectivas da Bioeconomia e Bioeconomia Circular	Oportunidades de rotas tecnológicas em um viés agroindustrial
Problemática			
Quais as oportunidades de rotas tecnológicas para Bioeconomia Circular no setor sucroenergético?			
Objetivo Geral			
O objetivo geral do trabalho é a identificação das rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor Sucroenergético no Brasil.			
Objetivo Específico			
Caracterização Bioeconomia Circular	Identificar de rotas tecnológicas para Bioeconomia Circular	Caracterização da Bioeconomia Circular no setor sucroenergético	Discussão das rotas tecnológicas para bioeconomia circular no setor sucroenergético
Delimitação do Tema			
Mapeamento de rotas tecnológicas para bioeconomia circular para o setor sucroenergético no Brasil			
Referencial Teórico			
Economia Circular	Bioeconomia e Bioeconomia Circular	Rotas Tecnológicas para a Bioeconomia Circular	Setor Sucroenergético
Metodologia			
Linhas Gerais de Pesquisa			
Etapa 1:Caracterizar a Bioeconomia e a Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético	Etapa 2: Identificar Rotas tecnológicas de Bioeconomia Circular	Etapa 3: Identificar rotas tecnológicas para bioeconomia circular no setor sucroenergético	Etapa 4: Analisar rotas tecnológicas para Bioeconomia Circular no Brasil
Resultados			
O trabalho mapeou rotas tecnológicas como digestão anaeróbica e cogeração, destacando seu potencial para otimizar recursos, reduzir resíduos e agregar valor a subprodutos no setor sucroenergético. Os resultados reforçam a contribuição do setor para a sustentabilidade e sua relevância na implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.			
Considerações Finais			
O estudo destaca o potencial do setor sucroenergético na bioeconomia circular, evidenciando tecnologias como digestão anaeróbica e cogeração para otimizar recursos e agregar valor. Alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, o setor tem papel estratégico na transição para uma economia sustentável, com amplo espaço para inovações e colaboração intersetorial.			

Fonte: Autoria própria (2025)

Sendo assim, a seguinte seção apresenta a fundamentação teórica deste estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Economia Circular

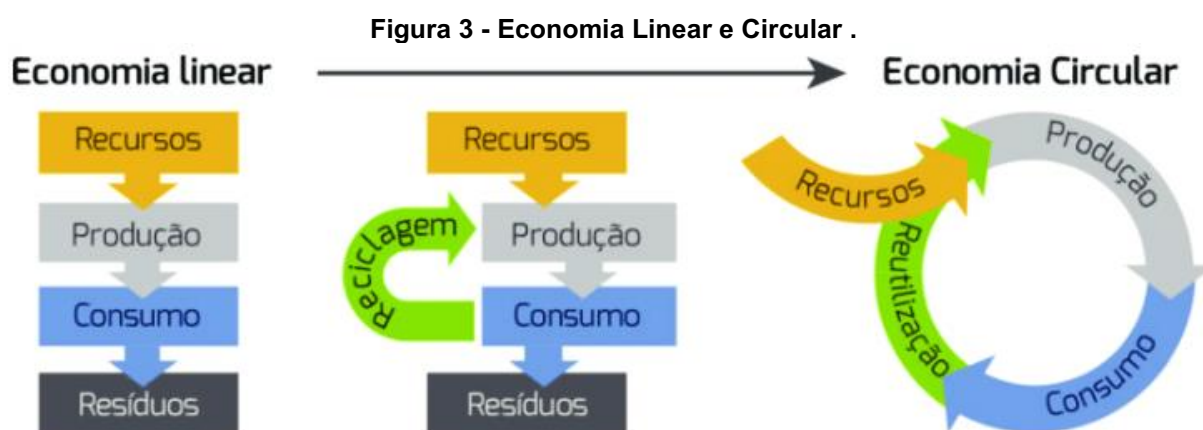
Perspectivas e metodologias de desenvolvimento econômico se tornaram pauta de fóruns políticos e discussões globais nas últimas décadas. Com o avanço do século XXI, a economia circular se consolidou como um tema prioritário em debates globais, especialmente pela sua capacidade de dissociar o crescimento econômico do uso intensivo de recursos naturais e de promover inovação e sustentabilidade. Estudos recentes destacam o papel de tecnologias como inteligência artificial e blockchain na otimização de cadeias produtivas, aumentando a rastreabilidade e a eficiência dos processos circulares (Andrews *et al.*, 2023). Além disso, políticas públicas têm sido fundamentais para incentivar a transição, fomentando colaborações entre diferentes setores econômicos (Johnson; Smith, 2023).

Companhias e pesquisadores entendiam que precisavam aplicar conceitos para atingir a melhor eficiência possível nos processos industriais. Grandes nomes como Taylor e Ford no século XIX e Taiich Ohno e Shigeo Shingo no século XX trouxeram contribuições inestimáveis para o que chamamos hoje de melhoria contínua (Ribeiro, 2017). As teorias de administração aplicadas visavam ganhos econômicos que, consequentemente, com as melhorias nos processos traziam uma otimização no consumo de recursos, porém ainda se utilizava um modelo de consumo linear, no qual o fluxo é baseado em extrair, produzir, utilizar e descartar (Boschi; Pollice; Batocchio, 2020).

Em 1966, no fórum sobre o futuro e qualidade ambiental em economia crescente, que ocorreu em Washington nos Estados Unidos, o economista Kenneth Boulding compara o planeta Terra com uma nave espacial para explicar a relação do modelo econômico com o meio ambiente, apresentando os motivos da crise ambiental que estava sendo vivida (Spash, 2013). Os questionamentos de Boulding incentivaram a busca por oportunidades de revolucionar o modelo de produção linear.

Surge então a economia circular (EC) como uma alternativa para a substituição da economia linear (Boschi; Pollice; Batocchio, 2020) (Figura 3). A EC é formada por uma soma de metodologias como o “berço ao berço” (Mcdonough; Braungart, 2010), a biomimética (Benyus, 1997), a economia de desempenho (Stahel, 2010) e o capitalismo natural (Hawken *et al.*, 1999).

Desta forma, pode-se considerar a EC como restaurativa (EMF, 2017), ou seja, mantém os produtos, componentes e matérias dentro de um ciclo, de forma a minimizar ou erradicar a geração de resíduos (Lemos, 2018, p. 15).



Fonte: DE Assunção (2019)

A EC é separada em dois ciclos - ciclo biológico e técnico. No ciclo biológico, é tido um modelo vivo de produção, que busca replicar a lei de Lavoisier, no qual na natureza 'nada se cria, nada se perde, tudo se transforma' (Lemos; 2018). Dessa forma, todo resíduo é transformado ou reutilizado. O ciclo técnico funciona de maneira similar, porém com um viés de aumento do ciclo de vida e reaproveitamento parcial (EMF, 2013). Avanços recentes nas áreas de biotecnologia e design de materiais têm ampliado as possibilidades de aplicação dos ciclos biológicos e técnicos. Bioreatores avançados e materiais biodegradáveis estão sendo utilizados para potencializar o reaproveitamento de resíduos no ciclo biológico, enquanto tecnologias como impressão 3D e design modular aumentam a eficiência no ciclo técnico, prolongando a vida útil de produtos e componentes (LI *et al.*, 2024).

Deste modo, busca-se mudar os componentes do ciclo técnico para biológico, a fim de aumentar a disposição de matérias primas e introduzir insumos na biosfera (EMF, 2013). Para melhor descrever as possibilidades de reintrodução existentes nos dois ciclos de circularidade tem-se o diagrama borboleta de Macarthur (2013) que pode ser utilizado para mapear as possibilidades de circularidade de qualquer processo ou produto (Figura 4).

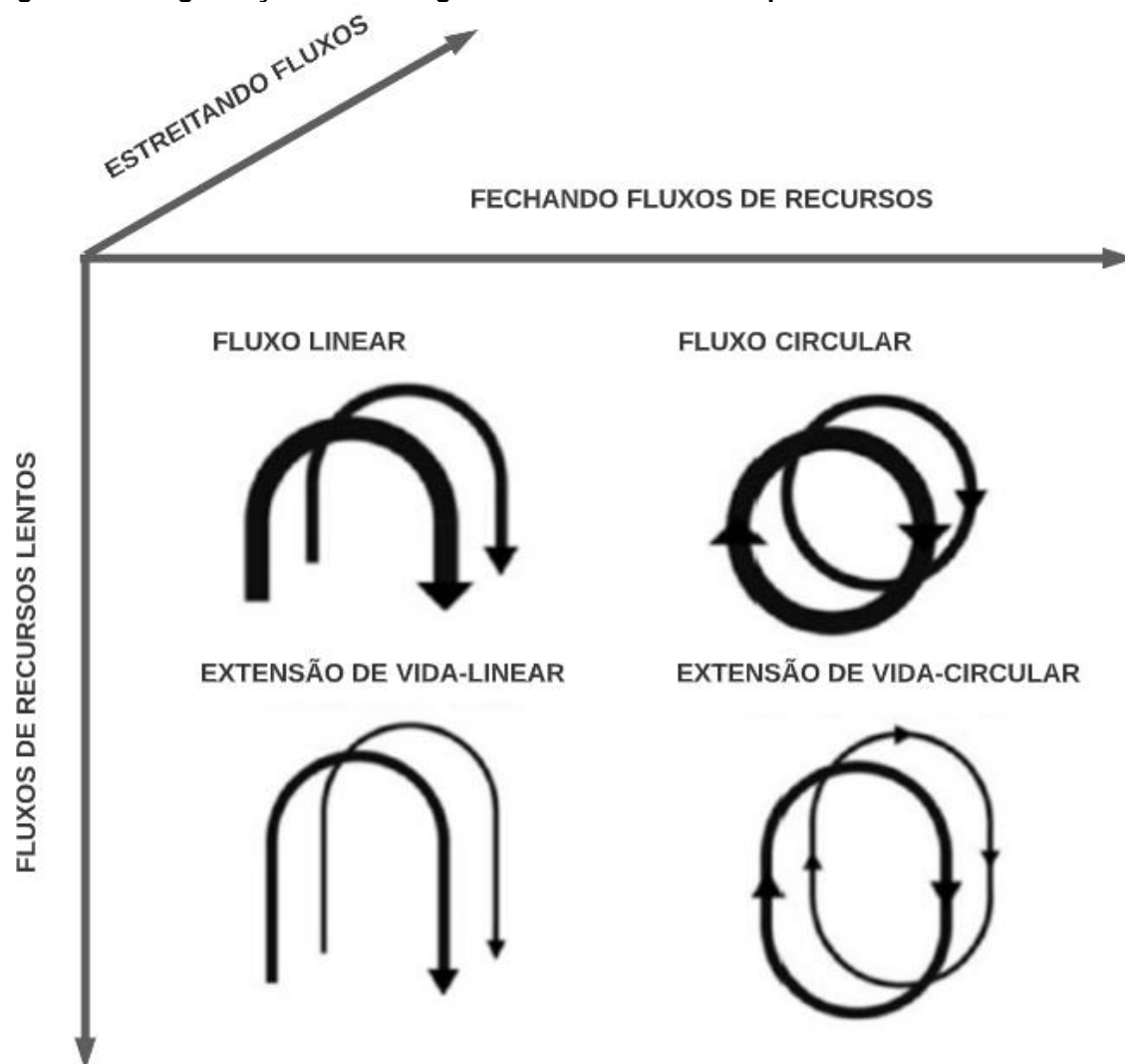
modularidade e adaptabilidade dos recursos, otimizando cada vez mais os componentes, nestes princípios pode-se incluir também o conceito de “design to fit”.

- 3) Inspirar Eficácia no Sistema e Eliminar externalidades negativas desde o início. Para isso, busca-se eliminar os impactos desde a origem dos processos por meio da análise do ciclo de vida, uma das formas de ter sucesso neste princípio é a sistematização dos elementos por meio da combinação de condições e entendendo que práticas econômicas influenciam no funcionamento da própria natureza.

Novas abordagens têm expandido o escopo das ações para circularização. Tecnologias de captura e armazenamento de carbono estão sendo integradas a processos industriais para mitigar impactos ambientais, complementando o uso de fontes renováveis de energia. Essas iniciativas, quando combinadas com práticas já consolidadas, como o design sem resíduos e a resiliência por meio da diversidade, mostram grande potencial para acelerar a transição para um modelo econômico verdadeiramente circular (Zhang *et al.*, 2023).

O processo de transformação de um modelo linear para um modelo circular acontece mediante a aplicação de ações que direcionam à circularização (Figura 5). A aplicação de tais ações transforma e cria modelos de negócio (business models), MacArthur (2017) detalha cinco ações principais baseadas nos princípios da economia circular, estas ações são: ação 01, design sem resíduo; ação 02, criar resiliência por meio da diversidade; ação 03, transitar para o uso de energia proveniente de fontes renováveis; ação 04, pensar em sistemas mudanças das circunstâncias; ação 05, pensar em cascatas.

Figura 5 - Categorização de abordagens lineares e circulares para reduzir o uso de recursos.



Fonte: Adaptado Bocken *et al.*, (2016)

A economia circular tem se tornado um tema central entre líderes empresariais e governamentais, destacando-se como uma estratégia para dissociar o crescimento econômico do consumo de recursos naturais, impulsionar a inovação, fortalecer o desenvolvimento econômico e gerar empregos mais resilientes. Essa abordagem impacta diretamente a sociedade e a maneira como as empresas operam, influenciando suas reputações e estimulando a adoção de modelos de negócios voltados à sustentabilidade e à eficiência. Tais iniciativas promovem inovação e resultados mais alinhados às demandas de sistemas circulares (EMF, 2017).

As estruturas de modelo de negócio foram desmembradas para identificação de estratégias que se adaptassem à economia circular. Salvador (2021) duas formas de alavancar modelos de negócios circulares em empresas, sendo elas as estratégias

de modelos de negócios para diminuir os loops de recursos e estratégias de modelos de negócios para fechar loops.

O primeiro grupo é dividido em três estratégias sendo o primeiro o Modelo de Acesso e Desempenho que se preocupa em trazer uma proposta de valor focada na entrega, o que permite que os usuários desfrutem do produto e as empresas possam introduzir incentivos para redução de ciclos e bens físicos, aumentando os lucros, eficiência energética, reutilização e durabilidade (Richardson, 2005).

A segunda estratégia do primeiro grupo é a ampliação do valor do produto, e geralmente se utilizam da remanufatura para atingir tal objetivo. As empresas consomem material em um menor custo e entregam produtos a um preço mais acessível (Mishra; Mishra, 2022).

A terceira estratégia do primeiro grupo é um modelo clássico de longa vida que busca durabilidade e reparo, de forma a incentivar a suficiência de um produto de longa duração. O objetivo é diminuir o consumo e substituir as vendas por níveis elevados de serviço, mudando o parâmetro de valor agregado (Mishra; Mishra, 2022).

O segundo grupo de estratégia contém duas estratégias principais, sendo a primeira a extensão do valor do recurso, na qual a proposta de valor está na utilização de resíduos como matéria prima, atraindo o público “verde”. A segunda estratégia é a simbiose industrial, que diferente das outras que estão orientadas ao valor agregado dos produtos, possui foco nos processos, esta estratégia busca transformar todas as saídas de um processo em matéria prima para outro processo ou indústria. Estas práticas ocorrem geralmente em negócios que possuem proximidade geográfica e são sustentadas por acordos corporativos de compartilhamento de serviço e troca de subproduto, trazendo vantagens para todos os negócios envolvidos por meio de uma redução conjunta de custos e um impacto ambiental reduzido (Mishra; Mishra, 2022).

Além das estratégias mencionadas, plataformas colaborativas vêm ganhando destaque como forma de conectar empresas e facilitar o compartilhamento de recursos e subprodutos. Essa abordagem promove a simbiose industrial e reduz os custos operacionais, especialmente em cadeias produtivas geograficamente próximas. Indicadores de circularidade mais robustos também estão sendo desenvolvidos para mensurar o progresso das empresas rumo à economia circular, proporcionando maior clareza e assertividade nas decisões estratégicas (García-Pérez *et al.*, 2024). Essas novas ferramentas de mensuração auxiliam as empresas a

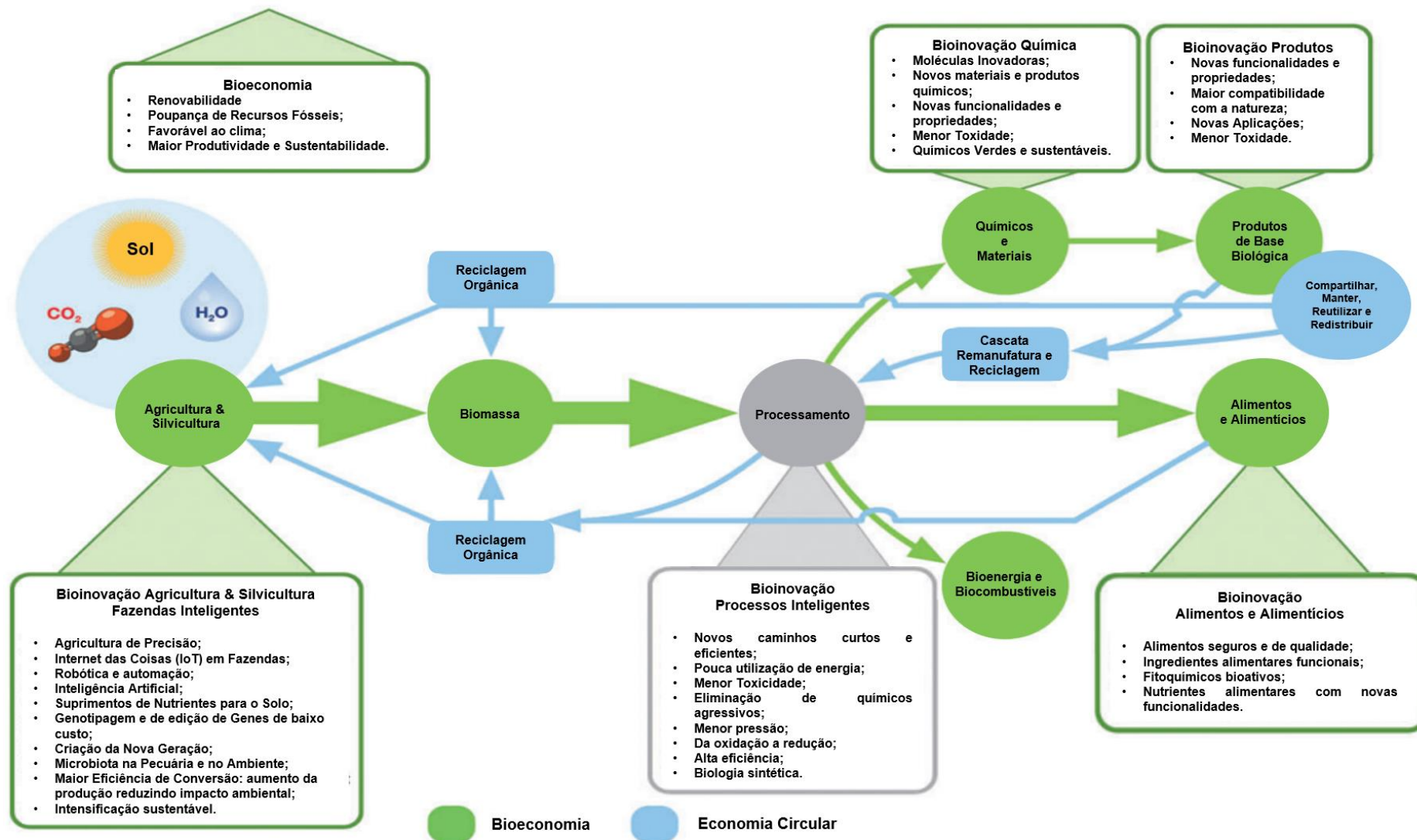
identificar oportunidades de melhoria e otimização de processos, contribuindo para uma transição mais eficiente para modelos de negócios circulares.

