

Produção de etanol de cana-de-açúcar e sistemas de inovação

JOSÉ LUIZ ROMERO DE BRITO

PATRICIA HELENA LARA DOS SANTOS MATAI

MARIO ROBERTO DOS SANTOS

Introdução

Os combustíveis fósseis desempenham um papel essencial na economia mundial, fornecendo energia e matérias-primas para a produção industrial e para o consumo privado. No entanto, constituem a principal fonte de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, acarretando aquecimento global, com consequências ambientais e econômicas. Várias matérias-primas estão sendo exploradas para interromper a movimentação da cesta de alimentos para as refinarias de etanol. Por outro lado, demandas em todo o mundo requerendo a mistura de etanol à gasolina aumentaram ainda mais a demanda global de etanol.

Problema de Pesquisa e Objetivo

A inovação para o desenvolvimento econômico tornou-se uma prática e um desafio cada vez mais importantes, tanto para as empresas industriais quanto para as agências do setor público nos países em desenvolvimento. Há fortes interesses em aprender com os países desenvolvidos, adaptando suas teorias de gestão quando necessário. O objetivo da pesquisa foi verificar na literatura como os pesquisadores estão avaliando a inovação na produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar e responder à questão: como estão sendo abordados os processos de inovação para a produção de etanol de cana-de-açúcar?

Fundamentação Teórica

O processamento da cana-de-açúcar gera grandes quantidades de resíduos, podendo ser valorizados em biocombustíveis e produtos químicos de valor agregado baseado no conceito de bioeconomia. Inovações nesse setor é uma estratégia fundamental para promover a transição para uma sociedade menos dependente dos combustíveis fósseis. Inovação é uma forma de definir uma necessidade ou um problema, gerar ideias novas ou alteradas e desenvolver um resultado de acordo com ideias novas ou alteradas, implementar um resultado novo ou aprimorado e adotando um resultado novo ou aprimorado com valor agregado.

Metodologia

Foram realizadas pesquisas na base de dados ScienceDirect, utilizando-se as palavras ethanol and innovation e sugarcane and innovation, limitadas por tipo review e research e excluídas encyclopedia e book chapters. Essa base foi escolhida por ter periódicos relevantes, classificados no extrato Qualis A1 (2017-2020), alto fator de impacto dos periódicos e, também, por facilidade de acesso. A pesquisa foi realizada em março e abril de 2023 e, tendo como limite, os artigos publicados até o ano de 2022. A pesquisa não foi restrita somente a artigos sobre a produção brasileira de etanol.

Análise dos Resultados

O etanol é o setor que mais se beneficiou da colaboração com os centros de pesquisa do país em importantes inovações adotadas para melhorar o processo produtivo e avanços tecnológicos em novos produtos a partir de subprodutos da cana-de-açúcar. Empresas reduziram o investimento em P&D de bioplantas, permanecendo no mesmo nível tecnológico e, portanto, no mesmo nível de produção. Para que haja sucesso, os investimentos em P&D em setores de base biológica devem ser complementados com políticas e estratégias coerentes a nível regional e nacional para reduzir a expansão ilegal de terras agrícolas.

Conclusão

Foram apresentadas sugestões para estratégias para o desenvolvimento de processos de inovação; alertas sobre a incerteza do processo e constatações como, por exemplo biocombustíveis podem fazer contribuições importantes para o desenvolvimento econômico rural e maior sustentabilidade; políticas públicas de biocombustíveis afetaram a P&D; o setor apresenta um ambiente rígido para a inovação, e poderá incluir parcerias internacionais que unam esforços, contudo, uma estratégia de desenvolvimento nacional que vise dar conta das particularidades brasileiras também deve ser levada em consideração.

Referências Bibliográficas

Figueiredo, P. N. (2017). Micro-level technological capability accumulation in developing economies Insights from the Brazilian sugarcane ethanol industry. *Journal of Cleaner Production*, 167, 416-431
Furtado, A. T., Hekkert, M. P., Negro, S. O. (2020). Of actors, functions, and fuels Exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil. *Energy Research & Social Science*, 70, 101706
Silva, D. F. S., Bomtempo, J. V., Alves, F. C. (2019). Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector. *Journal of Cleaner Production*, 218, 871-8

Palavras Chave

Etanol, Cana-de-açúcar, Inovação

PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR E SISTEMAS DE INOVAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis desempenham um papel essencial na economia mundial, fornecendo energia e matérias-primas para a produção industrial e para o consumo privado. No entanto, também constituem a principal fonte de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE), acarretando aquecimento global, com consequências ambientais e econômicas (Nong, Escobar, Britz, & Borner, 2020).

O transporte está entre os setores altamente dependentes desses combustíveis fósseis, contando quase exclusivamente com produtos petrolíferos. Os biocombustíveis têm sido sugeridos como uma tecnologia que contribui para a descarbonização desse setor, especialmente em subsetores onde o aumento da inovação em eletrificação é um desafio (Nikas, Koasidis, Köberle, Kourtesi, & Doukas, 2022).

Várias matérias-primas, tais como biomassa lignocelulósica, microalgas, plantas aquáticas, resíduos alimentares, resíduos sólidos municipais etc., estão sendo exploradas para atender às metas de desenvolvimento sustentável e interromper a movimentação de matérias-primas da cesta de alimentos para as refinarias de etanol. Por outro lado, incumbências substanciais em todo o mundo solicitando a mistura de etanol à gasolina aumentaram ainda mais a demanda global de etanol (Althuri & Mohan, 2022).

Várias correntes são responsáveis pelo crescente interesse global na bioeconomia. Uma delas é a necessidade urgente de reduzir as emissões de GEE de combustíveis fósseis, mudando para fontes de energia renováveis, que incluem biocombustíveis. Outra força motriz é o rápido progresso nas ciências da vida, que rendeu oportunidades inesperadas para criar produtos de base biológica e usar processos biotecnológicos em uma ampla gama de indústrias (Scheiterle, Ulmer, Birner, & Pyka, 2018).

Nos últimos anos, um número crescente de países decidiu promover o desenvolvimento de uma 'bioeconomia' e elaboraram políticas e estratégias de bioeconomia para atingir esse objetivo. A mudança de uma economia de base fóssil para uma economia de base biológica (bioeconomia) requer uma utilização mais eficiente da biomassa gerada pela produção agrícola. Isso pode ser alcançado por meio do uso em cascata de biomassa, que também oferece o potencial de criar valor adicional por meio do desenvolvimento de novos produtos (Scheiterle et al., 2018).

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo e possui a matéria-prima mais competitiva: a cana-de-açúcar. Três principais razões podem ser citadas: em primeiro lugar, o custo de produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil é menor, em comparação com milho e beterraba. Em segundo lugar, a cana-de-açúcar fornece maior produtividade de etanol por hectare do que o milho. Em terceiro lugar, redução das emissões de GEE mais significativa em comparação com o milho. Embora esta indústria tenha apresentado grandes ganhos de produtividade, ela ainda oferece oportunidades promissoras de inovação (Silva, Bomtempo, & Alves, 2019).

Nesse aspecto, inovações em tecnologias mais limpas e sistemas de produção que reduzam custos e danos ambientais têm despertado o interesse em pesquisas sobre capacidade tecnológica nas economias em desenvolvimento. Essas preocupações surgem do potencial dos prováveis danos ambientais derivados do crescimento econômico e industrial em países de baixa e média renda (Figueiredo, 2017).