2.2. Bioeconomia e Bioeconomia Circular

Como visto nos princípios da economia circular, uma economia baseada em recursos renováveis reduz os encargos ambientais. A bioeconomia traz uma visão de biotecnologia, bio-recursos e bioecologia com foco na redução dos fluxos de resíduos e no desenvolvimento de novas cadeias de valor econômico com base nos fluxos de bio-recursos existentes, contribuindo significativamente para a economia circular (Bugge *et al.*, 2016). Atualmente, em todo o mundo, o desenvolvimento da bioeconomia é visto como uma ótima estratégia para otimizar processos e desacelerar o desequilíbrio ambiental através de recursos biológicos. Segundo a OECD (2022), a bioeconomia está cada vez mais integrada à revolução digital, permitindo que tecnologias como biotecnologia sintética, bioinformática e captura de carbono sejam aplicadas de forma sustentável em diversos setores industriais. Isso potencializa os resultados positivos do seu desenvolvimento, sendo cada vez mais reconhecida como um meio de satisfazer as necessidades humanas em meio aos desafios ambientais (Evangelista, 2021).

A bioeconomia visa o desenvolvimento sustentável de recursos biológicos para alcançar o equilíbrio ambiental e a preservação da biodiversidade, buscando eficiência por meio da tecnologia e manutenção de seus recursos. A União Europeia, por exemplo, tem implementado estratégias de bioeconomia que integram políticas agrícolas e industriais, destacando iniciativas como o uso de resíduos agrícolas para a produção de biocombustíveis (European Commission, 2023). A abordagem da bioeconomia também se concentra na funcionalidade de produtos ou serviços de base biológica e, ao focar em resíduos biológicos, cria um efeito cascata que transforma o conceito de bioeconomia circular (Figura 6). Assim, bioeconomia e economia circular podem contribuir em diversos âmbitos uma para a outra, com produtos biodegradáveis que retornam ao ciclo biológico, aumentando a reciclabilidade de materiais não renováveis, como bioplásticos e bio-óleos (Carus; Dammer, 2018).

Figura 6 - Interface entre Bioeconomia e Economia Circular.



Fonte: Adaptado de Carus e Dammer (2018)

Em um contexto de bioeconomia circular (BEC), os recursos biológicos se tornam retornáveis, geridos de forma sustentável, recuperados e reutilizados na medida do possível, originando uma bioeconomia sustentável com mais oportunidades a partir da circularidade de seus recursos (Evangelista, 2021). Apesar de promissora, a transição para a bioeconomia circular enfrenta desafios significativos, como a resistência cultural às mudanças tecnológicas, a falta de infraestrutura adequada e os altos custos iniciais de implantação (EMF, 2022).

No Brasil, destaca-se o grande potencial de desenvolvimento bioeconômico, impulsionado pela vasta biodiversidade e pela força do agronegócio. O país possui uma das maiores variedades genéticas de vegetais do mundo, com mais de 42 mil espécies vegetais distribuídas em seus diferentes biomas (Flora, 2017). A cadeia produtiva da cana-de-açúcar, por exemplo, é um exemplo relevante, gerando bioenergia e contribuindo para a economia local. Em 2016, a renda associada a este setor foi de R\$ 164,1 bilhões, abrangendo produção primária, indústria e serviços (Silva; Pereira; Martins, 2018). Empresas como GranBio e Raízen têm liderado investimentos em bioeconomia no Brasil, com usinas de etanol de segunda geração, como a da GranBio, capaz de produzir 82 milhões de litros de biocombustíveis por ano (Silva; Pereira; Martins, 2018).

De acordo com a CNI (2023), o Brasil também tem investido em startups e tecnologias voltadas à bioeconomia, consolidando-se como líder na produção sustentável de bioenergia. Além disso, a publicação da Lei 13.123/2015, conhecida como Lei da Biodiversidade, trouxe avanços significativos ao reduzir incertezas jurídicas e estimular investimentos na bioeconomia local (Brasil, 2015).

Portanto, para alcançar todo o potencial da bioeconomia circular, é necessário buscar sinergia entre o digital, o biológico e o físico, promovendo tecnologias disruptivas como inteligência artificial e simbiose industrial (World Economic Fórum, 2023). O uso de inteligência artificial para mapear e otimizar fluxos biológicos é uma tendência crescente, promovendo maior eficiência na interação entre diferentes setores industriais (Evangelista, 2021). Dessa forma, a bioeconomia circular se apresenta como uma solução inovadora para integrar crescimento econômico e sustentabilidade ambiental.

2.3. Rotas tecnológicas para a Bioeconomia Circular

A tecnologia, bem como a informação, tornou-se moeda de troca de grande valor agregado para as instituições e organizações atuais (Firat; Woon; Madnick, 2008). Como tudo que gera valor ao negócio, pesquisadores, gestores e instituições ao perceberem que necessitavam estar à frente na corrida pela previsão da evolução tecnológica deram início ao desenvolvimento de métodos para mapear nas tecnologias os impactos e aplicações dentro das organizações (Firat; Woon; Madnick, 2008).

Na década de 60, deram início as previsões econômicas e perspectivas de mercado para prospecção financeira (Amparo *et. al.*;2012). Com ênfase na previsão tecnológica de gestão para minimizar ameaças as organizações (Isenson;1969). Sendo assim, entendeu-se que a capacidade de previsão da projeção tecnologia teria um fator dominante para a competitividade de mercado (Amparo *et. al.*,2012).

Diante de tantas pesquisas voltadas a previsão tecnológica, desenvolveu-se formas de extrair informações e construir análises a partir de dados de forma a encontrar padrões que permitiram Firat; Woon e Madnick (2008) levantar os principais impactos no desenvolvimento tecnológico para as organizações, sendo eles:

- 1) Priorizar os investimentos em P&D;
- 2) Planejar o desenvolvimento de novos produtos;
- 3) Analisar as etapas da concorrência;
- 4) Tomar decisões estratégicas sobre licenciamento de tecnologia;
- 5) Avaliar potenciais joint ventures, spin-offs ou acordos de parceria etc.

Para Castells (1999), a convergência entre tecnologia, informações e comunicação gerou uma lógica organizacional voltada a modelos de gestão da economia da informação, foi então que surgiu o termo prospecção tecnológica, que é a capacidade de incorporar informação para predizer condições e mutações tecnológicas que afetarão as metas organizacionais em estados futuros.

Sendo assim, o tratamento de informações por meio de métodos bibliométricos, matemáticos e estatísticos, qualitativos ou quantitativos, tornaram-se fundamento importante para boa execução de um estudo de prospecção tecnológica (Amparo *et. al.*;2012).

Kupfer e Tigre (2004) descrevem que a prospecção tecnológica pode ser classificada em três grupos, sendo eles:

- 1) monitoramento (Assessment): é a fase de construção de uma fotografia das tecnologias existentes por meio, muitas vezes, do monitoramento e acompanhamento de novas patentes;
- 2) previsão (Forecasting), utiliza muitas vezes o mapeamento e a construção de cenários de aplicação de tecnologia de forma preditiva, baseando-se em histórico de utilização;
- 3) visão (Foresight), antecipa projetos futuros e aperfeiçoamento das tecnologias existentes, e pode ser considerado uma etapa de maior influência na competitividade.

Um método extremamente utilizado para os estudos de prospecção tecnológica é o mapeamento de rotas (roadmapping) que constitui inúmeras vantagens, ao passo que proporciona uma integração entre toda a equipe – financiadores, gestores e responsáveis, além de, principalmente, possibilitar a reestruturação do plano durante o processo de execução (Fellows, 2017).

O mapeamento permite uma avaliação crítica através de um mapa de riscos, prevendo cenários desfavoráveis e recalculando a rota de implementação do plano. Além disso, proporciona à comunidade envolvida uma ampla comunicação entre negócios, planos e produtos tecnológicos (Fellows, 2017).

A utilização do roadmapping como ferramenta para estruturar documentos de análise de prospecção de tecnologia possibilitou o levantamento de rotas tecnológicas para inúmeros setores, criando um conceito que é aplicado para traduzir diferentes objetivos (Radnor; 1998).

As rotas tecnológicas surgiram com o objetivo de visualizar o potencial tecnológico das empresas através de uma avaliação direcionada, visando explorar a dinâmica das tecnologias emergentes na indústria de acordo com a sua capacidade, necessidade e objetivo empresarial (Fellows, 2017). Portanto, a rota tecnológica é uma ferramenta de apoio a uma equipe encarregada de desenvolver um produto ou processo, garantindo que as tecnologias serão identificadas da forma correta para que as oportunidades e limitações de desenvolvimento de certa atividade sejam visualizadas, possibilitando um melhor planejamento estratégico - competências e tecnologias necessárias são disponibilizadas no momento adequado (Fellows, 2017).

O método de mapeamento é impulsionado pelo mercado, ou seja, pelas inovações tecnológicas necessárias para atender o mercado futuro - desenvolvimento de objetivos através do potencial tecnológico e interação com o mercado. As rotas

podem até mesmo fornecer caminhos alternativos, permitindo a continuidade das atividades sem o abandono do planejamento estratégico, caso um caminho se revele inviável (Fellows, 2017).

O mapeamento de rotas tecnológicas fornece informações que permite tomar melhores decisões sobre possíveis investimentos nas áreas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) das empresas, identificando gaps existentes e formas de alavancar o investimento - as decisões tecnológicas são incorporadas como parte integral do plano (Fellows, 2017).

Diante disso, a avaliação das rotas tecnológicas considera o intervalo de tempo como referência para identificação e capacidade de recursos - relacionando estratégias de negócios e dados do mercado; revelando lacunas no desenvolvimento do plano; auxiliando na priorização dos investimentos com base em fortes tendências e organizando um conjunto mais realista de objetivos, considerando a natureza competitiva do mercado (Fellows, 2017).

Dentre a abrangência das rotas tecnológicas, temas como a EC afunilam a fundamentação das pesquisas de forma que para apoiar esses temas as rotas tecnológicas são respaldadas no desenvolvimento sustentável, visando reverberar suas três ênfases: sociedade, economia e meio ambiente (Belini *et al.*, 2004).

As rotas tecnológicas sustentáveis exploram soluções já existentes no sistema de gestão, no entanto, focando em trazer solução para dificuldades futuras (WCED, 1987), de forma a fomentar para a geração de empregos minimizando passivos ambientais e aumentando a produção de renda, com o intuito de atingir um equilíbrio social e ambiental (Samuel *et al.*, 2012).

Como as rotas tecnológicas constituem um conjunto de processos, tecnologias e recursos, em um viés de sustentabilidade, tende-se avaliar as peculiaridades e características de cada localidade e setor, de forma a construir um arranjo tecnológico mais adequado às realidades de aplicação (Conceição, 2018).

Estas adequações remetem a um dos conceitos que constituem a EC, o conceito de simbiose industrial, no qual as rotas tecnológicas podem ser um meio para a identificação de oportunidades de vínculo e interação entre tecnologias de diferentes organizações (Farias, 2018). De forma, que a simbiose não se restrinja somente a troca de inputs e outputs, mas também a colaboração para a competitividade no âmbito de prospecção tecnológica (Farias, 2018).

O Quadro 1 mostra um mapeamento de oportunidades através das principais frentes tecnológicas encontradas no setor. Com o objetivo de validar estas tecnologias no setor, buscou-se por pesquisas que tragam direcionamento para possível desenvolvimento ou adaptação de rotas tecnologias para bioeconomia circular.

Quadro 1 - Mapeamento de Oportunidade de Tecnologias.

Oportunidade de Rotas tecnológicas para a bioeconomia circular	Tecnologia	Fonte
Avaliação técnico-econômica da produção de biometano a partir da vinhaça na indústria brasileira de bioetanol, considerando cinco rotas tecnológicas de aproveitamento do biogás	Digestão Anaerobia	Leme (2017)
Examina as configurações técnicas mais promissoras para a produção de bioenergia a partir do bagaço da cana-de-açúcar.	Combustão	Dantas et. al (2013) e Faaij (2006)
Produção combinada de biocombustíveis de segunda geração e eletricidade a partir de resíduos da cana-de-açúcar.	Gaseificação	Walter e Ensinas (2010) e Dantas et.al. (2013)
Propriedades químicas do bio-óleo que são dependentes da composição do substrato da biomassa.	Liquefação Hidrotermal	Toor et.al. (2011)
Conversão de resíduos orgânicos (biomassa) em biocombustíveis ou outros compostos químicos por meio de processos de compostagem.	Compostagem	Pavan et.al. (2021)
Pirólise da biomassa, para destinação dos resíduos orgânicos provindos dos setores agrícolas, resultante de material vegetal e de resíduos orgânicos da indústria de produção animal e cidades.	Pirolise	Proença (2017)
Exploraração da produção de biogás em um reator ou tanque ou biorreator fechado.	Bioreatores	Junior (2022)
Sistema de cogeração, com maior eficiência das caldeiras e outras abordagens de projeto desses sistemas, como a inclusão de secadores de bagaço, bem como incluindo a integração do processo de energia para reduzir o custo da planta consumo de vapor.	Coogeração	Palacios-Bereche (2022) e Ensinas et.al. (2014)
Tecnologia do etanol 2G consiste na extração e processamento de açúcares fermentáveis a partir de material lignocelulósico.	Etanol de Segunda Geração	Silva et. al. (2019) e Dantas et. al (2013)
Tratamento térmico garante otimização operacional dos biodigestores. Tratamento térmico de substratos otimiza a operação do biodigestor.	Tratamento Térmico	Kunz et. al. (2022)

Fonte: Autoria própria (2025)

O intuito deste quadro é trazer uma visão específica através de exemplificações de oportunidades tecnológicas existentes - o entendimento de que as pesquisas em outros setores podem proporcionar um ótimo direcionamento para desenvolvimento de novas rotas tecnológicas no setor sucroenergético.

2.4. Setor sucroenergético

O setor industrial possui um papel indispensável na economia mundial e é responsável por mais de um terço do consumo de recursos energéticos globais (Chauhan, 2011). A maior parte da energia utilizada pelas indústrias ainda é proveniente de fontes fósseis, como carvão, petróleo e gás (Chauhan, 2011). Isso reforça a necessidade de práticas de gestão energética que priorizem a eficiência e a sustentabilidade, uma tendência intensificada pelas metas de neutralidade de carbono estipuladas por organizações como a ONU e a União Europeia (IEA, 2023). Dessa forma, a utilização de energia residual para melhorar a eficiência energética dos processos industriais tornou-se uma das principais preocupações das organizações, especialmente diante da pressão por políticas ambientais mais rigorosas (IEA, 2023).

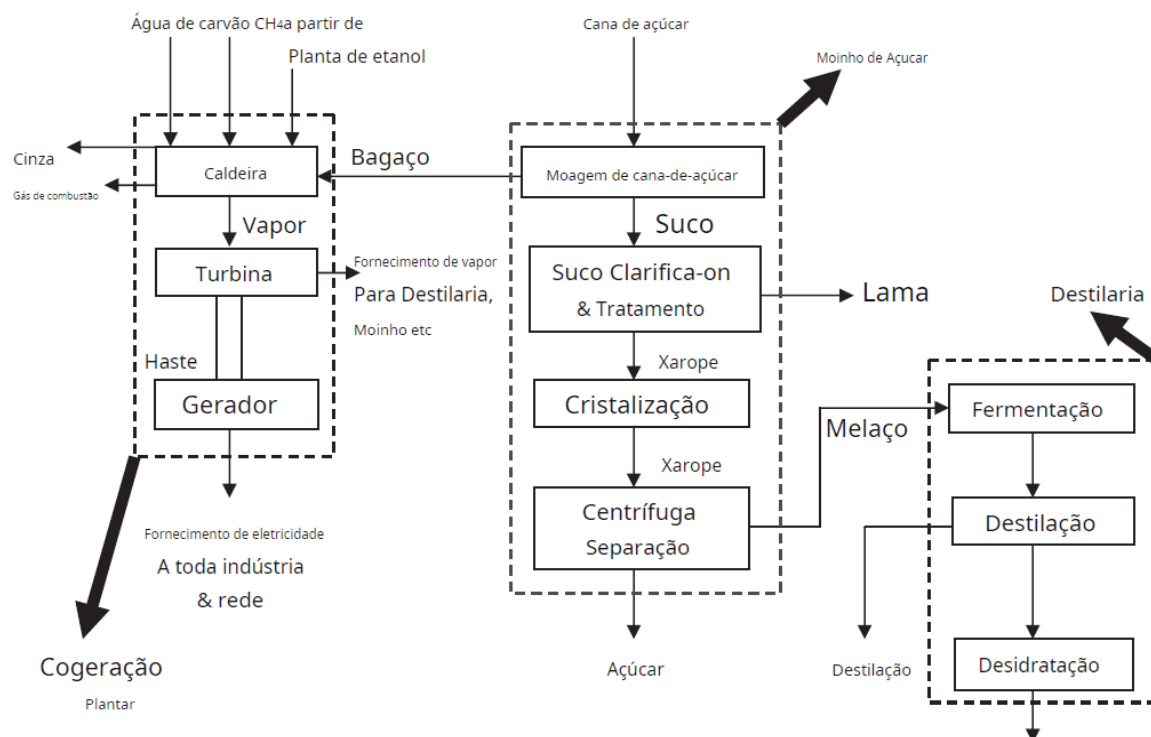
O setor sucroenergético, que hoje possui grande representatividade nas pesquisas de eficiência energética, é uma das indústrias mais antigas da história, com registros de extração de açúcar da cana pelos oficiais de Alexandre "o Grande" em 325 a.C. (Castro, 2013). Por muitos anos, o açúcar foi considerado uma especiaria de luxo, até que sua produção se expandiu durante o período colonial no Brasil, tornando-se um dos pilares econômicos do país (Castro, 2013).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de açúcar e etanol do mundo, com a cana-de-açúcar sendo uma das principais matérias-primas utilizadas em zonas tropicais (MAPA, 2023). A produção nacional está em constante crescimento, alavancada por políticas públicas como o programa RenovaBio, que estimula a produção sustentável de biocombustíveis e contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa (MAPA, 2023). No contexto global, países como Índia, Tailândia, Austrália e China também desempenham papéis importantes na produção de açúcar, representando quase 40% da produção mundial (Chauhan, 2011).