De tal modo, a inovação para o desenvolvimento econômico tornou-se uma prática e um desafio cada vez mais importantes, tanto para as empresas industriais quanto para as agências do setor público nos países em desenvolvimento. Há fortes interesses em aprender com os

países desenvolvidos, adaptando suas teorias de gestão quando necessário (Hang & Chen, 2021).

Assim o objetivo desta pesquisa foi verificar na literatura como os pesquisadores estão avaliando a inovação na produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar e responder à questão: como estão sendo abordados os processos de inovação para a produção de etanol de cana-de-açúcar?

O artigo está delineado do seguinte modo, após essa introdução, a seção dois apresenta o referencial teórico; a seção três, o método de pesquisa; a seção, quatro os resultados e as discussões e a seção cinco, a conclusão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O mundo tem buscado alternativas limpas e renováveis para fornecer novos materiais e energia e, conseqüentemente, reduzir a dependência de combustíveis fósseis derivados do petróleo. A cana-de-açúcar tornou-se uma matéria-prima importante como solução para essa demanda, uma vez que é cultivada em mais de 100 países e pode potencialmente reduzir as emissões de GEE (Vandenberghe et al., 2022).

2.1 O SETOR SUCROENERGÉTICO E O ETANOL

A cana-de-açúcar é uma cultura das regiões tropicais e subtropicais usada como matéria-prima para a produção de açúcar e o seu bagaço, é um subproduto sendo uma matéria-prima de lignocelulose utilizada na produção de biocombustíveis devido ao seu alto teor orgânico, rendimento, facilidade de coleta e armazenamento. Os biocombustíveis, isto é, combustíveis derivados da biomassa, são uma forma de energia ecologicamente correta e uma alternativa aos combustíveis fósseis. A produção de biocombustível baseada em bagaço de cana-de-açúcar por meio da rota bioquímica é considerada uma opção ecológica (Pan, Zayed, Wei, & Qi, 2022).

Existem três gerações de biocombustíveis: (i) a primeira geração usa matérias-primas, como açúcar ou amido, para produzir etanol e sementes oleaginosas ou óleo residual para produzir biodiesel; (ii) a segunda geração usa matéria-prima não alimentar (a chamada biomassa lignocelulósica, como resíduos de colheitas) para obter diesel, combustível de aviação e gasolina que podem ser usados sem mistura em veículos existentes (ou seja substituição de combustíveis fósseis); (iii) a terceira geração ainda não é rentável e envolve a produção de diesel e combustível de aviação a partir de matérias-primas como microalgas (Figueiredo, 2017).

O etanol de cana-de-açúcar é um biocombustível produzido a partir da fermentação do caldo e do melaço da cana-de-açúcar. O etanol pode ser misturado à gasolina reduzindo o uso de petróleo, ou usado como etanol puro para alimentar motores específicos. Tornou-se um dos principais combustíveis renováveis para o transporte é um biocombustível limpo, acessível e com baixo teor de carbono; contribui para a mitigação das mudanças climáticas; reduz a poluição do ar e as emissões nocivas pelo escapamento, as emissões de GEE e as emissões de CO₂ (Figueiredo, 2017). Além disso, a flutuação dos preços do petróleo também estimula a produção de biocombustíveis a taxas economicamente viáveis (Shenbagamuthuraman et al., 2022).

Nesse sentido, o setor do agronegócio desempenha no Brasil um papel significativo na economia em termos de renda, emprego e comércio internacional, sendo a indústria sucroalcooleira uma das indústrias mais importantes para o agronegócio brasileiro (Danelon, Spolador, & Bergtold, 2023). O processamento da cana-de-açúcar resulta na geração de grandes quantidades de resíduos, que podem ser valorizados em biocombustíveis e produtos químicos de valor agregado com base no conceito de bioeconomia (Meghana & Shastri, 2020).

O setor sucroenergético brasileiro (industrial e agrícola) foi avaliado que a parte agrícola tem um enorme potencial de melhoria e inovação e considerou-se que a parte industrial é madura, induzindo dessa forma a ideia de poucas oportunidades de inovação nessa área. Entretanto, essa avaliação pode ser questionada se forem analisadas as oportunidades, por exemplo da transformação de resíduos (bagaço e vinhaça), em produtos, tais como etanol de segunda geração, bioeletricidade, biogás e produtos químicos de base biológica (Silva et al., 2019).

Por outro lado, uma das discussões sobre o uso da produção de alimentos para a fabricação de etanol foi abordada por Althuri e Mohan (2022). A produção atual de bioetanol global é impulsionada principalmente pela produção de alimentos dominante da respectiva região, ou seja, milho (Estados Unidos da América), cana-de-açúcar (Brasil), trigo (Europa) e mandioca (Tailândia e Nigéria). Essas matérias-primas não são atraentes para a produção comercial de etanol a longo prazo, pois afetam diretamente a cadeia de abastecimento de alimentos. No entanto, apesar das restrições, 83,7% do bioetanol produzido no mercado global é de matérias-primas, enquanto uma pequena fração de 4,2% é produzida a partir de fontes não alimentares.

Uma outra visão foi mostrada por Danelon et al. (2023) que citaram que o aumento da produtividade e da eficiência são fatores fundamentais para o setor do agronegócio brasileiro e, mais especificamente, para o setor sucroenergético. Este setor fornece uma contribuição significativa para a produção agrícola, emprego e necessidades de bioenergia do Brasil. Assim, a inovação no setor da energia é uma estratégia fundamental para promover a transição para uma sociedade menos dependente dos combustíveis fósseis (Oliveira et al., 2016).

2.2 INOVAÇÃO

Morad, Ragonis e Barak (2021) relataram que o interesse pela inovação aumentou nas últimas décadas, levando à introdução de uma variedade de definições do conceito por diferentes áreas de especialização, revelando diferentes perspectivas e interpretações. Os autores citaram que uma das primeiras definições foi dada por Schumpeter (1934) que associou inovação a algo novo. Posteriormente, outros autores definiram como algo que foi mudado; mudanças grandes e pequenas, radicais e incrementais, em produtos, processos e serviços; resolução de problemas como o gatilho da inovação; solução de problemas como "uma necessidade ou uma meta"; combinação desses dois aspectos, algo novo e etapas do processo.

Uma das definições clássicas de inovação, foi apresentada no Manual de Oslo da Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OCDE): “[...] é a implementação de um produto (bem ou serviço) novo ou significativamente melhorado, ou um processo, ou um novo método de marketing, ou um novo método organizacional nas práticas de negócios, na organização do local de trabalho ou nas relações externas.” (OCDE, 2005, p. 55). Segundo o mesmo manual, uma inovação poderá ser incremental ou radical.

Essa definição não é um consenso entre os pesquisadores. Baregheh, Rowley e Sambrook (2009) encontraram 60 definições e propuseram inovação como o processo de vários estágios pelos quais as organizações transformam ideias em produtos, serviços ou processos novos/aprimorados, a fim de avançar, competir e se diferenciar com sucesso em seu mercado. Os autores justificaram que, unindo ‘processo multiestágio’ com ‘transformar ideias em produtos novos/aprimorados’, não apenas captura todos os estágios que diferentes pesquisadores identificaram ou se referiram em suas definições de inovação, mas também destaca o fato de que as ideias são utilizadas e transformadas (juntamente com outros meios de inovação) para resultar em ‘produtos, serviços ou processos novos/aprimorados’, abordam os principais tipos de inovação identificados juntamente com o nível de mudança que envolvem.

Uma visão mais recente, foi apresentada por Morad et al. (2021) que sugeriram inovação como uma forma de definir uma necessidade ou um problema, gerar ideias novas ou alteradas

e desenvolver um resultado de acordo com ideias novas ou alteradas, implementar um resultado novo ou aprimorado para o destinatário, e adotando um resultado novo ou aprimorado com valor agregado. Sugeriram também que esse modelo geral pode ser adotado nesse formato ou pode ser adaptado a qualquer disciplina, pois também pode propor uma nova definição relevante que se relaciona com os princípios gerais, mas também expressa os requisitos exclusivos da disciplina em particular.

Outros atores importantes, tais como outras empresas, organizações de pesquisa e formação de recursos humanos, agências governamentais, além de políticas públicas, desempenham um papel relevante no processo de inovação. A inovação deve ser entendida como um processo interativo entre muitos e, por vezes, muito diferentes intervenientes (Furtado, Hekkert, & Negro, 2020).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este é um estudo descritivo, por meio de abordagens qualitativas, com ênfase em análise de conteúdo (Bardin, 2009). Uma revisão de literatura é uma característica de uma pesquisa acadêmica (Webster & Watson, 2002) e é uma parte importante de qualquer projeto de pesquisa (Tranfield, Denyer, & Smart, 2003).

Segundo Durach, Kembro e Wieland (2017), um processo de revisão sistemática de literatura compreende seis etapas: define a questão de pesquisa; determina as características da literatura a ser pesquisada; pesquisa essa literatura relevante; seleciona a literatura; sintetiza a literatura encontrada; e relata os resultados. Este artigo seguiu esse procedimento.

Foram realizadas pesquisas na base de dados *ScienceDirect*, utilizando-se as palavras “*ethanol and innovation*” e “*sugarcane and innovation*”, limitadas por tipo “*review*” e “*research*” e excluídas “*encyclopedia*” e “*book chapters*”. Essa base foi escolhida por ter periódicos relevantes, classificados no extrato Qualis A1 (2017-2020) da Plataforma Sucupira da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes, 2023) como, por exemplo, *Journal of Cleaner Production; Energy Policy; Renewable and Sustainable Energy Reviews*, entre outros, alto fator de impacto dos periódicos e, também, por facilidade de acesso. A pesquisa foi realizada em março e abril de 2023 e, tendo como limite, os artigos publicados até o ano de 2022. Observe-se que a pesquisa não foi restrita somente a artigos sobre a produção brasileira de etanol.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram encontrados 103 artigos na pesquisa com as palavras “*ethanol and innovation*” e 32 artigos com as palavras “*sugarcane and innovation*” presentes nos itens “*title, abstract, keywords*” totalizando 135 artigos. Na primeira avaliação, foram detectados 14 artigos comuns às duas pesquisas, reduzindo-se, dessa forma, para 121 artigos.

Após essa primeira avaliação, foram lidos os títulos para verificar se estes se enquadravam no objeto do estudo. Caso que não foi possível identificar pelo título, foram lidas as palavras-chave e os respectivos *abstracts* e, posteriormente, os artigos para serem avaliados. Esse filtro definiu 42 artigos selecionados para avaliação e 79 artigos excluídos. Foram excluídos artigos, como, por exemplo, produção de etanol responsável pelo aumento do preço do milho; pesquisa em biotecnologia; bioprocessamento de amido; difusão dos veículos elétricos no Brasil; cascata de plantas de bioenergia; indústria do petróleo podem abrir caminho para as energias renováveis no Brasil; entre outros. Os 42 artigos avaliados estão relacionados no Apêndice A.

4.1 ARTIGOS AVALIADOS

Os artigos com a participação de duas ou mais vezes (24), apresentaram a classificação Qualis 2017-2020 A1 e o fator de impacto mínimo de 5.744, conforme mostrado na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Principais periódicos, fator de impacto e classificação Qualis

Qtidade	Periódico	Fator de impacto	Qualis
8	<i>Journal of Cleaner Production</i>	11.072	A1
6	<i>Energy Policy</i>	7.576	A1
6	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	16.799	A1
3	<i>Biomass and Bioenergy</i>	5.774	A1
19	Com uma participação		
42	Total de periódicos		

Fonte: Dados da pesquisa

A Figura 1 mostra o objetivo dos artigos avaliados. Observa-se que os números (Nº) se referem aos artigos listados no Apêndice A.

Figura 1 – Objetivo dos artigos

Nº	Objetivo	Nº	Objetivo
1	Principais perspectivas econômicas e ambientais para a economia e o respeito pelo meio ambiente do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis.	22	Status atual, potencial futuro, estrutura política, barreiras e oportunidades de desenvolvimento de biocombustíveis na China.
2	Situação atual e as perspectivas futuras da cana-de-açúcar como potencial biofábrica.	23	Utilização mais eficiente da biomassa gerada pela produção agrícola para a mudança de uma economia de base fóssil para uma economia de base biológica (bioeconomia).
3	Analisar as perspectivas de fabricação de bioetanol, via biotecnologia, utilizando manejo sustentável.	24	Variações inter e intraempresas de acumulação de capacidade de nível micro, interdependências relacionadas com organizações externas e implicações para a inovação.
4	Identificar desafios, oportunidades e as estratégias e políticas públicas mais adequadas para as principais empresas do setor.	25	O futuro do setor de bioetanol no Brasil, enfocando sua capacidade de inovar, seus esforços para a produção de etanol celulósico e as políticas implementadas.
5	O impacto dos mandatos de mistura e outras políticas de biocombustíveis na inovação usando medidas de atividade de patenteamento correspondentes ao esforço de pesquisa e à produção de pesquisa.	26	O custo de conversão da lignocelulose em etanol usando a tecnologia atual é alto, porém, as reduções de custo podem ser buscadas por meio da inovação.
6	Evolução histórica no transporte do Brasil e da Argentina e o surgimento do sistema tecnológico do biodiesel.	27	Impulsionadores e barreiras históricas de três ações de mitigação no Brasil: expansão da agricultura de plantio direto, redução do desmatamento e aumento da substituição da gasolina pelo etanol.
7	Valorização da produção de álcool a partir de várias rotas de produção, abrangendo as rotas tradicionais até o estado da arte atual das tecnologias.	28	Desenvolvimento de um modelo de equilíbrio termodinâmico e químico de uma configuração BIGCC (ciclo combinado de gaseificação integrada de biomassa) para bagaço de cana-de-açúcar.
8	Quantificar o potencial teórico, técnico e técnico-econômico de resíduos agrícolas e florestais para geração de energia elétrica via processos termoquímicos no Brasil.	29	Aumento do rendimento da fermentação e na redução da energia necessária para separar os produtos voláteis combinando inovações experimentais e abordagem de engenharia de sistemas.