Além do açúcar, o setor sucroenergético se destaca pela produção de subprodutos de alto valor agregado, como o etanol, a bioeletricidade e o biogás, obtidos a partir da biomassa residual, como o bagaço e a vinhaça. Essa integração transformou as usinas em complexos industriais multifuncionais, com alta

circularidade em seus processos (UNICA, 2023). Segundo Piacente e Piacente (2021), a indústria açucareira evoluiu ao longo das décadas, incorporando atividades de cogeração de energia térmica e elétrica, consolidando-se como a indústria sucroenergética que conhecemos hoje.

Figura 7 - Processos Sucroenergéticos.



Fonte: CHAUHAN (2011)

No Brasil, fatores históricos e climáticos contribuíram para o desenvolvimento robusto desse setor. A introdução de políticas ambientais globais, como as promovidas pela Rio-92, também impulsionou o uso de etanol como biocombustível e o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis derivados da cana-de-açúcar (E Silva; Bomtempo; Alves, 2019). Mais recentemente, iniciativas como o programa "Descarboniza Brasil" têm promovido investimentos em tecnologias inovadoras e na bioeconomia para o setor sucroenergético, ampliando as possibilidades de integração de sistemas digitais e energias renováveis (CNI, 2023).

Apesar das dificuldades enfrentadas pelo setor, como altos custos de implementação e legislações específicas, as usinas estão cada vez mais abertas a inovações que maximizem suas receitas e melhorem a sustentabilidade. Tecnologias voltadas à biomassa e à economia circular são os principais focos, com avanços recentes em biodigestores e sistemas de captura de carbono, que estão transformando resíduos em fontes de energia limpa (IEA, 2023).

Assim, o setor sucroenergético brasileiro consolida-se como um exemplo global de economia circular. Contudo, o pleno aproveitamento das oportunidades requer maior alinhamento entre políticas públicas, pesquisa e desenvolvimento tecnológico, além de cooperação entre os diferentes agentes da cadeia produtiva (E Silva; Bomtempo; Alves, 2019; MAPA, 2023).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o mapeamento de rotas tecnológicas com base em patentes. Para alcançar os objetivos pretendidos, foi feito o uso do método detalhado nas próximas seções.

3.1. Linhas Gerais da Pesquisa

A presente pesquisa é classificada como uma natureza de contribuição aplicada, envolvendo verdades e interesses do setor sucroenergético. Seus objetivos possuem características descritivas e exploratórias, tendo como foco a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso para caracterização e levantamento de dados sobre bioeconomia circular em um setor específico - a partir de uma pesquisa explicativa e sistemática, que busca por conceitos de bioeconomia circular e rotas tecnológicas para embasar a pesquisa. O estudo utilizará de análises quantitativas e qualitativas para chegar ao seu objetivo final.

Quadro 2 - Classificação da Pesquisa Realizada.

Critério	Classificação
Natureza	Básica
Objetivos	Descritiva e Exploratória
Abordagem	Qualitativa-Quantitativa
Procedimentos	Bibliográfica

Fonte: Elaboração própria a partir de GERHARDT & SILVEIRA (2009)

A pesquisa foi classificada como básica em sua natureza porque busca gerar conhecimento teórico sobre a bioeconomia circular e suas rotas tecnológicas, sem a aplicação direta no mercado. Quanto aos objetivos, a pesquisa é descritiva e exploratória, pois investiga e descreve o cenário da bioeconomia circular no setor sucroenergético, identificando tendências e oportunidades tecnológicas. A abordagem é qualitativa-quantitativa, pois combina análises de literatura e patentes (qualitativo) com dados quantitativos para mapear rotas tecnológicas. Por fim, os procedimentos são bibliográficos, pois se baseiam na revisão sistemática da literatura e na análise de bases de dados científicas e de patentes para fundamentar as conclusões do estudo.

Apesar de apresentar resultados de duas abordagens, a grande maioria das análises terá caráter qualitativo, ou seja, além de medir o desempenho de algo de forma assertiva, tem também o objetivo de o descrever e mapear rotas tecnológicas no setor.

3.2. Metodologia de Elaboração da Pesquisa

Este trabalho visa identificar oportunidades de rotas tecnológicas para o desenvolvimento da bioeconomia circular nas empresas do ramo sucroenergético. Para isso, foi realizada a caracterização da bioeconomia de forma geral e contextualizada ao ambiente sucroenergético, a fim de identificar atividades que possam gerar oportunidades sustentáveis e econômicas no setor. Após isso, serão analisadas as possíveis rotas tecnológicas para a implementação da bioeconomia circular, buscando agregar valor e avaliar meios que possibilitem maior sustentabilidade e oportunidade de reutilização/reciclagem dos recursos e resíduos biológicos da produção e produto.

Para realizar a avaliação das rotas tecnológicas, serão levadas em consideração as entradas e saídas dos processos produtivos do setor sucroenergético e a possibilidade de trocas entre as empresas para estimular a produção de novos produtos com valor agregado, buscando aumentar a eficiência biológica do setor. Serão analisadas as oportunidades de investimento que poderiam resultar em novos negócios ou em uma produção de menor custo com o desenvolvimento da sustentabilidade, talvez descobrindo novos mercados ou meios de reutilizar ou agregar valor ao produto.

Diante disso, o Quadro 3 apresenta as principais etapas desta pesquisa.

Quadro 3 - Etapas de Pesquisa.

Etapas	Objetivo Específico	Método/Metodologia
1	Caracterizar Bioeconomia Circular.	Neste estudo, investigamos a bioeconomia circular de forma teórica e prática, buscando informações, mapeando empresas e identificando oportunidades de mudança. A revisão sistemática da literatura oferece uma visão ampla, com dados práticos para novas interpretações e contribuições para o desenvolvimento da bioeconomia circular, especialmente no Setor Sucroenergético.
2	Identificar Rotas Tecnológicas de Bioeconomia Circular.	Neste estudo, utilizamos a metodologia de "roadmap tecnológico" de Radnor (1998) e a análise de patentes de Lee (2013) para identificar meios por onde a bioeconomia circular se desenvolve. O processo inclui a identificação de patentes, análise de citações por empresas e visualização de redes entre elas para mapear eficientemente as relações e rotas tecnológicas na bioeconomia circular, e a aplicação do módulo de colaboração de Lee (2013) para mapear as rotas tecnológicas de bioeconomia circular
3	Caracterizar Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético.	Após identificadas as rotas tecnológicas para Bioeconomia circular pelo módulo de colaboração, aplica-se o módulo de transferibilidade de Lee (2013), vinculando tecnologias a indústrias, analisando patentes e criando um mapa para orientar a colaboração, maximizando a aplicabilidade no setor sucroenergético.
4	Discutir Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético.	O estudo das rotas tecnológicas brasileiras para a bioeconomia circular, com foco no setor sucroenergético, adotará a abordagem abrangente da technology roadmapping. Buscando compreender profundamente a circularidade, a metodologia identifica lacunas em relação a práticas internacionais. O objetivo é fornecer insights estratégicos para impulsionar a sustentabilidade nesse setor-chave da matriz energética brasileira descobrindo novos mercados ou meios de reutilizar ou agregar valor ao produto de maneira otimizada.

Fonte: Autoria própria (2025)

Sendo assim, os tópicos a seguir trarão de forma detalhada o método aplicado em cada uma das etapas.

3.2.1. Etapa 1: Caracterização Bioeconomia Circular.

A caracterização da bioeconomia circular foi desenvolvida a partir do levantamento de informações teóricas e práticas, buscando compreender tanto os conceitos quanto as aplicações reais desse modelo. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura em bases acadêmicas de grande relevância, como Scopus, Science Direct, Web of Science e SciELO. Esse processo teve como objetivo explorar os principais termos relacionados à bioeconomia circular e à sustentabilidade, além de mapear empresas que exercem práticas alinhadas a esse conceito.

A revisão sistemática utilizou combinações de palavras-chave que incluíram termos como "bioeconomy", "circular economy", "technological routes", "industrial waste", "companies", entre outros, a fim de identificar um conjunto abrangente de estudos relevantes. Visto isso, são utilizadas para busca, as seguintes combinações:

- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND ("technological routes" OR "technology routes")
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "industrial waste"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "companies"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "improvement"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "alternative"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "mapping"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "agro-industry"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "alternative products"
- ("bioeconomy" OR "circular economy") AND "Brazil"

A busca inicial resultou em 7.462 artigos. Após a remoção de duplicatas, os títulos foram avaliados para excluir os não alinhados ao tema, seguidos pela leitura dos resumos. Esse processo resultou na seleção de 58 artigos para análise detalhada.

Esse levantamento bibliográfico foi fundamental para capacitar os pesquisadores a identificar lacunas na literatura e oportunidades de mudança. Além disso, buscou-se informações práticas que complementassem os resultados teóricos, possibilitando novas interpretações e contribuindo para o desenvolvimento da bioeconomia circular. A integração das informações obtidas permitiu mapear as

principais tendências, práticas e desafios, promovendo insights que enriquecem o entendimento do tema.

Além disso, foram utilizadas informações de estudos de caso provenientes de diversas fontes de renome, que trouxeram exemplos concretos de empresas e iniciativas alinhadas à bioeconomia circular. Relatórios da EMF, da International Renewable Energy Agency (IRENA) e da FAO forneceram uma base teórica sólida e estudos de caso práticos sobre a aplicação da circularidade em diferentes contextos. No Brasil, relatórios da Embrapa e da UNICA foram essenciais para entender as práticas de circularidade no setor sucroenergético. Empresas como Raízen, GranBio e Braskem foram destacadas, apresentando exemplos inovadores de reaproveitamento de biomassa, produção de biocombustíveis e biopolímeros. Esses casos práticos contribuíram diretamente para o aprofundamento da análise e para a identificação de práticas e soluções sustentáveis no contexto da bioeconomia circular.

Esse processo de integração das informações teóricas e práticas foi fundamental para compreender o impacto real da bioeconomia circular e para identificar as principais oportunidades de inovação e desenvolvimento nesse modelo.

3.2.2. Etapa 2: Identificação de rotas tecnológicas para bioeconomia circular

Essa metodologia teve como objetivo identificar rotas tecnológicas que viabilizassem a bioeconomia circular, utilizando a combinação de "roadmaps" tecnológicos (Radnor, 1998) e a análise de patentes (Lee, 2013) através das seguintes combinações, "technological routes" AND "brazil", ("Biomass" OR "recycling" OR "residue" OR "reuse" OR "bioproducts" OR "Bioeconomy") AND ("sugarcane" OR ("sugarcane AND "energy") OR "technological, ("Biomass" OR "recycling" OR "residue" OR "reuse" OR "bioproducts" OR "Bioeconomy") AND ("sugarcane" OR "technological routes" OR "circular economy" OR "brazil") AND "sustainability".

A integração dessas ferramentas foi estruturada em módulos interdependentes que abrangeram o levantamento e organização das patentes, a elaboração de mapas de relações tecnológicas e a análise de transferibilidade tecnológica. Cada módulo foi descrito de forma detalhada a seguir.

3.2.2.1. Colaboração: mapeamento de relações tecnológicas

O módulo de colaboração teve como finalidade identificar as relações entre tecnologias e empresas envolvidas em pesquisas e inovações para a bioeconomia circular, utilizando a análise de patentes como ferramenta principal. Inicialmente, foram realizadas buscas em bases de dados de patentes, como Patentscope, Espacenet, Google Patents, JPTO, USPTO e INPI, para identificar tecnologias relevantes à bioeconomia circular no setor sucroenergético. Essa busca foi guiada por palavras-chave como "bioprodutos", "tecnologias limpas" e "energia renovável". As patentes selecionadas foram organizadas e classificadas de acordo com as áreas tecnológicas de aplicação.

Após a identificação das patentes, realizou-se uma análise de citações para compreender como as tecnologias se relacionavam entre si e identificar as empresas ou instituições que lideravam o desenvolvimento tecnológico. Essa análise foi crucial para mapear os fluxos tecnológicos e as redes de colaboração existentes. Com esses dados, foram gerados mapas de relações tecnológicas, utilizando ferramentas como Gephi ou VOSviewer, que auxiliaram na visualização das interações entre empresas, tecnologias e áreas de pesquisa. O resultado foi um mapa que destacou as conexões tecnológicas relevantes para a bioeconomia circular.

3.2.2.2. Transferibilidade: análise de transferência tecnológica

O módulo de transferibilidade teve como objetivo identificar o potencial de transferência de tecnologias entre diferentes setores e empresas, promovendo a aplicação de inovações em contextos industriais variados. Este módulo iniciou-se com a classificação das tecnologias identificadas no módulo anterior em categorias industriais relevantes. A relação entre essas tecnologias e as demandas das indústrias foi analisada com base em sua viabilidade técnica, adequação às tendências de mercado e impacto na sustentabilidade.

Posteriormente, foi realizada uma análise aprofundada das interações entre as tecnologias patenteadas e diferentes setores industriais. Isso incluiu o exame das citações cruzadas entre patentes e a identificação de padrões de colaboração entre empresas. Com base nesses dados, foi desenvolvido um mapa de portfólio que destacou as indústrias com maior potencial para a transferência de tecnologias. Este mapa forneceu diretrizes para promover colaborações tecnológicas entre diferentes

setores, facilitando a difusão de inovações e maximizando a eficiência de investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

3.2.2.3. Integração dos resultados e elaboração de rotas tecnológicas

Com os dados obtidos nos módulos anteriores, esta etapa integrou os resultados para traçar rotas tecnológicas que promovessem a bioeconomia circular no setor sucroenergético. Inicialmente, os mapas de relações tecnológicas e de transferibilidade foram consolidados em um único documento. Essa consolidação permitiu identificar sobreposições, lacunas e oportunidades que orientaram a definição de prioridades tecnológicas.

A partir dessa consolidação, as tecnologias foram classificadas de acordo com seu impacto ambiental, relevância econômica e contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). As rotas tecnológicas foram então traçadas com base nesses critérios, descrevendo as etapas necessárias para a implementação de cada rota e destacando os desafios e oportunidades associados. Este processo resultou em um conjunto de diretrizes que orientaram a transição para a bioeconomia circular no setor sucroenergético, promovendo maior sustentabilidade, eficiência e competitividade.

Essa metodologia, baseada em "roadmaps" tecnológicos e análise de patentes, ofereceu um modelo robusto e integrado para identificar rotas tecnológicas que viabilizassem a bioeconomia circular. Ao combinar aspectos técnicos e de mercado, permitiu mapear soluções existentes e propor inovações que maximizaram a sustentabilidade e a competitividade no setor sucroenergético.

3.2.2.4. Etapa 3: Caracterização da bioeconomia circular no setor sucroenergético

Para caracterizar a bioeconomia circular no setor sucroenergético, utilizou-se a mesma metodologia da etapa 1, porém com um foco mais direcionado. As buscas nas bases de dados foram ajustadas para priorizar estudos e casos relacionados a práticas e tecnologias específicas da biomassa de cana-de-açúcar, reaproveitamento de resíduos agroindustriais e estratégias de circularidade nesse setor.

As combinações de palavras-chave, foram utilizadas para identificar estudos relevantes. Esse recorte possibilitou localizar pesquisas que abordam o uso de

bagaço e palha da cana-de-açúcar na produção de bioenergia, além de estratégias voltadas à geração de valor agregado a partir de resíduos.

A análise permitiu mapear as principais práticas de circularidade no setor sucroenergético, destacando iniciativas inovadoras e os desafios para a implementação da economia circular em larga escala. Além disso, contribuiu para identificar como a bioeconomia circular pode ser promovida nesse contexto, trazendo novas perspectivas e oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias e processos mais sustentáveis.

3.2.2.5. Etapa 4: Discussão das Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético.

A discussão sobre as rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor sucroenergético exige uma abordagem abrangente e integrada, que permita compreender as oportunidades e desafios desse setor essencial para a matriz energética brasileira. Para isso, foi adotada a metodologia de "technology roadmapping" (Radnor, 1998), integrada aos módulos de colaboração e transferibilidade propostos por Lee (2013). Essa combinação metodológica possibilitou uma análise detalhada e multidimensional, contemplando mercados, produtos, tecnologias e recursos biológicos no contexto da promoção da circularidade.

A abordagem adotada não se limitou ao mapeamento de tecnologias em uso no setor sucroenergético, mas também buscou identificar lacunas e oportunidades de inovação com base em experiências internacionais e em setores diversos. Essa análise cruzada permitiu explorar tanto tecnologias já implementadas em outros países que poderiam ser adaptadas ao contexto brasileiro quanto soluções inovadoras aplicadas em outros setores que ainda não foram incorporadas ao setor sucroenergético nacional. Ao adotar essa perspectiva ampla, o objetivo foi promover uma compreensão mais profunda sobre como essas tecnologias podem ser integradas de forma eficiente para alavancar a bioeconomia circular no Brasil.

3.2.2.6. Integração colaboração e transferibilidade

A integração dos resultados dos módulos de colaboração e transferibilidade foi essencial para estruturar a discussão das rotas tecnológicas. O módulo de colaboração permitiu identificar as redes tecnológicas globais, compreendendo as

relações entre empresas, instituições de pesquisa e tecnologias. Por meio da análise de patentes, foi possível mapear tecnologias-chave que já são amplamente utilizadas e identificar os principais atores globais na área de bioenergia e bioeconomia circular. Essa etapa forneceu informações cruciais para entender os fluxos de inovação e como as empresas estão colaborando para o avanço de soluções tecnológicas.

O módulo de transferibilidade, por sua vez, concentrou-se na análise de aplicações potenciais para as tecnologias mapeadas. Essa análise levou em consideração a relevância das tecnologias para diferentes indústrias, explorando como elas podem ser transferidas para o setor sucroenergético. Por meio do desenvolvimento de mapas de portfólio, foi possível identificar indústrias e tecnologias com maior potencial de colaboração e aplicação cruzada. Essa etapa também destacou oportunidades para maximizar a eficiência em P&D, promover a simbiose industrial e ampliar a circularidade no setor.

3.2.2.7. Análise das tecnologias globais e setoriais

No contexto da bioeconomia circular, as tecnologias globais foram analisadas para identificar aquelas que podem ser adaptadas ao setor sucroenergético brasileiro. A bioenergia é uma área de destaque, com tecnologias avançadas empregadas em países como Estados Unidos, Alemanha e Japão, que se concentram na produção de biocombustíveis de segunda geração, utilização de biomassa residual e produção de bioplásticos. Essas tecnologias oferecem uma oportunidade significativa para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aumentar a eficiência no uso de recursos.

Além disso, setores industriais distintos, como o farmacêutico e o de materiais, também oferecem soluções que podem ser aplicadas ao setor sucroenergético. Por exemplo, tecnologias de fermentação avançada e o uso de biocatalisadores podem ser explorados para otimizar processos de produção de etanol e outros bioprodutos. A análise dessas soluções não apenas amplia as possibilidades de inovação no setor, mas também contribui para a integração de diferentes cadeias produtivas, promovendo maior circularidade.

3.2.2.8. Exploração do ciclo de vida dos produtos sucroenergéticos

A análise também abordou o ciclo de vida completo dos produtos sucroenergéticos, explorando oportunidades para reutilização e valorização de

subprodutos. O bagaço e a palha da cana-de-açúcar, por exemplo, têm sido amplamente utilizados na cogeração de energia, mas há potencial para diversificar suas aplicações em produtos de maior valor agregado, como bioplásticos e fertilizantes orgânicos. A integração de tecnologias que permitam essa valorização é essencial para aumentar a sustentabilidade econômica e ambiental do setor.

A redução de resíduos também foi um aspecto central da análise. Tecnologias de captura e utilização de CO₂ foram avaliadas como uma forma de mitigar as emissões do setor, enquanto soluções de tratamento de efluentes podem ser incorporadas para garantir que os processos produtivos sejam menos agressivos ao meio ambiente. Essa abordagem holística permitiu identificar oportunidades para fechar ciclos produtivos e promover maior eficiência no uso dos recursos naturais.

3.2.2.9. Contribuição para a sustentabilidade e competitividade

Ao proporcionar uma visão minuciosa das rotas tecnológicas no setor sucroenergético, esta análise contribui significativamente para a sustentabilidade e competitividade do setor. A identificação de tecnologias globais, aliada à adaptação de soluções de outros setores, oferece um caminho claro para a inovação. Além disso, a exploração de oportunidades ao longo do ciclo de vida dos produtos sucroenergéticos permite uma gestão mais eficiente de recursos, reduzindo custos e ampliando o valor agregado da produção.

Ao final, esta discussão busca não apenas mapear tecnologias existentes, mas também fomentar a implementação de soluções que fortaleçam o papel do setor sucroenergético como um modelo de referência para a bioeconomia circular no Brasil. Essa abordagem é essencial para atender às demandas por sustentabilidade e consolidar o país como líder global em bioenergia e inovações sustentáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta a análise dos resultados para identificar as oportunidades de rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor Sucroenergético no Brasil. A Seção 4.1 apresenta caracterização da Bioeconomia Circular e da Bioeconomia Circular no setor Sucroenergético, a Seção 4.2, apresenta as Rotas tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético com base na análise de Patentes, e por fim a Seção 4.3 contém o Mapeamento de Oportunidades de Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no setor Sucroenergético do Brasil.

4.1. Caracterização da Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético.

A caracterização da bioeconomia circular no setor foi realizada através da revisão sistemática e de pesquisas em bases de dados. A partir dos resultados da revisão sistemática foi possível caracterizar a bioeconomia circular, através das leituras destes textos e por meio de pesquisas direcionadas em sites de buscas.

4.1.1 Revisão Sistemática

Na primeira etapa da pesquisa através da revisão sistemática explorou os principais termos relacionados a bioeconomia circular e a sustentabilidade, a fim de mapear o maior número de resultados, assim, foram realizadas as seguintes combinações de palavras-chaves para realização das buscas nas bases de dados. Todas estas combinações foram pesquisadas nas bases Scopus, Science Direct, Web of Science e Scielo (Quadro 4).

Ao levar em consideração todas as bases de dados, nesta busca inicial, foram identificadas um total de 7.462 pesquisas. Dentre essas, 673 foram encontradas na Scopus, 2.117 na Science Direct, 4.644 na Web of Science e 28 na Scielo.

Quadro 4 - Resultado da Revisão Sistemática.

Base	Combinação	Palavra-chave	Número de Artigos na Base	Número de artigos filtragem por Título
Scopus	1	("bioeconomy" OR "circular economy") AND ("technological routes" OR "technology routes")	3	2
Science Direct			2	1
Web of science			4	4
Scielo			0	0
Scopus	2	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "industrial waste"	179	67
Science Direct			143	55
Web of science			195	97
Scielo			0	0
Scopus	3	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "companies"	107	43
Science Direct			452	43
Web of science			1068	59
Scielo			7	43
Scopus	4	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "improvement"	58	12
Science Direct			459	38
Web of science			822	49
Scielo			2	0
Scopus	5	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "alternative"	181	19
Science Direct			855	122
Web of science			1387	213
Scielo			10	2
Scopus	6	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "mapping"	71	58
Science Direct			101	77
Web of science			220	43
Scielo			0	0
Scopus	7	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "agro-industry"	5	2
Science Direct			8	3
Web of science			278	164
Scielo			0	0
Scopus	8	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "alternative products"	0	0
Science Direct			4	4
Web of science			3	3
Scielo			0	0
Scopus	9	("bioeconomy" OR "circular economy") AND "Brazil"	69	23
Science Direct			93	15
Web of science			667	65
Scielo			9	3

Fonte: Autoria própria (2025)

As buscas foram salvas e importadas para o software Mendeley. Após importação por meio de uma das ferramentas do Mendeley fez-se a exclusão de artigos duplicados, o que possibilitou a realização do primeiro filtro de leitura dos títulos.

Os autores selecionaram os artigos por meio da leitura de seus títulos, ou seja, as obras que apresentavam temas muito divergentes aos deste trabalho foram excluídas. Após a filtragem por títulos restaram 1329 artigos, estes tiveram seus resumos analisados na segunda etapa de filtragem por resumo. Após a seleção através de resumos, restaram 58 materiais como resultado utilizado na pesquisa.

Os artigos resultantes da revisão sistemática foram salvos e importados para o software Nvivo, onde foram lidos e codificados para encontrar parâmetros que possibilitassem a caracterização da Bioeconomia Circular e seu comportamento para no Setor Sucroenergético.

4.1.2 Bioeconomia Circular

Ao analisar os artigos resultantes da Revisão Sistemática no Nvivo, primeiramente fez-se uma rede com as 100 palavras mais recorrentes nos artigos (Figura 8). Dentre as palavras mais recorrentes tirou-se as palavras derivadas das palavras utilizadas nas combinações de palavras chaves que foram utilizadas para as buscas, como: “circular”, “economias”, “bioeconomias”, “tecnologias”, entre outras.

Figura 8 - Palavras-chave recorrentes na Revisão Sistemática.



Fonte: Autoria própria (2025)

As palavras restantes serviram de base para a leitura dos trechos dos artigos em que apareciam. A partir desta leitura foi possível definir os códigos que seriam utilizados para classificação dos textos. Estes códigos reuniram os trechos que apresentaram ideias semelhantes. Os códigos gerados foram:

- Valorização Integral de Subprodutos;
- Eficiência Energética;
- Ciclo de Vida Sustentável;
- Integração de Práticas Circulares.

A produção de biocombustíveis e bioprodutos a partir de biomassa emerge como uma das rotas tecnológicas mais promissoras dentro da bioeconomia circular.

Ao utilizar biomassa renovável, como resíduos agrícolas e florestais, associada a tecnologias avançadas, como pirólise, gaseificação e fermentação, é possível converter esses materiais em biocombustíveis líquidos e gasosos. Este processo não apenas reduz as emissões de carbono, mas também confere valor a materiais previamente descartados (Embrapa, 2016).

Além disso, a produção de bioprodutos, como bioplásticos e bioquímicos, complementa essa abordagem, fortalecendo a sustentabilidade e promovendo a eficiência na gestão de recursos em toda a economia circular. Essa sinergia entre a produção de biocombustíveis e bioprodutos destaca a relevância de uma abordagem integrada para enfrentar os desafios ambientais (Embrapa; 2016).

A reciclagem de resíduos, tanto biológicos quanto não biológicos, é uma prática fundamental na bioeconomia circular. A reciclagem de resíduos biológicos, exemplificada pela compostagem, não apenas reduz a quantidade de resíduos, mas também gera fertilizantes orgânicos valiosos. Por sua vez, a reciclagem de resíduos não biológicos, como plásticos, não só contribui para a sustentabilidade, mas também impulsiona a criação de novos produtos, fechando o ciclo de vida de materiais (Embrapa; 2023).

No contexto da economia circular baseada em biomassa, a produção de alimentos desempenha um papel crucial como rota tecnológica. Tecnologias inovadoras, como aquicultura, agricultura vertical e a fabricação de alimentos à base de vegetais, permitem uma produção mais sustentável, caracterizada por um menor impacto nos recursos naturais. Este enfoque integral na produção de alimentos contribui para a eficiência e a resiliência do sistema alimentar (Embrapa; 2018).

As biorrefinarias, enquanto instalações transformadoras de biomassa, emergem como elementos-chave na diversificação da produção. Elas têm a capacidade de gerar uma ampla gama de produtos de alto valor agregado, desde biocombustíveis até alimentos e produtos químicos. A versatilidade das biorrefinarias destaca seu papel crucial na transição para uma economia mais circular, aproveitando ao máximo os recursos disponíveis (Foelkel; 2012).

Por fim, a biologia sintética, como uma área de pesquisa avançada, desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade. Ao utilizar tecnologia para criar formas de vida ou modificar formas existentes, a biologia sintética permite a produção eficiente de biomateriais, biocombustíveis e outros produtos ambientalmente amigáveis. Essa abordagem inovadora alinha-se de maneira integral

aos princípios da economia circular e da biotecnologia verde, representando um avanço significativo na busca por soluções sustentáveis (Embrapa; 2018).

Buscando a eficiência no uso de recursos biológicos, explorando rotas tecnológicas como produção de biocombustíveis, reciclagem de resíduos, produção de alimentos, biorrefinarias e biologia sintética. A escolha dessas rotas deve considerar as características locais e demandas do mercado, tornando a abordagem adaptável e sustentável em diferentes contextos. Essa interseção entre contextos específicos e categorias tecnológicas destaca a flexibilidade essencial para promover uma gestão eficiente dos recursos biológicos na bioeconomia circular.

A bioeconomia circular é uma estratégia que se fundamenta na otimização de recursos renováveis e resíduos biodegradáveis, visando a fabricação de produtos e serviços de alto valor agregado. Nesse contexto, as rotas tecnológicas apresentadas são apenas uma seleção de possíveis abordagens. No entanto, é imperativo enfatizar que a identificação das rotas tecnológicas mais apropriadas requer uma análise minuciosa das particularidades locais, recursos disponíveis e demandas do mercado.

4.1.3 Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético

A partir da revisão sistemática realizada na seção anterior, foi possível identificar quatro características centrais que definem a bioeconomia circular no setor sucroenergético: Valorização Integral de Subprodutos, Eficiência Energética, Ciclo de Vida Sustentável e Integração de Práticas Circulares. Essas características foram utilizadas como critérios para a análise e filtragem das inovações tecnológicas e práticas sustentáveis identificadas nos artigos e patentes revisadas, com o objetivo de destacar as abordagens mais relevantes e alinhadas aos princípios da bioeconomia circular.

4.1.3.1 Valorização Integral de Subprodutos

A valorização integral de subprodutos no setor sucroenergético envolve a maximização do aproveitamento de recursos derivados da cana-de-açúcar, como bagaço, palha e vinhaça, que anteriormente eram subutilizados ou descartados. As práticas de reaproveitamento incluem a cogeração de energia a partir do bagaço, a produção de bioinsumos, como biogás e fertilizantes orgânicos, e outras aplicações

industriais. A integração dessas práticas contribui para a sustentabilidade do setor, ao reduzir o desperdício de materiais e agregar valor aos subprodutos.

4.1.3.2 Eficiência Energética

A eficiência energética no setor sucroenergético é priorizada em todas as etapas da produção, desde o cultivo da cana até a fabricação de biocombustíveis. O foco está em tecnologias que otimizam o uso de energia, como a cogeração a partir do bagaço da cana e métodos avançados de produção de etanol que requerem menos insumos energéticos. Essa abordagem não só reduz custos operacionais, mas também minimiza as emissões de gases de efeito estufa, reforçando o compromisso com a sustentabilidade.

4.1.3.3 Ciclo de Vida Sustentável

O ciclo de vida sustentável é uma abordagem que considera o impacto ambiental de todas as etapas da produção, desde o plantio e colheita da cana-de-açúcar até o uso final dos biocombustíveis. Práticas agrícolas sustentáveis, como a rotação de culturas, o uso de insumos orgânicos e a preservação dos recursos hídricos, são incorporadas para minimizar os impactos ambientais. A análise do ciclo de vida permite identificar pontos críticos de melhoria e implementar soluções que aumentem a eficiência e a sustentabilidade do setor.

4.1.3.4 Integração de Práticas Circulares

A integração de práticas circulares envolve o reaproveitamento de resíduos e a implementação de estratégias que maximizam a eficiência do uso dos recursos disponíveis. Exemplos dessas práticas incluem a produção de biogás a partir de vinhaça e a reciclagem de materiais para a fabricação de novos produtos. A adoção dessas práticas circulares promove a criação de um ciclo fechado de produção, onde os resíduos de um processo tornam-se insumos para outro, alinhando o setor sucroenergético com os princípios da economia circular.

Com base nesses quatro pilares, a análise de patentes foi realizada para identificar inovações tecnológicas que atendessem a esses critérios. As patentes foram filtradas e categorizadas para garantir que estivessem alinhadas às

características identificadas como fundamentais para a bioeconomia circular no setor sucroenergético.

Os resultados mostraram que a maioria das inovações tecnológicas estava relacionada à eficiência energética e à valorização de subprodutos, com destaque para novas tecnologias de cogeração de energia e métodos de produção de biocombustíveis mais eficientes. Patentes que promovem o reaproveitamento de resíduos para a produção de bioinsumos também se destacaram, mostrando uma clara tendência de integração de práticas circulares.

Essa filtragem criteriosa permitiu identificar as tecnologias mais promissoras e alinhadas aos objetivos da bioeconomia circular, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e inovações no setor sucroenergético. O foco nas quatro características definidas facilitou a compreensão das principais tendências tecnológicas e a identificação de oportunidades para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes.

4.2 Rotas tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético com base na análise de Patentes.

A busca por soluções inovadoras e sustentáveis tem se tornado cada vez mais essencial. Nesse sentido, as rotas tecnológicas têm desempenhado um papel fundamental na promoção da bioeconomia circular, visando a maximização da eficiência e o aproveitamento integral dos recursos disponíveis. Com base na análise de patentes, este estudo tem como objetivo identificar e explorar as principais rotas tecnológicas empregadas neste e em outros setores, destacando os avanços e tendências recentes. Ao analisar o panorama das patentes, pode-se compreender melhor como a inovação tecnológica impulsiona a transição para um modelo econômico mais sustentável e circular, promovendo a utilização inteligente dos subprodutos gerados pela produção de açúcar e etanol.

4.2.1 Busca de Patentes

A busca por patentes foi realizada a partir das bases de dados Patetscope, Espacenet, Google Patentes, JPTO, USPTO e INPI, principais bibliotecas de patentes espalhadas pelo mundo todo. Inicialmente, buscou-se combinações simplificadas de palavras-chaves para realização da pesquisa dentro das bases, contendo no máximo

três palavras por combinação, no entanto, foram percebidas que estas combinações resultaram em um volume muito alto de patentes e a maioria destas eram totalmente incompatíveis com a perspectiva da pesquisa. Visto isso, foram formuladas combinações um pouco mais restritivas e detalhadas, buscando priorizar algumas palavras que são indispensáveis quando se fala sobre bioeconomia circular. Diante disso, foi utilizado as seguintes combinações de palavras chaves para realização da busca:

- 1) "technological routes" AND "brazil"
- 2) ("Biomass" OR "recycling" OR "residue" OR "reuse" OR "bioproducts" OR "Bioeconomy") AND ("sugarcane" OR ("sugarcane AND "energy") OR "technological"
- 3) ("Biomass" OR "recycling" OR "residue" OR "reuse" OR "bioproducts" OR "Bioeconomy") AND ("sugarcane" OR "technological routes" OR "circular economy" OR "brazil") AND "sustainability"

Todas as combinações foram exploradas nas bibliotecas citadas anteriormente, resultando em 263 patentes para as palavras-chaves da combinação 1, 283 para a combinação 2 e 1028 para a combinação 3, totalizando assim 1574 patentes encontradas através de todas as combinações.

Assim como na caracterização da bioeconomia circular no setor realizada anteriormente, desta vez, também foi aplicada a metodologia da revisão sistemática para seleção das patentes que seriam utilizadas. A revisão sistemática é um tipo de pesquisa científica que segue uma metodologia rigorosa e bem definida para buscar, selecionar, analisar e sintetizar informações relevantes sobre um determinado tema. Esse processo é conduzido de forma sistemática e transparente, visando garantir a qualidade e a validade dos dados utilizados no trabalho científico.

Para isso utilizou-se o Software Nvivo e criou-se nós relacionados as 4 características da bioeconomia circular no setor sucroenergético, de forma a buscar nos documentos das patentes onde as palavras-chave relacionadas se encontravam e foi possível filtrar as patentes dentro das características consideradas, além de ter sido possível excluir as patentes que não faziam sentido para o nosso estudo, deste modo chegamos a um total de 1328 patentes selecionadas.