Nº	Objetivo	Nº	Objetivo
9	Formular um modelo analítico qualitativo além dos três componentes do nexos água-energia-alimentos, incorporando outros elementos, tais como política, inovação, governança e trabalho	30	Desenvolvimento de uma metodologia para identificar grupos tecnológicos críticos para um sistema sustentável de energia de baixo carbono, avaliando as oportunidades de inovação.
10	O setor de cana-de-açúcar do Brasil é uma fonte de empregos e opera na interseção de energia, agricultura e uso da terra e o seu desenvolvimento será afetado pelos valores, decisões e ações dos principais atores.	31	Explorar porque a transição para a bioenergia moderna obteve sucesso em alguns segmentos e/ou países, mas não em outros.
11	A transição para biocombustíveis de segunda geração (2G) durante o período 2005-2018 no Brasil.	32	Evidenciar que inovações em pequena escala, por meio da descoberta de enzimas em laboratório, podem ter impactos em larga escala quando implementadas em um processo industrial.
12	Quantificar os impactos nas mudanças no uso da terra, emissões de gases de efeito estufa e indicadores socioeconômicos, ao reduzir os custos de conversão de biomassa para produção bioquímica global em 1,5% aa.	33	Apresentar e discutir o conceito de biorrefinaria integrada, pois essas biorrefinarias demandam o uso de inovação, ou seja, novas rotas químicas devem ser introduzidas para agregar valor.
13	As várias rotas de valorização dos fluxos de resíduos da cana-de-açúcar (bagaço) por meio de quantificação dos impactos ambientais e de avaliação técnico-econômica.	34	Estudar os aspectos técnicos e econômicos do processo de incorporação de hidrogênio produzido do etanol na indústria da cana-de-açúcar.
14	Avanços e inovações na produção local de enzimas celulolíticas usando biomassa vegetal e a aplicação das enzimas na conversão de lignocelulose em açúcares fermentáveis para a produção de biocombustíveis.	35	Comparar a transição de combustíveis alternativos, com foco no etanol, em três países: Brasil, Malawi e Suécia.
15	Os efeitos dos incentivos governamentais na difusão do etanol e das tecnologias de veículos <i>flex-fuel</i> no Brasil.	36	Ensaio sobre as virtudes do capital de risco corporativo para projetos de alta tecnologia no setor agrícola: a trajetória inovadora da Alellyx Applied Genomics e da CanaVialis.
16	Oportunidades de inovação no setor sucroenergético brasileiro e seus principais impulsionadores e inibidores, a partir da Inovação Perspectiva dos Agentes do Sistema.	37	Analisar as interações entre agentes da indústria sucroalcooleira do Estado de Alagoas, através das três dimensões do Sistema Setorial de Inovação (organizações, tecnologias e instituições).
17	Como a difusão dos carros <i>flex</i> (bicombustíveis) afetou a concorrência nos mercados varejistas de etanol e gasolina.	38	Examinar se existe uma relação causal entre a inovação relacionada ao etanol e as variáveis do mercado de combustíveis no Brasil.
18	Desenvolvimento de um modelo termo-hidráulico de reator resfriado a gás de alta temperatura usado para cogeração de eletricidade e combustíveis para transporte.	39	Analisar as transições de sistemas de energia passadas, os fatores por trás delas e os seus prazos.
19	Potencial de desenvolvimento de uma rede de simbiose agroindustrial a partir da construção de uma biorrefinaria na região Norte Fluminense.	40	Explorar como as incertezas tecnológicas, comerciais e sociais moldaram o desenvolvimento dos biocombustíveis brasileiros.
20	Modelos de negócios utilizados por empresas brasileiras que alcançaram a produção em escala comercial de bioetanol de segunda geração.	41	Analisar os principais aspectos do sistema de inovação construído em torno do setor sucroenergético brasileiro.
21	Processo de inovação na produção de plástico verde, substituindo um recurso não renovável (nafta) por um renovável (etanol de cana-de-açúcar), sob a ótica da gestão sustentável da cadeia de suprimentos.	42	Realizar análise do ciclo de vida comparando o desempenho ambiental e o custo do E10 (mistura de 10% de etanol com 90% de gasolina) à base de melaço (de cana) com a gasolina convencional.

Fonte: Dados da pesquisa

Os 42 artigos foram separados por objetivos abordados dentro do tema inovação e, para tanto, foram classificados em biorrefinarias (3 artigos), empresas (5), investimentos (3), motivos e dificuldade na inovação (6), políticas públicas (7), processos produtivos (12), viabilidade e barreiras (6). A seguir serão apresentados esses temas.

Biorrefinarias (3):

O tema biorrefinaria mostrou a validade da utilização da cana-de-açúcar, com produção integrada de açúcar, biocombustíveis, bioeletricidade, biopolímeros, ácidos orgânicos, enzimas e outras biomoléculas e o uso dos subprodutos e/ou resíduos líquidos e sólidos gerados nessas biorrefinarias (Vandenbergh et al., 2022); apresentaram os resultados com economia

significativa no uso de energia e custos (até 87%) após a integração energética à planta isopropanol, butanol e etanol (Pyrgakis et al., 2016); têm o potencial de contribuir para o desenvolvimento sustentável de regiões agroindustriais, principalmente em países em desenvolvimento. A emissão de grande quantidade de resíduos sólidos e CO₂ seria evitada em longo prazo. A produção de ácido succínico proporcionaria uma receita adicional pelo uso de bagaço, agregando maior valor à matéria-prima em comparação com a produção de eletricidade (Santos & Magrini, 2018).

Empresas (5):

O tema empresas abordou que duas empresas brasileiras, entre as seis maiores usinas de etanol comercial de segunda geração do mundo, alcançaram a produção em escala comercial de bioetanol de segunda geração e possuem vantagens competitivas equivalentes na maioria das categorias avaliadas (foco da empresa, matéria-prima, custos, certificação, tecnologia e produção) (Calil Neto, Guimarães, & Freire, 2018); colaborações entre organização focal e outros agentes da cadeia de suprimentos são importantes para o desenvolvimento do produto. A organização focal criou muitas iniciativas em todo o setor para apoiar a produção de plástico verde e reduzir o impacto social e ambiental ao longo da cadeia de suprimentos (Mores et al., 2018); na indústria brasileira de etanol de cana-de-açúcar, a implementação de inovações ambiciosas e abrangentes depende de capacidades internas e externas variadas, empresas com maiores capacidades e abertura realizam inovações com mais ambições (Figueiredo, 2017); duas empresas *startups* brasileiras dedicadas à pesquisa e ao desenvolvimento (P&D) no setor de biotecnologia, apesar de o principal objetivo do grupo econômico ser a valorização do capital investido e retorno financeiro, a afiliação corporativa dessas empresas estimulou a aceleração de um conjunto de capacitações para a gestão empresarial, que foi crítica para o amadurecimento do negócio. Evidenciou-se, que foi fundamental o significativo aporte de recursos por meio dos mecanismos de apoio do sistema nacional à inovação (Bernardes et al., 2013); existência de interações positiva entre as três dimensões organizações, tecnologias e instituições, mas, em menor grau, para a última. Empresas apresentam uma interação entre as universidades e os centros de pesquisa; e grande parte do avanço tecnológico dessa indústria é oriunda de parcerias públicas e privadas. O esforço em P&D está centrado em melhorias genéticas para o campo e em inovações em processos que melhoram a eficiência produtiva (Albuquerque, Rita, & Rosário, 2012).

Investimentos (3):

O tema investimentos mostrou que a mistura de etanol com gasolina e diesel, aumentou significativamente tanto o esforço de P&D quanto a produção de inovação, ponderada pela qualidade em tecnologias de biocombustíveis e reduziu os insumos de pesquisa e desenvolvimento para tecnologias de plantas (Nelson, Parton, & Brown, 2022); na transição para o etanol de segunda geração, as funções de desenvolvimento de conhecimento e mobilização de recursos funcionaram positivamente, mas outras não, especialmente orientação da busca, formação de mercado e criação de legitimidade, revelando uma transformação desequilibrada do sistema. A transição não foi concluída, pois as políticas futuras devem considerar a dinâmica do sistema de inovação tecnológica e a evolução do contexto (Furtado et al., 2020); os investimentos em P&D em setores de base biológica devem ser complementados com políticas coerentes para prevenir o desmatamento e os impactos negativos nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Nong et al., 2020).