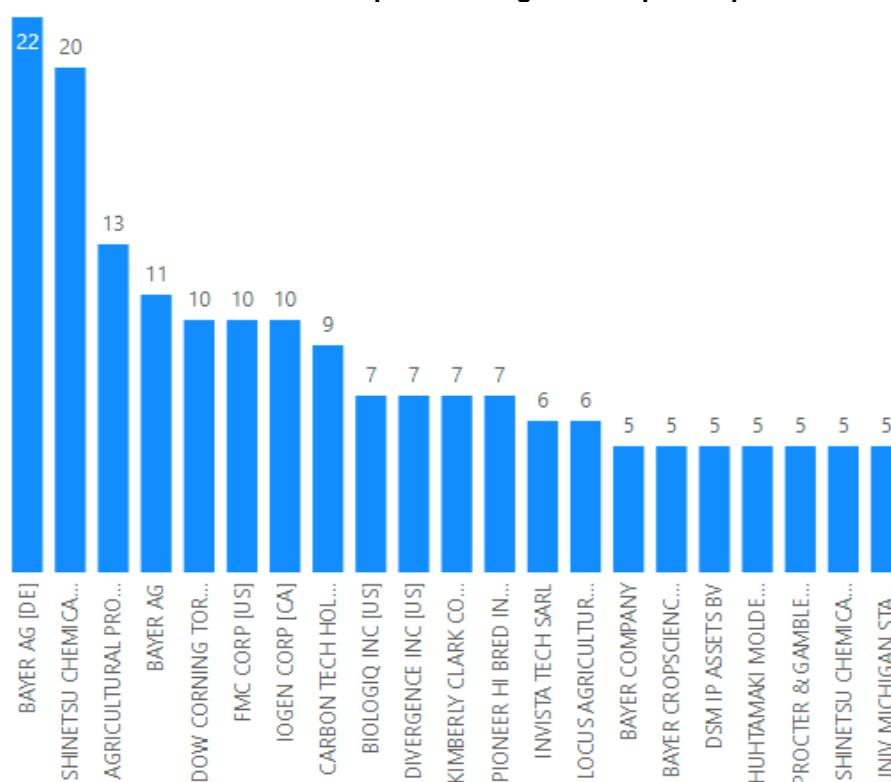
4.2.2 Mapa de Relação

O desenvolvimento do mapa de Relação, conforme proposto por Lee (2013), é abordado, destacando três etapas cruciais descritas na seção de metodologia. A primeira fase, denominada Identificação de Patentes, foi realizada conforme previamente descrito na sessão 4.2.1.

Na segunda etapa, conduziu-se uma análise metódica do número de citações atribuídas às patentes por empresas específicas. Para atingir essa métrica, utilizou-se a busca pelos nomes das patentes nas renomadas bases de dados Google Scholar, Science Direct e Scopus. Os resultados foram exportados e analisados no software Mendeley, sendo posteriormente transformados em planilhas Excel para facilitar a interpretação.

A pesquisa, fundamentada na metodologia de Lee (2013), concentra-se na segunda etapa, envolvendo a análise do número de citações que as patentes obtiveram por empresas específicas. A identificação das patentes relevantes, já descrita anteriormente, seguiu os procedimentos sugeridos na metodologia. A busca pelos nomes das patentes nas bases de dados Google Scholar, Science Direct e Scopus foi conduzida para quantificar as citações recebidas por cada patente. Os resultados foram exportados e analisados no Mendeley, organizados em planilhas para uma análise mais aprofundada.

A planilha gerada alimentou o Power BI permitindo a análise gráfica de diversos parâmetros como o de número de patentes registradas por empresa (Gráfico 1). Nesta etapa, 46 empresas foram destacadas por possuírem pelo menos 5 patentes registradas, em especial a Bayer que foi responsável por 0,8% das patentes analisadas.

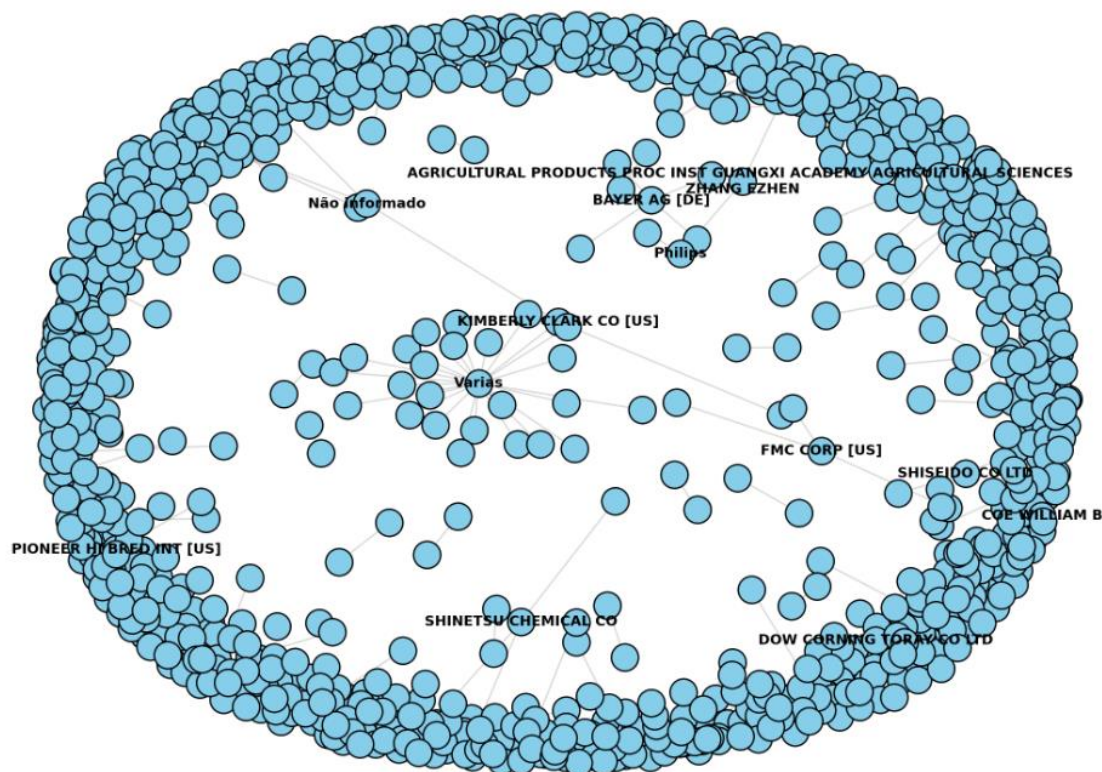
Gráfico 1: Número de patentes registradas por empresa.

Fonte: Autoria própria (2025)

Ainda na segunda etapa, foram utilizadas as bases de dados Google Scholar, Science Direct e Scopus, onde os nomes das patentes foram buscados uma a uma e foi quantificado o número de citações de cada patente e registrado na base em excel. Os resultados dessa pesquisa foram exportados e organizados no software Mendeley onde foi possível identificar quais empresas utilizavam cada uma das patentes, permitindo mapear as interconexões entre patente (Gráfico 2), empresas que utilizam a patente e as empresas que registraram a patente.

O próximo passo foi construir uma rede visual que representasse essas relações, onde cada nó da rede correspondia a uma empresa e as conexões indicavam o uso compartilhado ou a citação de patentes comuns (Gráfico 2).

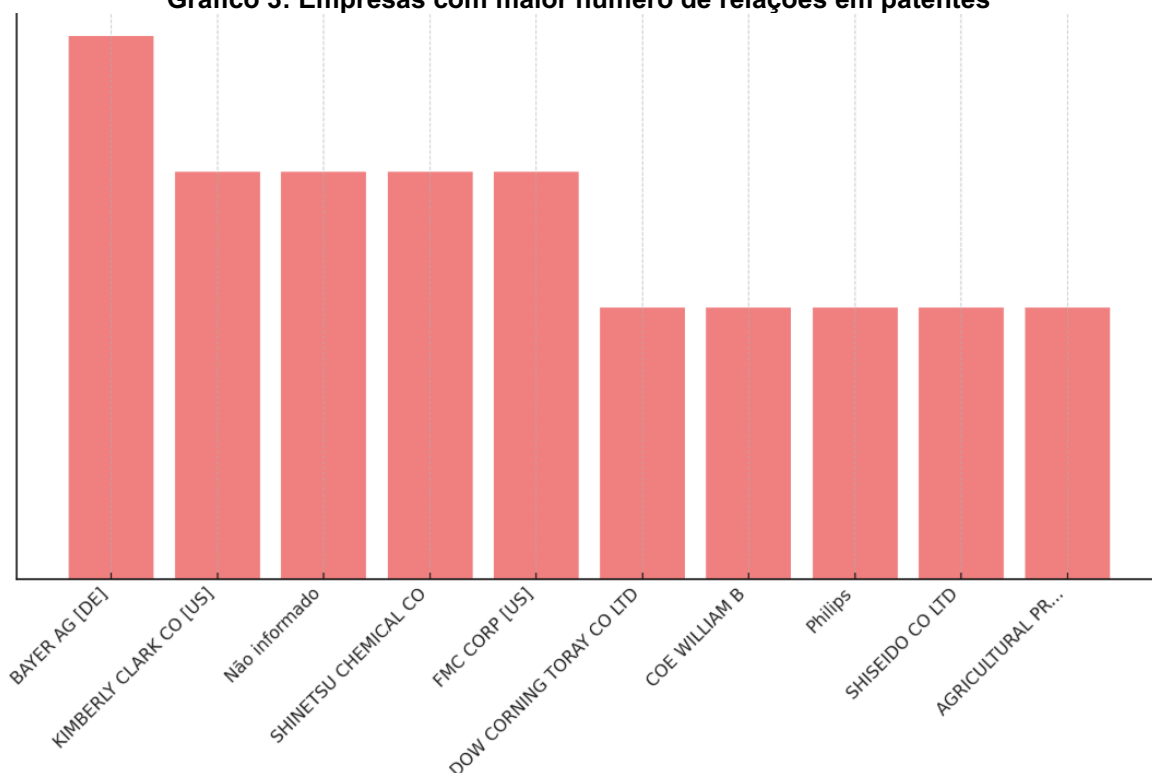
Gráfico 2: Rede de nós entre empresas e patentes no Mendeley.



Fonte: Autoria própria (2025)

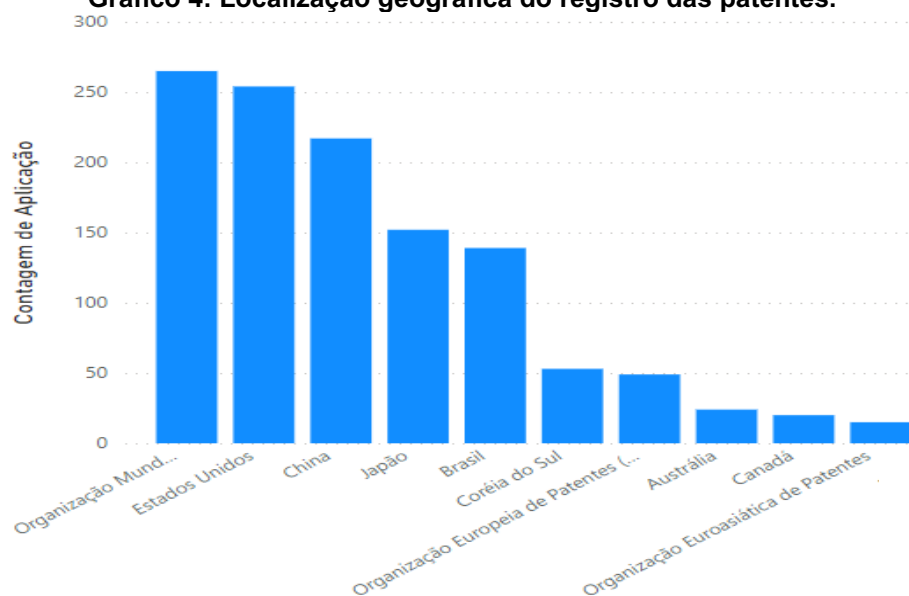
A análise das patentes revelou um total de 950 empresas envolvidas, formando uma rede interconectada de 227 relações (nós). O gráfico acima representa a rede completa de conexões identificadas no software Mendeley após a análise qualitativa das palavras-chave presentes nos descritivos das patentes pesquisadas. Além disso, foram considerados os trabalhos que citaram essas patentes, conforme registrado em planilhas de Excel, seguindo a metodologia descrita anteriormente. No gráfico 2, os nomes exibidos destacam apenas as empresas com o maior número de conexões.

As empresas mais citadas ou que compartilham patentes em comum demonstram uma forte influência no cenário de bioeconomia circular do setor sucroenergético. Entre os principais atores dessa rede estão empresas como FMC CORP [US], KIMBERLY CLARK CO [US], SHINETSU CHEMICAL CO e BAYER AG [DE], que possuem múltiplas conexões com outras instituições, indicando seu papel estratégico na inovação e disseminação tecnológica (Gráfico 3).

Gráfico 3: Empresas com maior número de relações em patentes

Fonte: Autoria própria (2025)

Por meio da análise do nós ainda foi possível cruzar os dados da localização geográfica do registro das patentes à localização geográfica da publicação dos artigos onde ocorreram citação, resultando no Gráfico 4, onde observa-se que grande parte das rotas tecnológicas de bioeconomia circular são geradas nos Estados Unidos e na China.

Gráfico 4: Localização geográfica do registro das patentes.

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise detalhada das patentes e suas interconexões evidenciou o papel central de empresas multinacionais na disseminação e no desenvolvimento de tecnologias voltadas à bioeconomia circular no setor sucroenergético. A partir da construção de redes de citações e interações empresariais, foi possível identificar atores estratégicos e suas influências na inovação tecnológica.

Compreender essas dinâmicas foi fundamental para identificar oportunidades de colaboração e transferência de tecnologia, além de revelar tendências globais no uso de patentes.

Dando continuidade, a próxima seção explora o Mapeamento de Oportunidades de Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético do Brasil, destacando as principais rotas tecnológicas e as oportunidades de mercado emergentes que podem impulsionar ainda mais a sustentabilidade e a eficiência no setor.

4.3 Mapeamento de Oportunidades de Rotas Tecnológicas para Bioeconomia Circular no Setor Sucroenergético do Brasil

Esta seção explora as rotas tecnológicas aplicáveis ao setor sucroenergético no contexto da bioeconomia circular, destacando as oportunidades de inovação, transferibilidade e lacunas tecnológicas no mercado brasileiro.

4.3.1 Aplicação de Tecnologias

A aplicação de tecnologias no setor sucroenergético desempenha um papel essencial na transição para um modelo produtivo mais eficiente e sustentável. Por meio da análise das patentes identificadas na pesquisa, foi possível mapear as principais inovações que podem ser aplicadas ao longo da cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Essas tecnologias têm o potencial de otimizar processos, reduzir desperdícios e gerar novos produtos de alto valor agregado, promovendo a circularidade dentro do setor.

Dentre as principais tecnologias aplicáveis ao setor sucroenergético, destacam-se:

- **Fermentação de Segunda Geração:** As patentes analisadas revelam avanços na conversão de lignocelulose em biocombustíveis, utilizando enzimas e microrganismos geneticamente modificados para aumentar a eficiência do processo fermentativo. Essa abordagem permite maior

aproveitamento da biomassa da cana-de-açúcar e reduz a dependência de fontes fósseis para produção de etanol.

- **Bioenergia de Resíduos:** A cogeração de energia a partir do bagaço da cana é uma das principais iniciativas para o fechamento do ciclo energético no setor. O levantamento de patentes indica a evolução de sistemas de combustão e gaseificação, aumentando a eficiência da conversão energética e reduzindo emissões de gases poluentes. Além disso, novas técnicas de secagem e tratamento térmico do bagaço e da palha estão sendo desenvolvidas para potencializar a geração de eletricidade.
- **Integração de Biorrefinarias:** A transformação do setor sucroenergético em um hub de biorrefinarias é uma tendência identificada nas patentes revisadas. Essa abordagem permite a produção de vários produtos de alto valor agregado a partir da biomassa da cana, como bioplásticos, bioquímicos e ração animal. A integração desses processos promove uma economia de escala e amplia a competitividade do setor.

Os resultados das patentes evidenciam que a aplicação dessas tecnologias está alinhada aos princípios da bioeconomia circular, promovendo maior eficiência no uso dos recursos e reduzindo impactos ambientais. Além disso, essas inovações contribuem para a diversificação de produtos e mercados, fortalecendo a posição do Brasil como líder global na produção de bioenergia e bioprodutos sustentáveis.

4.3.2 Mapa de Transferibilidade

O mapa de transferibilidade foi uma ferramenta crucial para avaliar o potencial de transferência de tecnologias entre diferentes indústrias. Para o setor sucroenergético, essa análise permitiu identificar quais tecnologias desenvolvidas podem ser aplicadas em outros setores, promovendo inovações intersetoriais.

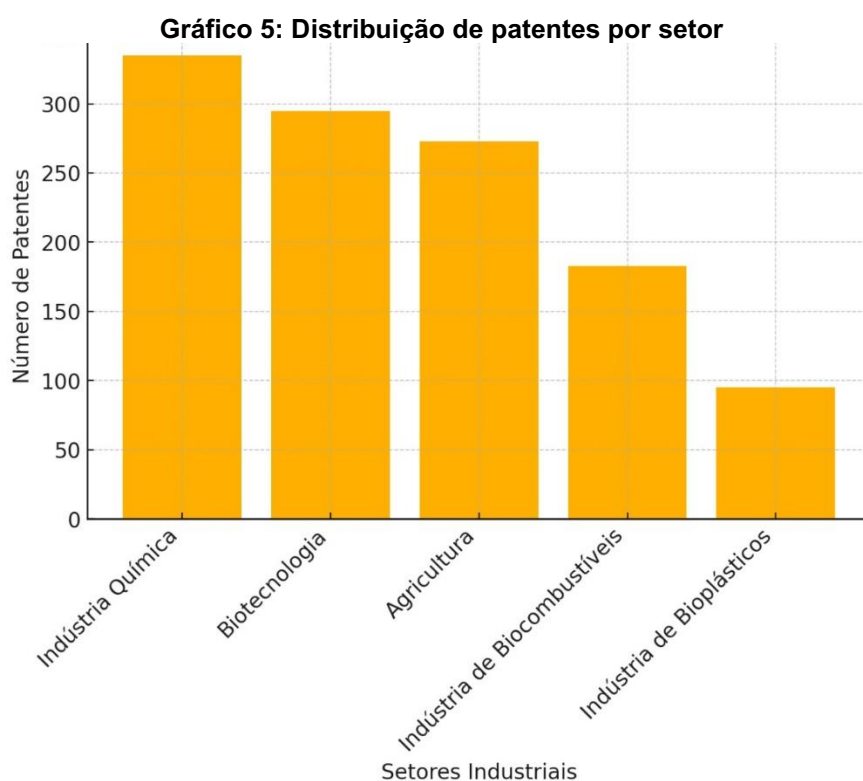
Para construção do mapa de transferibilidade utilizou-se quatro etapas, sendo elas:

- Etapa 1: Definir as Indústrias em Relação às Patentes;
- Etapa 2: Relacionar a Tecnologia a uma Indústria Relevante;
- Etapa 3: Analisar Patentes entre as Indústrias e as Tecnologias;
- Etapa 4: Desenvolver um Mapa de Portfólio.

4.3.2.1 Etapa 1: Definir as Indústrias em Relação às Patentes

A análise evidenciou que os setores com maior sinergia com as patentes estudadas foram a indústria química, com 335 patentes, seguidas pela biotecnologia, com 295 patentes, e pela agricultura, com 273 patentes. Esses setores destacaram-se pela aplicação de processos catalíticos e bioquímicos inovadores na conversão de biomassa em produtos de alto valor agregado. A indústria de biocombustíveis, com 183 patentes, demonstrou forte relevância na conversão de biomassa em combustíveis líquidos e gasosos, incluindo biodiesel, etanol celulósico e biogás.

A distribuição das patentes por setor está representada no gráfico 5, onde se observa a predominância da indústria química e biotecnológica na inovação voltada para a bioeconomia circular.



Fonte: Autoria própria (2025)

O alto número de patentes na indústria química e de biocombustíveis reforça a importância dessas áreas no desenvolvimento de soluções sustentáveis baseadas em biomassa. A indústria de bioplásticos, embora com uma representação menor, apresenta potencial significativo para inovações voltadas para materiais biodegradáveis. A Tabela 1 apresenta um resumo quantitativo das patentes analisadas por setor industrial.

Tabela 1: Número de patentes por setor industrial.

Setor Industrial	Número de Patentes
Indústria Química	335
Biotecnologia	295
Agricultura	273
Indústria de Biocombustíveis	183
Indústria de Bioplásticos	95

Fonte: Autoria própria (2025)

A identificação das indústrias com maior sinergia com as patentes relacionadas às rotas tecnológicas do setor sucroenergético demonstrou a relevância das inovações para diferentes setores. O cruzamento de classificações Internacional de Patentes e Classificação Cooperativa de Patentes com setores industriais permitiu uma análise quantitativa robusta, evidenciando as principais frentes tecnológicas que impulsionam a bioeconomia circular no Brasil e no mundo. A exploração dessas sinergias pode contribuir para o desenvolvimento de novos produtos, processos e modelos de negócios sustentáveis, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono.

4.3.2.2 Etapa 2: Relacionar a Tecnologia a uma Indústria Relevante

A inovação tecnológica é um dos principais motores do desenvolvimento industrial. No contexto da bioeconomia circular, a análise de patentes torna-se uma ferramenta essencial para identificar tecnologias emergentes e mapear suas aplicações em diferentes setores. O presente estudo busca relacionar tecnologias protegidas por patentes com indústrias estratégicas, facilitando a compreensão de seu potencial de transferência e aproveitamento.

A metodologia utilizada baseou-se na análise de patentes extraídas de diferentes bases de dados, com classificação baseada nos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) e da Classificação Cooperativa de Patentes (CPC). A partir desses códigos, identificou-se tecnologias relevantes que foram vinculadas a setores industriais específicos, conforme descrito a seguir.

As patentes analisadas foram categorizadas em cinco setores industriais, de acordo com as tecnologias subjacentes. Esses setores são:

- **Indústria Química:** Tecnologias voltadas para processos químicos avançados, incluindo bioprocessos para produção de compostos químicos. Exemplo: Uso de biocatálise na síntese de compostos industriais.

- **Biotecnologia:** Aplicações de engenharia genética e microbiologia para diversos setores, como saúde, agroindústria e bioenergia. Exemplo: Desenvolvimento de microrganismos geneticamente modificados para produção de enzimas industriais.
- **Agricultura:** Tecnologias relacionadas à proteção de cultivos, melhoramento genético de plantas e uso de bioinsumos. Exemplo: Formulações biopesticidas para controle de pragas na produção agrícola.
- **Indústria de Biocombustíveis:** Desenvolvimento de processos para produção de bioetanol, biodiesel e combustíveis renováveis. Exemplo: Utilização de biomassa lignocelulósica na produção de etanol de segunda geração.
- **Indústria de Bioplásticos:** Tecnologias para a produção de polímeros sustentáveis a partir de fontes renováveis. Exemplo: Desenvolvimento de biopolímeros biodegradáveis para embalagens sustentáveis.

A distribuição das patentes entre os setores industriais mostra uma maior concentração de inovações em biotecnologia, biocombustíveis e agricultura. Isso reflete uma tendência crescente no uso de tecnologias biológicas para substituição de processos tradicionais mais poluentes e ineficientes. A Indústria Química e a Indústria de Bioplásticos também demonstraram avanços significativos, especialmente no desenvolvimento de materiais sustentáveis e alternativas às matérias-primas fósseis.

Os resultados obtidos confirmam o papel estratégico da inovação tecnológica para o desenvolvimento de setores industriais sustentáveis. A interseção entre biotecnologia, indústria química, agricultura e biocombustíveis mostra um ecossistema promissor para a transferência de tecnologias e a expansão da bioeconomia circular.

A análise detalhada das patentes e sua vinculação com setores industriais permite vislumbrar o potencial de desenvolvimento e adoção dessas inovações no mercado, por isso na próxima sessão foi realizado o cruzamento entre as patentes, as tecnologias e as indústria-alvo.

4.3.2.3 Etapa 3: Analisar Patentes entre as Indústrias e as Tecnologias

Aqui, realiza-se uma análise cruzada entre as patentes disponíveis e as indústrias-alvo. Isso envolve

4.3.2.3.1 Identificar patentes já aplicáveis a várias indústrias

A análise de patentes revela diversas tecnologias já aplicáveis a múltiplas indústrias, demonstrando um potencial significativo para transferência e ampliação de uso em diferentes contextos produtivos. O cruzamento dos códigos IPC das patentes permite identificar inovações que são aproveitadas por vários setores, promovendo integração e colaboração intersetorial.

Entre as principais patentes com aplicação em diversas indústrias, destacam-se:

- C12P7/10 (Fermentação para produção de bioetanol e derivados): amplamente utilizada na Indústria de Biocombustíveis para produção de etanol, essa tecnologia também tem aplicação na Indústria Química para a obtenção de biocompostos e na Biotecnologia para produção de enzimas e biocatalisadores.
- C12P19/02 (Processos de conversão biotecnológica de substratos orgânicos): essencial para a Indústria Química e de Biocombustíveis, essa patente permite a conversão de biomassa em produtos bioquímicos de alto valor agregado. Além disso, seu uso estende-se à Agricultura, onde auxilia na formulação de biofertilizantes.
- C12P19/14 (Produção de ácidos orgânicos por processos biotecnológicos): relevante para a Indústria de Biocombustíveis e a Agricultura, essa tecnologia é utilizada tanto na produção de bioinsumos quanto na fabricação de produtos químicos sustentáveis.
- C13K1/02 (Processos de extração de compostos de biomassa lignocelulósica): aplicada na Indústria de Biocombustíveis para otimização de matérias-primas renováveis, essa patente também é explorada na Indústria Química para obtenção de novos compostos sustentáveis.

A identificação dessas patentes reflete a crescente interconectividade entre os setores industriais, proporcionando oportunidades para desenvolvimento conjunto e otimização de processos produtivos. A análise desses dados permitiu não apenas mapear oportunidades de transferência de tecnologia, mas também antever tendências de integração e colaboração no ecossistema industrial.

4.3.2.3.2 Avaliar quais tecnologias podem ser facilmente transferíveis.

A transferência de tecnologias entre diferentes setores industriais não depende apenas da similaridade de aplicação, mas também de fatores como complexidade de adaptação, infraestrutura existente, viabilidade econômica e regulamentações associadas. A análise das patentes revelou não apenas quais tecnologias já são utilizadas em múltiplas indústrias, mas também quais apresentam maior facilidade de transferência, seja por requisitos técnicos menos restritivos, compatibilidade com processos produtivos já estabelecidos ou potencial de otimização sem grandes investimentos.

Dentre as tecnologias que podem ser facilmente transferidas entre setores, destacam-se:

- C12P7/10 (Fermentação para produção de bioetanol e derivados): Devido à sua versatilidade, essa tecnologia é amplamente adotada na Indústria de Biocombustíveis e tem forte aplicabilidade na Indústria Química. Sua implementação em diferentes segmentos ocorre de forma ágil, pois a infraestrutura básica necessária para processos fermentativos já está disponível em diversas áreas industriais. Além disso, sua adaptação para a produção de compostos bioquímicos de alto valor agregado torna essa tecnologia altamente atrativa para transferência.
- C12P19/02 (Processos de conversão biotecnológica de substratos orgânicos): Sua facilidade de transferência advém do fato de que diversas indústrias utilizam substratos semelhantes, e a conversão biotecnológica pode ser ajustada para produzir diferentes produtos finais. O conhecimento acumulado na Indústria de Biocombustíveis e na Indústria Química sobre esses processos permite uma implementação ágil em setores como Agricultura e Biotecnologia, minimizando a necessidade de pesquisas adicionais.
- C12P19/14 (Produção de ácidos orgânicos por processos biotecnológicos): Com processos bem estabelecidos, a produção de ácidos orgânicos já ocorre em múltiplos setores. A facilidade de adaptação se deve à compatibilidade desses compostos com cadeias produtivas variadas, incluindo Biocombustíveis, Agricultura e Indústria Química. O investimento

necessário para a implementação é relativamente baixo, tornando essa tecnologia altamente transferível.

- C13K1/02 (Processos de extração de compostos de biomassa lignocelulósica): A conversão de biomassa lignocelulósica em compostos químicos e bioenergia apresenta um elevado potencial de transferência, pois é um processo integrado que pode ser explorado tanto na produção de biocombustíveis quanto na obtenção de insumos químicos sustentáveis. A disponibilidade de matéria-prima em diferentes setores facilita essa transferência, e a implementação se beneficia de processos já existentes na indústria de celulose, por exemplo.
- C12N15/82 (Engenharia genética aplicada a microrganismos): Principalmente aplicada na Biotecnologia, essa tecnologia possui alto potencial de transferência para a Indústria Química e a Agricultura, permitindo o desenvolvimento de bioinsumos e processos biocatalíticos avançados.
- A01P3/00 (Controle de pragas por meios biológicos): Essa tecnologia apresenta facilidade de adaptação da Agricultura para a Biotecnologia e Indústria Química, podendo ser empregada na formulação de pesticidas naturais e no controle microbiológico de pragas.
- C05F11/08 (Processamento de resíduos orgânicos para fertilizantes): A Indústria de Biocombustíveis e a Agricultura compartilham essa tecnologia, uma vez que os resíduos do processamento de biomassa podem ser reaproveitados na produção de fertilizantes sustentáveis.

A compreensão desses aspectos é essencial para maximizar o aproveitamento das inovações e fomentar colaborações estratégicas dentro da bioeconomia circular, promovendo eficiência e inovação sustentável.

4.3.2.3.3 Agregação de valor das tecnologias em setores adjacentes.

A adaptação dessas tecnologias pode agregar valor significativo a setores adjacentes, permitindo a otimização de processos produtivos e a criação de novos produtos de alto valor agregado. O gráfico atualizado abaixo apresenta uma visão mais abrangente do potencial de adaptação das tecnologias entre todos os setores

industriais anteriormente mapeados, demonstrando de forma clara as interconexões e oportunidades para transferência tecnológica.

Tabela 2: Matriz de Potencial de Adaptação Tecnológica por Indústria

Tecnologia	Indústria	Amplitude de Aplicação	Facilidade de Implementação	Custo de Adaptação	Regulamentação e Conformidade	Impacto Econômico Potencial	Nota Final de Potencial
C12P7/10	Indústria Química	5	4	3	2	5	19
C12P7/10	Indústria de Biocombustíveis	5	5	3	2	5	20
C12P19/02	Indústria Química	4	4	3	2	4	17
C12P19/02	Biotecnologia	4	5	3	2	5	19
C12P19/02	Agricultura	3	3	4	3	3	16
C12P19/14	Indústria Química	3	3	3	2	3	14
C12P19/14	Agricultura	4	3	3	3	4	17
C12P19/14	Indústria de Biocombustíveis	3	3	3	2	3	14
C13K1/02	Indústria Química	4	3	4	3	4	18
C13K1/02	Indústria de Bioplásticos	4	3	4	3	4	18
C12N15/82	Biotecnologia	5	4	3	3	5	20
C12N15/82	Indústria Química	4	4	3	3	5	19
C12N15/82	Agricultura	3	3	4	3	4	17
A01P3/00	Agricultura	3	3	4	3	3	16
A01P3/00	Biotecnologia	4	3	4	3	4	18
A01P3/00	Indústria Química	3	3	3	3	3	15
C05F11/08	Indústria de Biocombustíveis	4	3	4	3	4	18
C05F11/08	Agricultura	4	3	4	3	4	18

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.2.3.4 Influência da Localização Geográfica na Adaptação das Tecnologias

Outro fator crucial na adaptação e transferência de tecnologias é a localização geográfica das inovações patenteadas. As tecnologias emergentes tendem a ser concentradas em determinadas regiões, muitas vezes devido à infraestrutura disponível, políticas governamentais e investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Por exemplo:

- América do Norte e Europa lideram em patentes relacionadas à Biotecnologia e Indústria Química, devido a regulamentações ambientais rigorosas e incentivos à inovação sustentável.
- América Latina, especialmente o Brasil, apresenta um alto número de patentes voltadas à Indústria de Biocombustíveis e Agricultura, em função da vasta disponibilidade de biomassa e políticas de incentivo à energia renovável.
- Ásia, com destaque para China e Índia, tem grande concentração de tecnologias associadas à produção de bioplásticos e químicos sustentáveis, impulsionadas por demandas industriais e estratégias governamentais de redução de resíduos plásticos.

Essa distribuição geográfica influencia diretamente a facilidade de adaptação das tecnologias para setores adjacentes. Tecnologias desenvolvidas em países com infraestrutura consolidada e incentivos regulatórios são mais facilmente adaptadas a mercados semelhantes. Por outro lado, regiões com menor desenvolvimento tecnológico pode enfrentar desafios na implementação, exigindo adaptações em infraestrutura e políticas industriais.

A análise geográfica das patentes permite que tomadores de decisão avaliem melhor onde determinadas tecnologias podem ser mais rapidamente aplicadas e quais setores podem se beneficiar de colaborações internacionais para transferência de conhecimento e inovação.

4.2.3.4 Etapa 4: Desenvolver um Mapa de Portfólio

A transferência de tecnologias entre diferentes setores industriais não depende apenas da similaridade de aplicação, mas também de fatores como complexidade de adaptação, infraestrutura existente, viabilidade econômica e regulamentações associadas. A análise das patentes revelou não apenas quais

tecnologias já são utilizadas em múltiplas indústrias, mas também quais apresentam maior facilidade de transferência, seja por requisitos técnicos menos restritivos, compatibilidade com processos produtivos já estabelecidos ou potencial de otimização sem grandes investimentos.

Para facilitar a priorização das tecnologias mais promissoras, foi elaborado o quadro de avaliação com três critérios principais: Potencial de Mercado, Nível de Maturidade Tecnológica e Facilidade de Adaptação.

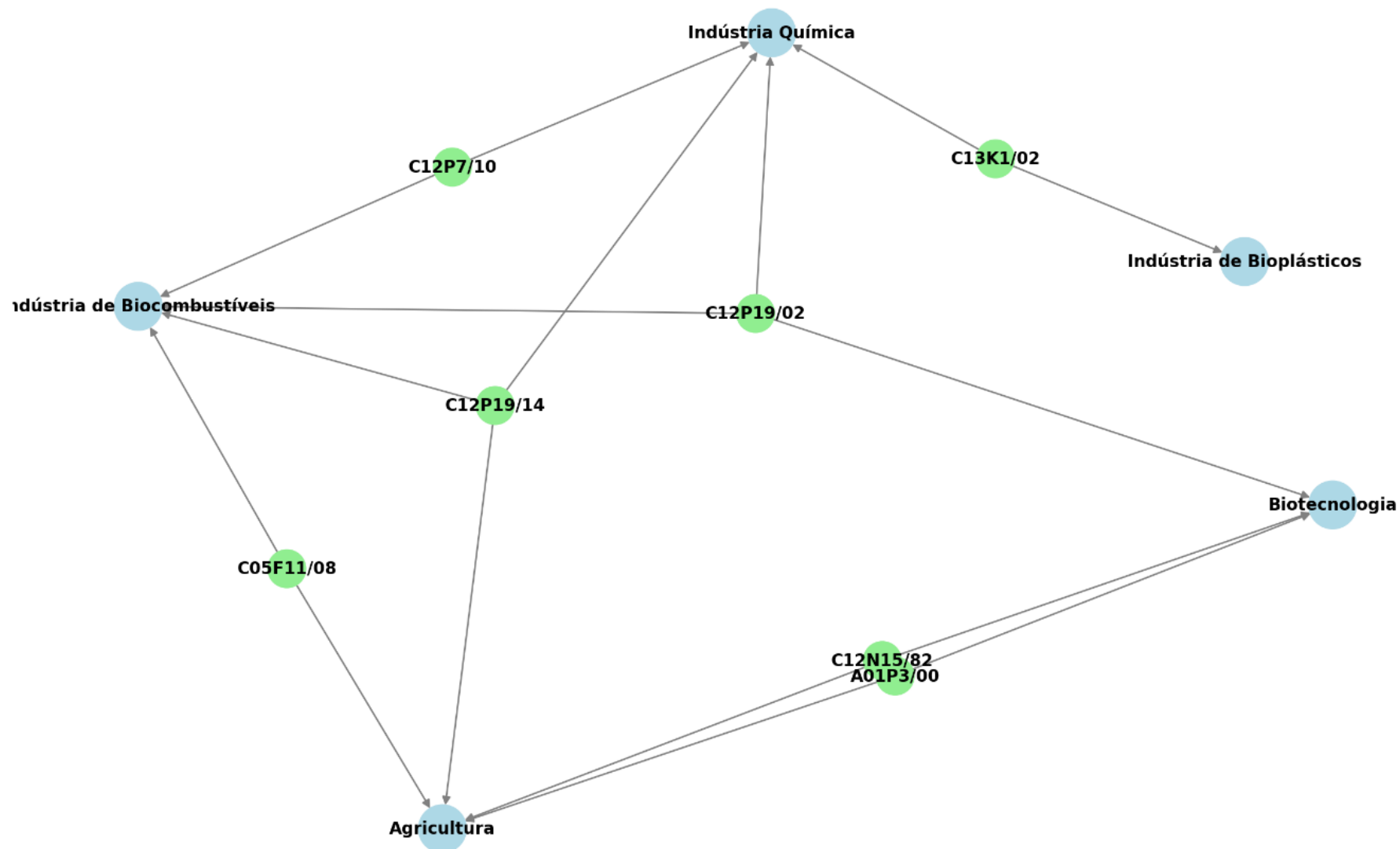
Quadro 5 - Priorização de tecnologias.