Motivos e dificuldades na inovação (6):

O item motivos e dificuldades na inovação expôs que as dificuldades para inovar ocorrem devido aos inibidores presentes em todas as dimensões do sistema setorial. Para resolver isso, foi sugerida a criação de um ecossistema com atores de outros sistemas setoriais

(Silva et al., 2019); um modelo de competição de preços entre os dois combustíveis (etanol e gasolina) e usando um painel de preços semanais em um posto para mostrar a diminuição dos preços e as margens dos combustíveis. Essa é uma evidência do poder de mercado no varejo de combustíveis e indica que as inovações que aumentam a escolha do consumidor beneficiam até mesmo aqueles que optam por não as adotar (Pessoa, Rezende, & Assunção, 2019); no Brasil os combustíveis fósseis ainda terão um papel importante, mas as energias renováveis, como a energia eólica e a biomassa juntas, podem chegar a mais de 30% da geração elétrica total e as reduções de emissões de dióxido de carbono podem ultrapassar 50% em cenários de alta tributação. O potencial de inovação mais relevante ocorre nos setores de biomassa, eólico e na captura de carbono na produção de etanol (Oliveira et al., 2016); potencial relação causal entre inovação em etanol e consumo de etanol, evidenciou uma relação unidirecional de consumo de etanol para registros de patentes. Tal relação indica que incrementos no consumo de etanol podem potencialmente estimular a inovação no setor e o preço do etanol e o efeito cruzado do preço da gasolina têm um efeito indireto na inovação do etanol (Freitas & Kaneko, 2012); a constituição de um sistema setorial de inovação teve um papel central no sucesso do etanol no Brasil. Esse sistema de inovação e o seu enquadramento institucional evoluíram ao longo do tempo, permitindo fazer face aos grandes desafios tecnológicos, econômicos e institucionais que surgiram quando o etanol se tornou uma alternativa real aos combustíveis fósseis (Furtado, Scandiffio, & Cortez, 2011); a mistura de 10% de etanol com 90% de gasolina (E10) proporciona redução no uso de energia fóssil, uso de petróleo, emissões de CO₂ e NO_x, mas seus custos sociais totais são maiores do que da gasolina devido aos custos diretos de produção mais altos e custos externos para outras emissões atmosféricas, por exemplo. CH₄, N₂O, CO, SO₂, VOC e PM10. As inovações tecnológicas voltadas para uma produção mais limpa ajudam a maximizar os benefícios do etanol, ao mesmo tempo em que minimizam suas limitações (Nguyen & Gheewala, 2008).

Políticas públicas (7):

Políticas públicas relataram que as mesmas devem apoiar a diversificação de produtos para biocombustíveis que abastecem setores de difícil redução de emissões, biomateriais, etanol de segunda geração e tecnologias disruptivas de conversão, como a célula a combustível a etanol direto (Barbosa, Szklo, & Gurgel, 2022); a melhor forma de integrar o desenvolvimento de políticas, governança e ações das partes interessadas para apoiar decisões econômicas para gerenciamento de recursos e processos regulatórios otimizados, é uma melhor integração da percepção científica e da formulação de políticas dentro donexo água-energia-alimento-terra-biocombustíveis (Lazaro, Giatti, Bermann, Giarolla, & Ometto, 2021); as alíquotas dos tributos afetaram a adoção da tecnologia da gasolina e do etanol, mas para os veículos *flex* o efeito da tributação não é significativo. Em contraste, a introdução da tecnologia *flex* quase dobrou o potencial total do mercado. Como sugestões de políticas, destaca-se a importância da redução de impostos, além de promover tecnologias versáteis que protejam os consumidores das oscilações de preços (Brito et al., 2019); o Brasil pode não estar preparado para enfrentar os desafios tecnológicos e de mercado que estão surgindo no domínio dos biocombustíveis em todo o mundo. Importantes investimentos produtivos foram feitos na primeira década dos anos 2000, entretanto esse setor não tem apresentado níveis de investimento em inovação compatíveis com os desafios de tornar o bioetanol uma *commodity* global (Salles-Filho et al., 2017); a indústria de biocombustíveis de etanol do Brasil surgiu devido à inovação em nível de nicho de sistemas de produção de etanol e veículos a etanol puro e mudanças que permitiram misturas obrigatórias de combustíveis, programas de compras públicas e investimento público em P&D (Hogarth, 2017); as experiências sueca e brasileira ilustram a importância da coordenação de políticas entre os níveis local e nacional e entre os setores, a fim de promover plataformas modernas de bioenergia. Enfatiza-se a necessidade de olhar além do setor de

energia, considerando os interesses dos atores e das partes interessadas em geral, bem como os limites amplos dos regimes sociotécnicos (Silveira & Johnson, 2016); o desenvolvimento da competitividade internacional do Brasil em açúcar e etanol foi baseado em incentivos políticos que resultaram em uma forte rede de instituições voltadas para esses dois produtos. No entanto, para se tornar favorito na futura bioeconomia, a rede de inovação existente precisa ser expandida. É importante integrar organizações nacionais e internacionais do setor privado e as indústrias precisam de incentivos mais fortes para colaborar com instituições de conhecimento (Scheiterle et al., 2018).

Processos produtivos (12):

Processos produtivos apresentaram perspectivas econômicas e ambientais do uso do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis (Pan et al., 2022); o setor industrial deve promover a produção de bioetanol de forma eficiente e sustentável, em harmonia com a sociedade e o meio ambiente baseadas em materiais celulósicos e materiais de terceira geração (Melendez, Maty, Hena, Lowy, & El Salous, 2022); pressões forneceram janelas de oportunidade para mudanças tecnológicas, com o Brasil seguindo um caminho mais sustentável baseado no etanol como combustível alternativo, o que permitiu ao país construir, posteriormente, o conhecimento acumulado e as lições transferidas do setor de veículos de passeio para o de carga (Nikas et al., 2022); existem várias rotas para a produção de etanol, entre as quais a fermentação da biomassa de lignocelulose seria a escolha final para o *shoot up* em larga escala e há uma falta de inovação na produção de álcoois superiores em um único processo (Shenbagamuthuraman et al., 2022); as principais restrições para a biomassa suprir a demanda interna no Brasil são a distribuição dispersa de biomassa em uma grande área, os custos de abastecimento e as baixas eficiências de conversão de energia (Souza et al., 2021); há expectativas gerais de crescimento contínuo do setor de cana-de-açúcar do Brasil como um todo e para quatro de seus potenciais produtos (açúcar, etanol, energia elétrica e biogás), principalmente para seus produtos relacionados à energia. No entanto, a possibilidade de desafios e tensões futuras ainda é evidente (Hughes, Mutran, Tomei, Ribeiro, & Nascimento, 2020); a produção de eletricidade a partir do bagaço amadureceu como tecnologia, mas a produção de produtos químicos de valor agregado não está totalmente desenvolvida. Benefícios indiretos para o meio ambiente e para a saúde humana decorrentes da valorização dos resíduos não são devidamente contabilizados (Meghana & Shastri, 2020); na integração das duas perspectivas, enzimas celulolíticas, como insumo para bioconversão e como produto da fermentação da lignocelulose, podem levar a uma abordagem economicamente viável para a produção de biocombustíveis de segunda geração, o que hoje é difícil devido ao alto custo da celulase comercial (Siqueira, Rodrigues, Vandenberghe, Woiciechowski, & Soccol, 2020); exemplo de inovação é o bioprocessamento utilizando bactérias termofílicas combinado com moagem durante a fermentação (cotratamento), com potencial para competitividade de custo radicalmente melhorada e viabilidade em menor escala em comparação com a tecnologia atual (Lynd et al., 2017); a configuração de ciclo combinado de gaseificação integrada de biomassa com captura e sequestro de CO₂ apresenta vantagens técnicas e ambientais quando comparada à tecnologia tradicional (Fonseca Filho, Matelli, Balestieri, 2016); nos processos de amido para etanol, novos produtos enzimáticos extraem ainda mais valor de um processo já eficiente, como, por exemplo, no uso de proteases para liberação de óleo e celulasas para processamento e produção de etanol. Isso levará a melhorias contínuas na conversão enzimática em geral, reduzindo o custo da produção de etanol celulósico (ou outro biocombustível) (Harris et al., 2014); CO₂ e bagaço são os resíduos mais promissores para sofrer transformações catalíticas. A hidrogenação de CO₂ para produção de gás de síntese/metanol é uma alternativa interessante para agregar valor a esta molécula. O potencial de uso de dois componentes principais do bagaço, a lignina e a hemicelulose, sendo a lignina empregada como matéria-prima para