Tecnologia	Potencial de Mercado	Nível de Maturidade Tecnológica	Facilidade de Adaptação
C12P7/10 (Fermentação para bioetanol)	Alto – Grande demanda no setor energético e químico	TRL 7 – Implementação em escala piloto	Alta – Compatível com processos industriais estabelecidos
C12P19/02 (Conversão biotecnológica de substrato)	Alto – Aplicação versátil em indústrias químicas e biotecnológicas	TRL 6 – Testes de validação em ambiente relevante	Alta – Uso flexível e diversos setores
C12P19/14	Médio – Crescente uso em biocombustíveis e insumos agrícolas	TRL 5 – Demonstração experimental concluída	Média – Necessita otimizações para diferentes aplicações
C13K1/02	Médio – Importante para biocombustíveis e materiais sustentáveis	TRL6 – Aplicação já testada em indústrias	Média – Infraestrutura existente auxilia implementação
C12N15/82	Alto – Inovação essencial para biotecnologia e agricultura	TRL 4 – Desenvolvimento avançado, mas ainda em validação	Baixa – Exige infraestrutura laboratorial avançada
A01P3/00	Médio – Aplicação específica para defensivos agrícolas	TRL6 – Solução já utilizada comercialmente	Alta – Implementação simples em setores agrícolas
C05F11/08	Médio – viabilidade na reciclagem de resíduos industriais	TRL 7 – Aplicável em processos industriais já existentes	Alta – aplicação imediata em indústrias de fertilizantes

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise revelou que as tecnologias de fermentação para bioetanol e conversão biotecnológica de substratos possuem um alto potencial de mercado, dado o interesse crescente por soluções sustentáveis no setor energético e químico. Em contrapartida, tecnologias como engenharia genética aplicada a microrganismos ainda enfrentam desafios de infraestrutura e regulamentação para ampla implementação. Com base na análise, foi desenvolvido um fluxograma (Figura 9) que representa as rotas de transferência das tecnologias entre setores industriais.

Figura 9 - Fluxograma das rotas tecnológicas do portfólio.



Fonte: Autoria própria (2025)

Esse mapeamento estratégico permite visualizar as conexões entre as inovações e os segmentos produtivos mais promissores para adoção das tecnologias.

4.3.3 Lacunas Tecnológicas no Mercado Brasileiro

A análise de lacunas tecnológicas no mercado brasileiro revela áreas onde há uma carência de soluções adequadas para os desafios enfrentados pelo setor sucroenergético. Grandes usinas têm incorporado tecnologias avançadas para otimizar a conversão de biomassa em bioenergia, mas pequenas e médias usinas ainda apresentam defasagem tecnológica. A ausência de investimentos em inovação e infraestrutura dificulta a implementação de processos mais eficientes, impactando negativamente a competitividade do setor (Barros *et al.*, 2018). O aprimoramento tecnológico dessas usinas poderia reduzir desperdícios e promover uma produção mais sustentável e economicamente viável (Amparo; Ribeiro; Guarieiro, 2012).

A economia circular, amplamente discutida como alternativa sustentável, ainda enfrenta desafios para ser plenamente integrada ao setor sucroenergético. A reutilização eficiente de resíduos, a otimização do uso da água e a recuperação de subprodutos continuam limitadas pela falta de incentivos tecnológicos e regulatórios. O conceito de bioeconomia circular, conforme discutido por Carus e Dammer (2018), destaca a necessidade de promover inovação em processos industriais para permitir o reaproveitamento de materiais e energia de forma mais eficaz. A ampliação dessas práticas não apenas minimizaria os impactos ambientais, mas também agregaria valor aos subprodutos da biomassa (Bocken *et al.*, 2016).

O desenvolvimento e a escalabilidade de biotecnologias avançadas representam outra lacuna significativa no setor. Embora biocatalisadores e processos enzimáticos tenham demonstrado grande potencial para a conversão de biomassa em produtos químicos e biocombustíveis, sua aplicação em larga escala ainda é limitada. A falta de infraestrutura laboratorial adequada e os altos custos de implementação dificultam a adoção dessas inovações. Estudos indicam que políticas públicas voltadas à bioeconomia e ao financiamento de pesquisa poderiam acelerar a transição para tecnologias mais eficientes e sustentáveis (Bugge; Hansen; Klitkou, 2016).

A adoção de tecnologias digitais e automação na cadeia produtiva do setor sucroenergético ainda é reduzida. Sensores inteligentes, inteligência artificial e automação de processos poderiam proporcionar um monitoramento em tempo real mais preciso e eficiente, otimizando operações e reduzindo custos. Segundo

Bavaresco *et al.* (2017), a digitalização no setor sucroenergético pode resultar em aumentos expressivos de produtividade e eficiência energética, mas ainda existem barreiras associadas à adaptação tecnológica e ao custo de implementação inicial.

Outro desafio enfrentado é o desenvolvimento da indústria de bioplásticos a partir da biomassa. Apesar de avanços científicos na área, a produção de bioplásticos ainda não alcançou uma escala comercial significativa no Brasil. A falta de incentivos governamentais e infraestrutura industrial limita a viabilidade dessa alternativa sustentável ao plástico derivado do petróleo (Pavan *et al.*, 2021). De acordo com Hopewell, Dvorak e Kosior (2009), a implementação de políticas que estimulem a produção e o consumo de bioplásticos pode ser determinante para impulsionar a competitividade desse mercado.

A Tabela seguir ilustra as principais lacunas tecnológicas identificadas no setor sucroenergético brasileiro e suas implicações para a evolução do mercado e da inovação industrial.

Tabela 3: Lacunas Tecnológicas no Mercado Brasileiro

Lacuna Tecnológica	Impacto Econômico (1-5)	Urgência Regulatória (1-5)	Disponibilidade Tecnológica (1-5)	Complexidade de Escalabilidade (1-5)	Disponibilidade de Incentivos (1-5)	Nível de Criticidade (1-5)
Eficiência energética em pequenas e médias usinas	5	4	3	4	2	3.6
Integração de processos de economia circular	4	5	3	3	3	3.6
Escalabilidade de biotecnologias avançadas	4	3	2	5	2	3.2
Adoção de tecnologias digitais e automação	3	3	4	3	3	3.2
Desenvolvimento de bioplásticos a partir de biomassa	3	4	2	4	2	3.0

Fonte: Autoria própria (2025)

Diante dessas lacunas tecnológicas identificadas no setor sucroenergético brasileiro, a próxima seção explora as perspectivas e potencialidades econômicas que podem emergir a partir da implementação de tecnologias inovadoras e da integração de práticas sustentáveis no setor sucroenergético.

4.3.4 Oportunidades de Negócios

As oportunidades de negócios dentro da bioeconomia circular no setor sucroenergético brasileiro são vastas e surgem a partir da interseção entre as tecnologias emergentes, as lacunas identificadas e as demandas do mercado. Com base na análise das patentes e das barreiras tecnológicas, destacam-se algumas áreas estratégicas com grande potencial de inovação e geração de valor.

Uma das principais oportunidades está na eficiência energética em pequenas e médias usinas. A implementação de tecnologias mais avançadas, como caldeiras de alta eficiência, otimização térmica e cogeração de energia a partir de resíduos da biomassa, pode aumentar a competitividade dessas usinas. Modelos de negócios focados na prestação de serviços energéticos, como contratos de eficiência energética e geração distribuída, podem ser explorados, reduzindo custos operacionais e promovendo maior sustentabilidade (Barros *et al.*, 2018).

A integração de processos de economia circular também representa uma grande oportunidade. Tecnologias de valorização de resíduos da cana-de-açúcar, como a conversão de vinhaça em biofertilizantes e a produção de biogás a partir de torta de filtro, podem agregar valor à cadeia produtiva. A adoção de modelos de simbiose industrial, em que os subprodutos de um processo servem como matéria-prima para outro, pode transformar resíduos em ativos econômicos (Carus; Dammer, 2018).

A escalabilidade de biotecnologias avançadas abre caminho para novos bioprodutos e processos. O uso de microrganismos geneticamente modificados para otimizar a fermentação e a produção de bioquímicos pode impulsionar setores como a indústria química e de bioplásticos. Empresas que investirem na criação de biocatalisadores eficientes e na aplicação de processos enzimáticos para conversão de biomassa lignocelulósica poderão se destacar no mercado de bioinsumos (Bugge; Hansen; Klitkou, 2016).

A adoção de tecnologias digitais e automação no setor sucroenergético pode melhorar a previsibilidade da produção e aumentar a eficiência operacional. O uso de sensores inteligentes para monitoramento do solo e do crescimento da cana, bem como algoritmos de inteligência artificial para otimização de colheitas e logística, pode reduzir perdas e aumentar a produtividade. Startups e empresas de tecnologia podem

explorar soluções voltadas para o conceito de smart farming, promovendo a digitalização da agroindústria (Bavaresco *et al.*, 2017).

O desenvolvimento de biorrefinarias integradas representa uma das principais tendências globais na bioeconomia circular. Essas unidades industriais avançadas são capazes de converter biomassa em uma ampla gama de produtos de alto valor agregado, como biocombustíveis, bioquímicos e biomateriais. Além da produção de etanol e bioeletricidade, biorrefinarias modernas podem gerar plásticos biodegradáveis, solventes verdes e ingredientes para a indústria farmacêutica e cosmética. O avanço nesse segmento pode permitir ao Brasil agregar maior valor à biomassa da cana, ampliando sua competitividade internacional (FAAIJ, 2006).

As soluções de valorização de resíduos também despontam como uma área de alto potencial. Tecnologias inovadoras para a conversão de resíduos da cana-de-açúcar, como o bagaço e a vinhaça, podem transformar esses subprodutos em biogás, biochar, bioplásticos e até proteínas para a nutrição animal. A vinhaça, por exemplo, pode ser tratada para a recuperação de nutrientes e utilizada como biofertilizante, reduzindo a dependência de insumos químicos importados. Essas estratégias estão alinhadas com as diretrizes de economia circular e podem reduzir significativamente o impacto ambiental da indústria sucroenergética (Pavan *et al.*, 2021).

Além disso, as parcerias intersetoriais abrem novas oportunidades de sinergia entre o setor sucroenergético e outras indústrias, como a química, farmacêutica e de biotecnologia. Empresas que investirem na colaboração com centros de pesquisa e startups poderão desenvolver novos produtos baseados em biomassa, como fármacos derivados de compostos bioativos presentes na cana. O desenvolvimento de insumos renováveis para a indústria de polímeros e adesivos é outra possibilidade promissora, capaz de substituir derivados do petróleo por soluções de base biológica (Bocken *et al.*, 2016).

Por fim, o desenvolvimento de bioplásticos a partir da biomassa representa um mercado promissor. A conversão de açúcares e lignina em polímeros biodegradáveis pode reduzir a dependência de plásticos fósseis e atender à crescente demanda por soluções sustentáveis. Empresas que investirem em pesquisas para tornar o processo mais econômico e escalável poderão obter vantagens competitivas, principalmente no contexto das novas regulamentações ambientais e de restrições ao uso de plásticos convencionais (Pavan *et al.*, 2021).

O mapeamento dessas oportunidades demonstra que a bioeconomia circular no setor sucroenergético brasileiro tem potencial para gerar novas cadeias de valor, impulsionar a inovação e promover um modelo de desenvolvimento mais sustentável. A adoção de políticas públicas favoráveis, incentivos financeiros e colaborações entre empresas, universidades e centros de pesquisa será fundamental para a concretização dessas oportunidades.

4.3.5 Análise de Palavras das Patentes

A análise das palavras-chave utilizadas nas buscas por patentes revelou padrões estratégicos na identificação de tendências tecnológicas e setores emergentes na bioeconomia circular do setor sucroenergético brasileiro. O uso dessas combinações permitiu mapear áreas de inovação, oportunidades de internacionalização e o potencial de aplicação de novas tecnologias no mercado nacional.

A presença das palavras-chave "biomass", "recycling", "residue", "reuse" e "bioeconomy" indicou um forte direcionamento das buscas para tecnologias relacionadas ao aproveitamento de biomassa e resíduos. Isso reforçou a crescente relevância de processos sustentáveis e soluções voltadas à valorização de resíduos da cana-de-açúcar, como a produção de biogás, biofertilizantes e biomateriais. A inclusão da expressão "technological routes" AND "Brazil" possibilitou a identificação de tecnologias emergentes desenvolvidas ou aplicadas no contexto brasileiro. Além disso, a presença da palavra "sustainability" demonstrou um interesse recorrente por soluções inovadoras que equilibrassem viabilidade econômica e impactos ambientais. Isso esteve alinhado às diretrizes da bioeconomia circular, que visou reduzir desperdícios e promover processos de baixo carbono.

As buscas que combinaram "biomass" OR "bioeconomy" OR "technological routes" refletiram o interesse por avanços tecnológicos capazes de transformar a indústria sucroenergética. O uso de inteligência artificial, automação e biotecnologias para aprimorar processos de fermentação, conversão de biomassa e produção de bioprodutos apareceu como um diferencial competitivo para o setor. Além disso, a presença de patentes estrangeiras no Brasil foi identificada ao cruzar palavras-chave como "technological routes" AND "Brazil", o que indicou que empresas e instituições de pesquisa internacionais estavam investindo no desenvolvimento de soluções aplicáveis ao mercado nacional. O setor sucroenergético brasileiro, por ser um dos

maiores produtores de biomassa do mundo, mostrou grande potencial para absorver e adaptar tecnologias globais.

A interseção das buscas entre "sugarcane", "bioeconomy" e "circular economy" demonstrou que a bioindústria da cana foi analisada sob uma perspectiva mais ampla, onde seus subprodutos puderam ser utilizados em diferentes segmentos, como química fina, farmacêutica, bioplásticos e geração de energia renovável. Esse cenário evidenciou a importância das biorrefinarias integradas, que permitiram maximizar a conversão da biomassa em múltiplos produtos de alto valor agregado. A estratégia de busca adotada possibilitou um mapeamento detalhado de patentes relevantes para o avanço da bioeconomia circular no setor sucroenergético brasileiro, abrangendo desde tecnologias emergentes até aplicações sustentáveis, permitindo uma visão ampla das tendências globais e das lacunas tecnológicas a serem exploradas no mercado nacional.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo identificar as rotas tecnológicas para a bioeconomia circular no setor sucroenergético brasileiro, buscando mapear oportunidades que contribuam para a sustentabilidade e eficiência desse setor. Os resultados obtidos permitiram compreender as principais tendências tecnológicas, bem como as lacunas existentes e as oportunidades de inovação. Dessa forma, foi possível alinhar as descobertas ao propósito inicial do estudo, evidenciando que a integração de novas tecnologias e práticas circulares pode gerar valor agregado à cadeia produtiva da cana-de-açúcar e ampliar a competitividade do setor no Brasil e no mercado global.

A metodologia empregada, baseada na revisão sistemática da literatura e na análise de patentes, demonstrou-se eficaz para o mapeamento das rotas tecnológicas relevantes. A combinação de ferramentas bibliométricas, classificação de patentes e análise de redes tecnológicas permitiu uma visão abrangente das inovações aplicáveis ao setor sucroenergético. Essa abordagem contribuiu para a identificação de tecnologias promissoras e setores industriais correlatos, proporcionando insights sobre a transferibilidade e adaptação dessas soluções em diferentes contextos.

Ao avaliar os resultados de forma global, percebe-se que a bioeconomia circular no setor sucroenergético está fortemente relacionada à valorização integral de subprodutos, à eficiência energética, ao ciclo de vida sustentável e à integração de práticas circulares. A análise indicou que a adoção de biotecnologias, o aproveitamento avançado de biomassa e a digitalização dos processos podem promover melhorias significativas na cadeia produtiva.

Diante da análise das tecnologias e das tendências observadas, as melhores rotas tecnológicas para a bioeconomia circular do setor sucroenergético no Brasil são:

- Digestão anaeróbia - para produção de biogás a partir da vinhaça;
- Cogeração de energia - otimizando o aproveitamento do bagaço da cana;
- Etanol de segunda geração (2G) - utilizando celulose da biomassa para ampliar a produção de biocombustíveis;
- Pirólise e liquefação hidrotermal - para conversão de biomassa residual em bio-óleo e bioprodutos sustentáveis;

- Gaseificação e combustão - transformando resíduos da cana em energia térmica e elétrica.

A implementação dessas rotas promove maior eficiência no uso da biomassa, reduz desperdícios e fortalece a sustentabilidade do setor, alinhando-se às estratégias de economia circular e inovação tecnológica. Contudo, desafios como a falta de infraestrutura e incentivos regulatórios ainda são barreiras para a expansão dessas inovações.

A pesquisa também demonstrou que as soluções tecnológicas mapeadas estão alinhadas a três Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) prioritários: ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). O desenvolvimento e a implementação de biotecnologias e processos circulares podem impulsionar a industrialização sustentável, gerar empregos qualificados e aumentar a eficiência na utilização dos recursos naturais, contribuindo diretamente para esses objetivos globais.

Apesar dos avanços apresentados, o estudo identificou lacunas que podem ser exploradas em pesquisas futuras. A falta de políticas de incentivo e financiamento para P&D no setor sucroenergético é um dos principais entraves para a adoção de novas tecnologias. Além disso, a ausência de um ecossistema consolidado de colaboração entre empresas, universidades e instituições de pesquisa limita a transferência de conhecimento e o desenvolvimento de soluções customizadas para as necessidades do setor. Assim, sugere-se que estudos futuros explorem formas de viabilizar parcerias público-privadas e modelos de financiamento para a inovação sustentável.

Por fim, a síntese dos resultados evidencia que a bioeconomia circular no setor sucroenergético brasileiro possui um enorme potencial para alavancar o desenvolvimento sustentável, promover a redução de impactos ambientais e aumentar a eficiência produtiva. A adoção de biotecnologias, o aproveitamento de subprodutos e a digitalização dos processos são caminhos promissores para consolidar a transição para um modelo econômico mais circular. No entanto, para que essas transformações ocorram de maneira eficaz, é essencial que haja um maior suporte governamental, investimentos em infraestrutura e uma abordagem integrada entre os diferentes atores da cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS

- AMPARO, Keize Katiane dos Santos; RIBEIRO, Maria do Carmo Oliveira; GUARIEIRO, Lílian Lefol Nani. **Estudo de caso utilizando mapeamento de prospecção tecnológica como principal ferramenta de busca científica.** *Perspectivas em Ciência da Informação*, São Paulo, v. 17, p. 195-209, 2012.
- ANDREWS, Mark; et al. **Integration of artificial intelligence in circular economy practices.** *Journal of Sustainable Development*, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2023.
- BAKKER, Cornelia Ariadne et al. **Products that last: product design for circular business models.** TU Delft Library, 2014.
- BARROS, G.S.C.; GILIO, L.; CASTRO, N.R.; BELON, J.G.O.; RODRIGUES, L. **Especial temático mercado de trabalho do agronegócio: a dinâmica dos empregos formais na agroindústria sucroenergética de 2000 a 2016.** *Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA)*, Piracicaba, 2018.
- BAVARESCO, Janaína V.; CAVALETT, Otávio; QUEIROZ, João L.; JUNQUEIRA, Tassia L.; MANTOVANI, Adelar; FRANCO, Henrique C. J.; EZEQUIEL, Júlio M. B. **Sustainability assessment of sugarcane bioenergy systems: a review of methods and indicators.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 1209-1227, 2017.
- BENYUS, Janine M. **Biomimicry: innovation inspired by nature.** 2021.
- BERTO, Pietro J.; FERRAZ, Diogo; REBELATTO, Daisy Aparecida do Nascimento. **Economia circular, bioeconomia e investimento sustentável: uma revisão sistemática da literatura.** In: **XXVII Simpósio de Engenharia de Produção**, 2020.
- BIAN, Bin et al. **Microbial electrosynthesis from CO₂: challenges, opportunities and perspectives in the context of circular bioeconomy.** *Bioresource Technology*, v. 302, p. 122863, 2020.
- BOCKEN, Nancy M. P. et al. **Product design and business model strategies for a circular economy.** *Journal of Industrial and Production Engineering*, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.
- BOSCHI, Alexandre; POLLICE, Fabio; BATOCCHIO, Antonio. **Blockchain como elemento viabilizador na gestão da economia circular das cadeias de suprimentos.** 2020.
- BOSTON CONSULTING GROUP. Circular economy - Circe intelligence.** Disponível em: <https://www.bcg.com/capabilities/climate-change-sustainability/circular-economy-circelligence>. Acesso em: 3 mar. 2024.
- BRASIL. Lei nº 13.123, de 20 de maio de 2015.** Regulamenta o inciso II do §1º e o §4º do art. 225 da Constituição Federal, o art. 1º, o caput e os §§1º, 2º e 4º do art. 8º e os arts. 10, 16 e 17 da Convenção sobre Diversidade Biológica, promulgada pelo Decreto nº 2.519, de 16 de março de 1998, institui regras para o acesso ao patrimônio genético e ao conhecimento tradicional associado e para a repartição de benefícios para conservação e uso sustentável da biodiversidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, 20 maio 2015.

BRASKEM. Uso de biomassa para produção de biopolímeros e plásticos verdes. Estudos de caso disponíveis na Ellen MacArthur Foundation. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BUGGE, Markus M.; HANSEN, Teis; KLITKOU, Antje. **What is the bioeconomy? A review of the literature.** *Sustainability*, v. 8, n. 7, p. 691, 2016.

CARUS, M.; DAMMER, L. **The circular bioeconomy—concepts, opportunities, and limitations.** Nova-Institut, 2018.

CARUS, Michael; DAMMER, Lara. **The circular bioeconomy—concepts, opportunities, and limitations.** *Industrial Biotechnology*, v. 14, n. 2, p. 83-91, 2018.

CASTELLS, Manuel et al. **Information technology, globalization and social development.** Geneva: UNRISD, 1999.

CASTRO, H. F. **Processos químicos industriais II—Apostila 2: indústria alcooleira.** Escola de Engenharia de Lorena—EEL, Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2013.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. PIB Cadeias do Agronegócio. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx#:~:text=Considerando%2Dse%20os%20desempenhos%20parciais,%2C5%25%20registrados%20em%202021>. Acesso em: 09 out. 2022.

CHIRANJEEVI, P. et al. **Waste derived bioeconomy in India: a perspective.** *New Biotechnology*, v. 40, p. 60-69, 2018.

CLAUDINO, Edison S.; TALAMINI, Edson. **Análise do ciclo de vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, p. 77-85, 2013.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Bioeconomia no Brasil: desafios e oportunidades. Brasília: CNI, 2023. Disponível em: <https://www.cni.org.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Descarboniza Brasil: estratégias para uma economia sustentável. Brasília: CNI, 2023. Disponível em: <https://www.cni.org.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

COCA-COLA BRASIL. Circularidade no uso de bioplásticos em embalagens sustentáveis. Estudos disponíveis no site da empresa. Acesso em: 21 jan. 2025.

COELHO, Gilda Massari et al. **Caminhos para o desenvolvimento em prospecção tecnológica: technology roadmapping—um olhar sobre formatos e processos.** *Parcerias Estratégicas*, v. 10, n. 21, p. 199-234, 2010.

CONCEIÇÃO, Rochele Santos da. **Uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de uma rota tecnológica aplicada ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Caxias do Sul/RS.** 2018.

CONDE, Lucivam Junio. **Economia circular nos processos agroindustriais: um estudo sobre oportunidades e barreiras no Estado de São Paulo.** 2022.

COSAN. Diversificação de produtos e iniciativas de circularidade no setor sucroenergético. Relatórios disponíveis na UNICA. Acesso em: 21 jan. 2025.

DA SILVA, Robson Leal; DA SILVA, Aletéia Marcelle Primão. **Bioenergia da biomassa residual: potencial energético da combustão da casca de arroz em Dourados-MS e região.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 1, 2016.

DAHIYA, Shikha et al. **Food waste biorefinery: sustainable strategy for circular bioeconomy.** *Bioresource Technology*, v. 248, p. 2-12, 2018.

DANTAS, Guilherme A.; LEGY, Luiz FL; MAZZONE, Antonella. **Energy from sugarcane bagasse in Brazil: an assessment of the productivity and cost of different technological routes.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 21, p. 356-364, 2013.

DE ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes. **A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão.** *Sistemas & Gestão*, v. 14, n. 2, p. 223-231, 2019.

DE CARMARGO BARROS, Geraldo Sant'Ana et al. **Execução: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq).**

DE MIRANDA, Ronaldo Leão; MARTINS, Eliane Maria; LOPES, Kamila. **A potencialidade energética da biomassa no Brasil.** *Desenvolvimento Socioeconômico em Debate*, v. 5, n. 1, p. 94-106, 2019.

DE VASCONCELOS FERREIRA, Ismael; KAUFMANN, Jean-Claude. **A entrevista compreensiva: um guia para pesquisa de campo.** Petrópolis: Vozes; Maceió: Edufal, 2013. 202 p. ISBN: 978-85-326-4637-8.

DIBO, Ana Paula Alves. **A inserção de impactos ambientais cumulativos em Estudos de Impacto Ambiental: o caso do setor sucroenergético paulista.** 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

E SILVA, Daniella Fartes dos Santos; BOMTEMPO, José Vitor; ALVES, Flávia Chaves. **Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector.** *Journal of Cleaner Production*, v. 218, p. 871-879, 2019.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Ellen MacArthur Foundation - Studies and Reports on Circular Economy. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. The Circular Economy in Detail - Deep Dive. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail-deep-dive>. Acesso em: 05 mar. 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. The Circular Economy in Detail. 2022. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *What is a circular economy?* Ellen MacArthur Foundation, 2017.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Agroindústria Brasileira. Disponível em: <https://www.embrapa.br/grandes-contibuicoes-para-a-agriculturabrasileira/agroindustria>. Acesso em: 09 out. 2022.

EMBRAPA. Relatórios sobre bioeconomia e circularidade no agronegócio brasileiro. Disponível em: <https://embrapa.br>. Acesso em: 21 jan. 2025.

EMBRAPA. Avanços tecnológicos na produção de bio-óleo, gás de síntese, hidrogênio e etanol a partir de biomassa florestal. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/202632/avancos-tecnologicos-na-producao-de-bio-oleo-gas-de-sintese-hidrogenio-e-etanol-a-partir-de-biomassa-florestal>. Acesso em: 24 out. 2023.

EMBRAPA. Reciclagem de resíduos orgânicos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrobiologia/fazendinha-agroecologica/reciclagem-de-residuos-organicos>. Acesso em: 29 out. 2023.

EMBRAPA. Visão 2030 - O futuro da agricultura brasileira. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>. Acesso em: 29 out. 2023.

ENSINAS, Adriano V.; ARNAO, Juan Harold Sosa; NEBRA, Silvia Azucena. **Increasing energetic efficiency in sugar, ethanol, and electricity producing plants.** In: *Sugarcane bioethanol: R&D for productivity and sustainability*, p. 583-600, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. *Bioeconomy: the European way to use our natural resources sustainably.* European Union, 2023. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/bioeconomy_en. Acesso em: 20 jan. 2025.

EVANGELISTA, Mafalda et al. **CEO's guide to the circular bioeconomy.** *World Business Council for Sustainable Development*, 2021. Disponível em: https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2021/02/CEO-Guide-to-Bioeconomy_PT-digital-final.pdf. Acesso em: 09 out. 2022.

FAIJ, André. **Modern biomass conversion technologies.** *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, n. 2, p. 343-375, 2006.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Sustainable bioeconomy guidelines: pathways to sustainable development.* 2020. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 6 jan. 2025.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Sustainable bioeconomy guidelines.* Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

FAO (Food and Agriculture Organization). *Sustainability and bioeconomy in agro-industries.* Disponível em: <https://fao.org>. Acesso em: 21 jan. 2025.

FAO. *The state of food and agriculture 2022: leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems.* Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

FARIA, E. de O.; CALDEIRA-PIRES, Armando de Azevedo. **Economia circular e bioeconomia: como as abordagens se relacionam.** In: *7º Workshop Acadêmico Internacional em Produção Limpa Avançada*, Anais..., Barranquilla, Colombia, 2018.

FELLOWS FILHO, Lélío. **Mapas de rotas tecnológicas – roadmaps: conceitos, tipos e etapas de elaboração** [apresentação INPE]. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), jul. 2007.

FIRAT, Ayse Kaya; WOON, Wei Lee; MADNICK, Stuart. **Technological forecasting – a review**. Composite Information Systems Laboratory (CISL), Massachusetts Institute of Technology, p. 1-19, 2008.

FOELKEL, Celso. **As biorrefinarias integradas no setor brasileiro de fabricação de celulose e papel de eucalipto**. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, p. 1-270, 2012.

FRADJ, Nosra Ben et al. **Contribution of agricultural systems to the bioeconomy in Poland: integration of willow in the context of a stylised CAP diversification**. *Land Use Policy*, v. 99, p. 104797, 2020.

GARCÍA-PÉREZ, María et al. **Measuring circularity: development of new indicators for sustainability**. *Sustainability Metrics Review*, v. 7, n. 1, p. 50-63, 2024.

GONÇALVES, Taynara Martins; BARROSO, Ana Flavia da Fonseca. **A economia circular como alternativa à economia linear**. *Anais do XI SIMPROD*, 2019.

GranBio. *Produção de bioenergia e biocombustíveis avançados e circularidade de recursos no Brasil*. Relatórios disponíveis no site da empresa e em publicações setoriais. Disponível em: <https://granbio.com.br>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HAWKEN, Paul; LOVINS, Amory B.; LOVINS, L. Hunter. **Natural capitalism: the next industrial revolution**. Routledge, 2013.

HIGGINS, Andrew J.; MUCHOW, Russell C. **Assessing the potential benefits of alternative cane supply arrangements in the Australian sugar industry**. *Agricultural Systems*, v. 76, n. 2, p. 623-638, 2003.

HOPEWELL, Jefferson; DVORAK, Robert; KOSIOR, Edward. **Plastics recycling: challenges and opportunities**. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 2115-2126, 2009.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Renewable energy market update 2023*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

International Renewable Energy Agency (IRENA). *Reports on biomass and bioeconomy*. Disponível em: <https://irena.org>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ISENSEN, Raymond S. **Project hindsight**. Office of the Director of Defense Research and Engineering, Washington DC, 1969.

JOHNSON, Amy; SMITH, Robert. **The role of public policies in accelerating circular economy adoption**. *Global Environmental Strategies*, v. 11, n. 2, p. 30-42, 2023.

JUNIOR, Antônio Djalma Nunes Ferraz et al. **Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 157, p. 112045, 2022.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. **Fundamentals of anaerobic digestion, biogas purification, use and treatment of digestate**. 2022.

KUPFER, David; TIGRE, Paulo Basto; ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO CINTERFOR. **Modelo SENAI de prospecção: documento**

metodológico. Capítulo 2: prospecção tecnológica. *Organización Internacional del Trabajo CINTERFOR Papeles de la Oficina Técnica*, n. 14, 2004.

LEE, Sungjoo. **Linking technology roadmapping to patent analysis.** In: *Technology roadmapping for strategy and innovation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 267-284.

LI, Fang et al. **Advances in bioreactors for bio-based circular economy.** *Industrial Biotechnology*, v. 19, n. 1, p. 11-22, 2024.

LINARES, Ian Marques Porto. **Prospecção tecnológica na área de biotecnologia: uma abordagem baseada em rotas tecnológicas.** 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

MACARTHUR, E. **Towards the circular economy: opportunities for the consumer goods sector.** Ellen MacArthur Foundation, London, 2013. DOI v. 10, n. 108819806775545321.

MANOS, Maria Geovania Lima et al. **Tecnologia e inovação na cadeia produtiva sucroenergética do estado de Sergipe: caracterização do setor e identificação dos padrões de inovação.** 2009.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **RenovaBio: estratégias e resultados.** Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MARTINS, José Vitor Bomtempo; PEREIRA, Felipe dos Santos; OLIVEIRA E SILVA, Martim Francisco de. **A bioeconomia brasileira em números.** *Bioeconomia: BNDES Setorial*, v. 47, 2018.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **Cradle to cradle: remaking the way we make things.** North Point Press, 2010.

MEHMOOD, Tahir et al. **Bioconversion of agro-industrial waste into value-added compounds.** In: *Sustainable bioconversion of waste to value added products*, p. 349-368, 2021.

MISHRA, Shrutika; MISHRA, Priyanshu. **AI business models: a strategic business dynamics.** 2022.

NOVA CANA. **Produção de açúcar do Brasil em 2019/20 deverá crescer para 31 milhões de toneladas, diz Job.** 2019. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/producao-acucar-brasil-2019-20-crescer-31-milhoes-toneladas-job-160519>. Acesso em: 09 maio 2020.

NYKO, Diego et al. **A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural?.** *BNDES Setorial*, n. 37, mar. 2013, p. 399-442, 2013.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda.** Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PALACIOS-BERECHÉ, M. C. et al. **Brazilian sugar cane industry—a survey on future improvements in the process energy management.** *Energy*, v. 259, p. 124903, 2022.

PANT, Deepak et al. **Towards the development of a biobased economy in Europe and India.** *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 39, n. 6, p. 779-799, 2019.

PAVAN, Margareth de C. Oliveira et al. **Circular business models for bioelectricity: a value perspective for sugar-energy sector in Brazil.** *Journal of Cleaner Production*, v. 311, p. 127615, 2021.

PEDRO, Edilson da Silva; ALVES, Maria Rita Pontes Assumpção. **Capacitação e gestão tecnológica agroindustrial: um estudo de caso no setor sucroalcooleiro.**

PIACENTE, Fabrício José; PIACENTE, Erik Augusto. **Desenvolvimento sustentável na agroindústria canavieira: uma discussão sobre os resíduos.** UNICAMP.

PLURA, *Revista de Estudos de Religião*/PLURA, *Journal for the Study of Religion*. v. 5, n. 1, jan-jun, p. 171-174, 2014.

PORTO, Geciane et al. **Subprojeto 3-Rotas tecnológicas e sistemas de inovação produto 03—estrutura SASTec.** *Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo*. FUNDACE–BNDES. Ribeirão Preto–SP, 2012.

PROENÇA, Ubajara Cesare Mozart. **Resíduos orgânicos para produção de biochar: desenvolvimento de peletizadora, mufla para queima em pirólise e desempenho da cultura do sorgo.** 2017.

ProQuest Dissertations & Theses. *Academic theses and case studies on practical applications of circular economy.* Disponível em: <https://proquest.com>. Acesso em: 21 jan. 2025.

RADNOR, Michael. **Roadmapping: how does it work in practice?** In: *Proceedings of the National Center for Manufacturing Sciences Conference and Exposition*, 1998.

RAÍZEN. *Práticas de reaproveitamento de biomassa e cogeração de energia no setor sucroenergético.* Relatório disponível na UNICA e Embrapa. Acesso em: 21 jan. 2025.

RIBEIRO, Antônio de Lima. **Teorias da administração.** Saraiva Educação SA, 2017.

RICHARDSON, James E. **The business model: an integrative framework for strategy execution.** *Available at SSRN*, 932998, 2005.

SALVADOR, Rodrigo et al. **Key aspects for designing business models for a circular bioeconomy.** *Journal of Cleaner Production*, v. 278, p. 124341, 2021.

SILVEIRA, Denise Tolfo; CORDOVA, Fernanda Peixoto; BUENO, André Luis Machado. **Tecnologias de informação e comunicação.** *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. p. 91-96, 2009.

SPASH, Clive L. **The ecological economics of Boulding's Spaceship Earth.** 2013.

STAHEL, Walter. **The performance economy.** Springer, 2010.

TEECE, David J. **Business models, business strategy and innovation.** *Long Range Planning*, v. 43, n. 2-3, p. 172-194, 2010.

TELFER, David. **The Brundtland Report (Our Common Future) and tourism.** In: *The Routledge Handbook of Tourism and the Environment*. Routledge, 2012. p. 235-248.

The Case Centre. *Global repository of case studies on circular economy.* Disponível em: <https://thecasecentre.org>. Acesso em: 21 jan. 2025.

TOOR, Saqib Sohail; ROSENDAHL, Lasse; RUDOLF, Andreas. **Hydrothermal liquefaction of biomass: a review of subcritical water technologies.** *Energy*, v. 36, n. 5, p. 2328-2342, 2011.

TROMBETA, Natália de Campos; CAIXETA, José Vicente. **Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais.** *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 55, p. 479-496, 2017.

TURSI, Antonio. **A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion.** *Biofuel Research Journal*, v. 6, n. 2, p. 962, 2019.

UN, Brasil. *Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.* Nações Unidas Brasil, 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 23 out. 2022.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. *Perspectivas para o setor sucroenergético.* São Paulo: UNICA, 2023. Disponível em: <https://www.unica.com.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. *Relatório sobre a contribuição do setor sucroenergético para a economia brasileira.* 2023.

UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar). *Estudos de caso sobre o setor sucroenergético no Brasil.* Disponível em: <https://unica.com.br>. Acesso em: 21 jan. 2025.

WALTER, Arnaldo; ENSINAS, Adriano V. **Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues.** *Energy*, v. 35, n. 2, p. 874-879, 2010.

WCED - World Commission on Environment and Development. *Our common future.* Oxford: Oxford University Press, 1987.

WEBSTER, Ken. **The circular economy: a wealth of flows.** [S.l.]: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

WIRTZ, Bernd W. et al. **Business models: origin, development and future research perspectives.** *Long Range Planning*, v. 49, n. 1, p. 36-54, 2016.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). *CEO guide to the circular bioeconomy.* 2019.

WORLD ECONOMIC FORUM. *The future of nature and business.* Geneva: WEF, 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ZHANG, Yong et al. **Carbon capture technologies in circular economy: applications and implications.** *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 42, n. 4, p. 120-132, 2023.