produzir carvões ativados que podem desempenhar um papel como excelentes suportes para catalisadores metálicos e serem usados na hidrogenação de açúcares (Sousa-Aguiar et al., 2014).

Viabilidade e barreiras (6):

Viabilidade e barreiras mostraram que avaliações técnicas de cogeração, usando eucalipto e cana-de-açúcar como matéria-prima de biomassa, indicaram que alta eficiência térmica era alcançável, que o conceito é tecnicamente viável e que a usina de cogeração é economicamente viável (Patterson, 2018); a China tem promovido a comercialização de biocombustíveis com várias medidas: formulação de estratégia nacional, programas de demonstração, incentivos financeiros e estabelecimento de padrões nacionais. No entanto, devido a barreiras tecnológicas e de mercado, a escala real de comercialização é muito menor do que a projetada (Hao et al., 2018); o etanol hidratado é a melhor alternativa para produção de hidrogênio na cadeia produtiva da indústria canavieira quando comparado com o etanol anidro (Silveira et al., 2014); na transição de combustíveis alternativos, com foco no etanol, à medida que outros países e regiões desenvolvem programas para enfrentar os desafios de segurança energética e mudança climática, Brasil, Malawi e Suécia podem se beneficiar de uma melhor compreensão das ligações entre fatores tecnoeconômicos e sociotécnicos em caminhos de transição de países pioneiros, em diferentes escalas e estágios de desenvolvimento econômico (Johnson & Silveira, 2014); existe uma oportunidade no curto prazo para disseminar mais rapidamente tecnologias de eficiência energética, desde que os obstáculos institucionais sejam reconhecidos, abordados e superados. As medidas de eficiência energética necessárias são rentáveis, mais fáceis de implementar, já existentes e não requerem avanços técnicos (Solomon & Krishna, 2011); por meio da evolução do etanol combustível automotivo e da tecnologia *flex-fuel*, o desenvolvimento da produção brasileira de soja e mamona para a produção de biodiesel socialmente inclusiva, o Brasil adquiriu competências em tecnologias de energia alternativa e agricultura mais sustentável (Hall et al., 2011).

4.2 DISCUSSÕES

Uma das discussões sobre o uso da produção de alimentos para a fabricação de etanol foi abordada por Lynd et al. (2017) que mencionaram que os biocombustíveis celulósicos podem fazer contribuições importantes para o desenvolvimento econômico rural e maior sustentabilidade de paisagens agrícolas em economias desenvolvidas e em desenvolvimento. As moléculas de combustível derivadas de biomassa podem ser usadas em conjunto com inovações de motores para maximizar a eficiência e o desempenho.

Com relação a inovação no setor, segundo Lazaro et al. (2021), o etanol é o setor que mais se beneficiou da colaboração com os centros de pesquisa do país em importantes inovações adotadas para melhorar o processo produtivo e avanços tecnológicos em novos produtos a partir de subprodutos da cana-de-açúcar.

Melendez et al. (2022) citaram que o setor do agronegócio está empenhado na adaptação da sua infraestrutura industrial. Isto é possibilitado pela inovação tecnológica e pela adoção de métodos complexos de bioprodução, que aumentarão a produção sustentada de bioetanol em plantas de segunda e terceira geração. Como resultado, pode-se promover o desenvolvimento econômico eficiente da produção de energia por meio de mecanismos sustentáveis e da produção a partir de resíduos agrícolas. Nessa mesma linha, Lynd et al., (2017) ressaltaram para que o preço de compra das matérias-primas celulósicas seja competitivo com o petróleo em termos de energia, o custo de conversão da lignocelulose em etanol usando a tecnologia atual é alto. As reduções de custo podem ser buscadas por meio de inovações sejam no processo atual ou em um novo processo.

Segundo Silva et al. (2019), no setor sucroenergético os inibidores de inovação estão distribuídos pelas três dimensões do sistema setorial de inovação (conhecimento e domínio tecnológico, atores e rede, instituições) criando um ambiente rígido para a inovação e também o setor tem um comportamento dominado pelos fornecedores e tende a manter o mesmo tipo de produtos, com foco em energia e etanol.

Furtado et al. (2020) comentaram que o contexto macroeconômico da economia do país mudou negativamente em meados da década. A consequência é que a evolução ficou aquém das expectativas iniciais. Esta é uma das características típicas dos processos de transição tecnológica. São necessárias uma visão a longo prazo e políticas consistentes para lidar com períodos inevitáveis de progresso lento.

Nelson et al. (2022) mostraram que as políticas públicas de biocombustíveis afetaram a P&D do setor privado em biocombustíveis e biotecnologia agrícola. As empresas reduziram o investimento em P&D de bioplantas, permanecendo no mesmo nível tecnológico e, portanto, no mesmo nível de produção. Algumas restrições, tais como taxas de juros e políticas contraditórias em relação aos combustíveis fósseis e às energias renováveis, precisam ser consideradas para a compreensão dos caminhos da inovação no setor sucroenergético do Brasil (Salles-Filho et al., 2017). Shenbagamuthuraman et al. (2022) foram mais críticos e afirmaram que não existem políticas governamentais eficazes sobre a produção de álcoois a custos razoáveis. Portanto, os decisores políticos têm de desenvolver políticas relevantes para a utilização comercial. Barbosa et al. (2022) complementaram citando que os principais riscos para o setor são a dívida elevada e falta de investimento em P&D; o risco de perda de valor intangível, devido ao desmatamento; e a eletromobilidade (eletrificação de veículos), talvez ligada às pressões do mercado de açúcar e etanol.

Para que haja sucesso, os investimentos em P&D em setores de base biológica devem ser complementados com políticas e estratégias coerentes a nível regional e nacional para reduzir a expansão ilegal de terras agrícolas e pastagens nos trópicos, e promover a intensificação da agricultura sustentável nessas terras atualmente disponíveis (Nong et al., 2020).

Assim, uma maior clareza sobre os objetivos mais amplos do setor, incluindo a relativa priorização dos objetivos econômicos, sociais e ambientais, pode ajudar a indústria a tornar os investimentos de longo prazo consistentes com o tipo de inovação profunda para a qual existe potencial. Desse modo, será necessária uma estratégia clara e de longo prazo (pós-2030) sobre o papel dos biocombustíveis no sistema energético do Brasil, sua relação com os objetivos sociais, econômicos e ambientais, e como isso afeta as sinergias entre a bioenergia e os combustíveis fósseis no futuro mix energético do Brasil (Hughes et al., 2020).

A expectativa é que os recursos de biomassas permaneçam confiáveis justificando, investimentos em longo prazo para a produção de eletricidade e, portanto, a energia proveniente dessa biomassa poderá preencher lacunas de recursos no sistema energético do Brasil futuramente (Souza et al., 2021).

Com relação aos processos de produção, Pan et al. (2022) relataram que são necessários estudos técnico-econômicos e ambientais para avaliar a viabilidade de processos específicos de produção de biocombustíveis baseados em bagaço de cana considerando-se a acessibilidade da matéria-prima, o uso de água, a etapa de pré-tratamento e o rendimento do produto. Portanto, é necessário buscar novos bioprocessos de produção e condições operacionais para alcançar resultados efetivos, viabilidade econômica e capacidade de aplicação industrial de bioprodutos (Siqueira et al., 2020).

No Brasil, os produtos tradicionais obtidos a partir da cana-de-açúcar – açúcar, bioetanol e bioeletricidade – permanecem como bens estratégicos produzidos por tecnologias maduras e com significativo potencial de expansão, pelo menos nas próximas décadas, para atender à elevada demanda interna de veículos *flex*. Porém, as tecnologias 2G e 3G estão sendo instaladas

para ampliar o portfólio de bioprodutos e garantir uma biofábrica de cana-de-açúcar mais sustentável do futuro (Vandenberghe et al., 2022).

5 CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa foi verificar na literatura como os pesquisadores estão avaliando a inovação na produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar e responder à questão: como estão sendo abordados os processos de inovação para a produção de etanol de cana-de-açúcar?

Foram selecionados 42 artigos na base pesquisada e classificados em sete categorias, em razão dos objetivos abordados dentro do tema inovação: biorrefinarias (3 artigos), empresas (5), investimentos (3), motivos e dificuldades na inovação (6), políticas públicas (7), processos produtivos (12), viabilidade e barreiras (6).

As contribuições para o processo produtivo foram bem amplas e envolveram temas bem diversos: biocombustíveis podem fazer contribuições importantes para o desenvolvimento econômico rural e maior sustentabilidade; etanol é o setor que mais se beneficiou da colaboração com os centros de pesquisa do país; o setor do agronegócio está empenhado na adaptação da sua infraestrutura industrial possibilitada pela inovação tecnológica; reduções de custo podem ser buscadas por meio de inovações; o setor sucroenergético apresenta um ambiente rígido para a inovação; políticas públicas de biocombustíveis afetaram a P&D do setor privado; não existem políticas governamentais eficazes sobre a produção de álcoois a custos razoáveis; riscos para o setor são a dívida elevada e falta de investimento em P&D; perda de valor intangível, devido ao desmatamento, eletromobilidade; investimentos em P&D devem ser complementados com políticas e estratégias coerentes; maior clareza sobre os objetivos mais amplos do setor; expectativa é que os recursos de biomassas permaneçam confiáveis; distribuição dispersa de biomassa em uma grande área, custos de abastecimento e baixas eficiências de conversão de energia; são necessários estudos técnico-econômicos e ambientais para avaliar a viabilidade de processos de produção de biocombustíveis; é necessário buscar novos bioprocessos de produção e condições operacionais.

Foram apresentadas também sugestões para estratégias que deverão ser adotadas para o desenvolvimento de processos de inovação, como, por exemplo, Melendez et al. (2022) citaram que o setor industrial deve promover e adotar a inovação de métodos, equipamentos e infraestrutura para atingir novos níveis de produção de bioetanol de forma eficiente e sustentável, harmonizados com a sociedade e o meio ambiente. Oliveira et al. (2016) sugeriram que a estratégia para a inovação poderá incluir parcerias internacionais que unam esforços, contudo, uma estratégia de desenvolvimento nacional que vise dar conta das particularidades brasileiras também deve ser levada em consideração. Nessa mesma linha, Silva et al. (2019) propuseram a possibilidade de criar um ecossistema de inovação, onde atores de outros setores poderiam trazer suas habilidades, a fim de ajudar a superar desafios e barreiras. Freitas e Kaneko (2012) recomendaram que compreender a importância dos indutores de inovação em biocombustíveis poderia melhorar a eficácia das políticas públicas destinadas a incentivar a pesquisa e a inovação no setor. Figueiredo (2017) ponderou que um dos desafios para os gestores de empresas e decisores políticos empenhados no desenvolvimento industrial amigo do ambiente nas economias em desenvolvimento é desenvolver uma perspectiva abrangente e dinâmica sobre a capacidade inovadora.

Portanto, o que se verificou na literatura é a preocupação dos pesquisadores com a relação entre os investimentos em P&D e as estratégias de desenvolvimento de processos de inovação acompanhados de políticas públicas para o setor, pois, como foi alertado por Furtado et al. (2020), que apesar das expectativas positivas, a realidade revelou-se mais complexa, mostrando o importante papel da incerteza no processo de inovação.

Apesar dos resultados aqui apresentados como a pesquisa, utilizou-se somente a base de dados *ScienceDirect*, isso limita as conclusões, mas podem ser consideradas relevantes, pois os artigos avaliados estão classificados no extrato Qualis A1 e têm também alto fator de impacto. Sugere-se para as próximas pesquisas sejam utilizadas outras bases como, por exemplo, *Scopus* e *Web of Science* e sejam comparadas com os resultados aqui encontrados.

REFERÊNCIAS

Althuri, A., & Mohan, S. V. (2022). Emerging innovations for sustainable production of bioethanol and other mercantile products from circular economy perspective. *Bioresource Technology*, 363, 128013, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128013>.

Barbosa, P. I., Szklo, A., & Gurgel, A. (2022). Sugarcane ethanol companies in Brazil: Growth challenges and strategy perspectives using Delphi and SWOT-AHP methods. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106368, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106368>.

Bardin, L. *Análise de conteúdo*, (5a ed.). Lisboa: Edições 70. Lda, 2009.

Baregheh, A., Rowley, J., & Sambrook, S. (2009). Towards a multidisciplinary definition of innovation. *Management Decision*, 47(8), 1323-1339. <https://doi.org/10.1108/00251740910984578>.

Capex - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2023). *Plataforma Sucupira*. Recuperado em 6 julho, 2023 de <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>.

Danelon, A. F., Spolador, H. F. S., & Bergtold, J. S. (2023). The role of productivity and efficiency gains in the sugar-ethanol industry to reduce land expansion for sugarcane fields in Brazil. *Energy Policy*, 172, 113327, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113327>.

Durach, C., Kembro, J., & Wieland, A. (2017). A new paradigm for systematic literature reviews in supply chain management. *Journal of Supply Chain Management*, 53(4), 67-85. <https://doi.org/10.1111/jscm.12145>.

Figueiredo, P. N. (2017). Micro-level technological capability accumulation in developing economies: Insights from the Brazilian sugarcane ethanol industry. *Journal of Cleaner Production*, 167, 416-431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.201>.

Freitas, L. C., & Kaneko, S. (2012). Is there a causal relation between ethanol innovation and the market characteristics of fuels in Brazil? *Ecological Economics*, 74, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.12.013>.

Furtado, A. T., Hekkert, M. P., & Negro, S. O. (2020). Of actors, functions, and fuels: Exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil. *Energy Research & Social Science*, 70, 101706, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101706>.

Hang, C. C., & Chen, J. (2021). Innovation management research in the context of developing countries: Analyzing the disruptive innovation framework. *International Journal of Innovation Studies*, 5(4), 145-147. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2021.09.001>.

Hughes, N., Mutran, V. M., Tomei, J., Ribeiro, C. O., & Nascimento, C. A. O. (2020). Strength in diversity? Past dynamics and future drivers affecting demand for sugar, ethanol, biogas and

bioelectricity from Brazil's sugarcane sector. *Biomass and Bioenergy*, 141, 105676, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105676>.

Lazaro, L. L. B., Giatti, L. L., Bermann, C., Giarolla, A., & Ometto, J. (2021). Policy and governance dynamics in the water-energy-food-land nexus of biofuels: Proposing a qualitative analysis model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111384, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111384>.

Lynd, L. R., Liang, X., Bidy, M. J., Allee, A., Cai, H., Foust, T., Himmel, M. E., Laser, M. S., Wang, M., & Wyman, C. E. (2017). Cellulosic ethanol: status and innovation. *Current Opinion in Biotechnology*, 45, 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.03.008>.

Meghana, M., & Shastri, Y. (2020). Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. *Bioresource Technology*, 303, 122929, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122929>.

Melendez, J. R., Maty, B., Hena, S., Lowy, D. A., & El Salous, A. (2022). Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112260, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112260>.

Morad, S., Ragonis, N., & Barak, M. (2021). An integrative conceptual model of innovation and innovative thinking based on a synthesis of a literature review. *Thinking Skills and Creativity*, 40, 100824, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2021.100824>.

Nelson, K. P., Parton, L. C., & Brown, Z. S. (2022). Biofuels policy and innovation impacts: Evidence from biofuels and agricultural patent indicators. *Energy Policy*, 162, 112767, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112767>.

Nikas, A., Koasidis, K., Köberle, A. C., Kourtesi, G., & Doukas, H. (2022). A comparative study of biodiesel in Brazil and Argentina: An integrated systems of innovation perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 112022, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112022>

Nong, D., Escobar, N., Britz, W., & Borner, J. (2020). Long-term impacts of bio-based innovation in the chemical sector: A dynamic global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122738, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122738>.

OCDE - Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento. (2005). *Manual de Oslo: Diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação*. Tradução da Financiadora de Estudos e Projetos. (3a ed.). Brasília.

Oliveira, L. P. N., Rochedo, P. R. R., Portugal-Pereira, J., Hoffmann, B. S., Aragão, R., Milani, R., Lucena, A. F. P., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2016). Critical technologies for sustainable energy development in Brazil: technological foresight based on scenario modelling. *Journal of Cleaner Production*, 130, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.010>.

Pan, S., Zabed, H. M., Wei, Y., & Qi, X. (2022). Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. *Industrial Crops and Products*, 188 (Part B), 115684, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115684>

- Salles-Filho, S. L. M., Castro, P. F. D., Bin, A., Edquist, C., Ferro, A. F. P., & Corder, S. (2017). Perspectives for the Brazilian bioethanol sector: The innovation driver. *Energy Policy*, *108*, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.037>.
- Siqueira, J. G. W., Rodrigues, C., Vandenberghe, L. P. S., Woiciechowski, A. L., & Soccol, C. R. (2020). Current advances in on-site cellulase production and application on lignocellulosic biomass conversion to biofuels: a review. *Biomass and Bioenergy*, *132*, 105419, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105419>.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, *14*(3), 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.
- Scheiterle, L., Ulmer, A., Birner, R., & Pyka, A. (2018). From commodity-based value chains to biomass-based value webs: the case of sugarcane in Brazil's bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 3851-3863. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.150>
- Shenbagamuthuraman, V., Patel, A., Khanna, S., Banerjee, E., Parekh, S., Karthick, C., Ashok, B., Velvizhi, G., Nanthagopal, K., & Ong, H. C. (2022). State of art of valorising of diverse potential feedstocks for the production of alcohols and ethers: Current changes and perspectives. *Chemosphere*, *286* (part 1), 131587, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131587>.
- Silva, D. F. S., Bomtempo, J. V., & Alves, F. C. (2019). Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector. *Journal of Cleaner Production*, *218*, 871-879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.062>.
- Souza, L. P., Hamedani, S. R., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Comodi, G., Villarini, M., & Colantoni, A. (2021). Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. *Energy Reports*, *7*, 2574-2587. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.026>.
- Vandenberghe, L. P. S., Valladares-Diestra, K. K., Bittencourt, G. A., Torres, L. A. Z., Vieira, S., Karp, S. G., Sydney, E. B., Carvalho, J. C., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2022). Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *167*, 112721, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>.
- Webster, J., & Watson, R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for de future: writing a literature review. *MIS Quarterly*, *26*(2), 13-23.

APÊNDICE A – ARTIGOS AVALIADOS

Nº	Ano	Título	Autores	Periódico
1	2022	Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook	Pan, Zabed, Wei, Qi	Industrial Crops and Products, 188 (Part B), 115684
2	2022	Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil	Vandenbergh et al.	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 112721
3	2022	Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses	Melendez, Mátyás, Hena, Lowy, El Salous	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 160, 112260
4	2022	Sugarcane ethanol companies in Brazil: Growth challenges and strategy perspectives using Delphi and SWOT-AHP methods	Barbosa, Szklo, Gurgel	Biomass and Bioenergy, 158, 106368
5	2022	Biofuels policy and innovation impacts: Evidence from biofuels and agricultural patent indicators	Nelson, Parton, Brown	Energy Policy, 162, 112767
6	2022	A comparative study of biodiesel in Brazil and Argentina: An integrated systems of innovation perspective	Nikas, Koasidis, Köberle, Kourtesi, Doukas	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 156, 112022
7	2022	State of art of valorising of diverse potential feedstocks for the production of alcohols and ethers: Current changes and perspectives	Shenbagamuthuraman et al.	Chemosphere, 286 (Part 1), 131587
8	2021	Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050	Souza et al.	Energy Reports, 7, 2574-2587
9	2021	Policy and governance dynamics in the water-energy-food-land nexus of biofuels: Proposing a qualitative analysis model	Lazaro, Giatti, Bermann, Giarolla, Ometto	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149, 111384
10	2020	Strength in diversity? Past dynamics and future drivers affecting demand for sugar, ethanol, biogas and bioelectricity from Brazil's sugarcane sector	Hughes, Mutran, Tomei, Ribeiro, Nascimento	Biomass and Bioenergy, 141, 105676
11	2020	Of actors, functions, and fuels: Exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil	Furtado, Hekkert, Negro	Energy Research & Social Science, 70, 101706
12	2020	Long-term impacts of bio-based innovation in the chemical sector: A dynamic global perspective	Nong, Escobar, Britz, Börner	Journal of Cleaner Production, 272, 122738
13	2020	Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges	Meghana, Shastri	Bioresource Technology, 303, 122929
14	2020	Current advances in on-site cellulase production and application on lignocellulosic biomass conversion to biofuels: A review	Siqueira, Rodrigues, Vandenbergh, Woiciechowski, Soccol	Biomass and Bioenergy, 132, 105419
15	2019	Transitions between technological generations of alternative fuel vehicles in Brazil	Brito et al.	Energy Policy, 134, 110915
16	2019	Innovation opportunities in the Brazilian sugar-energy sector	Silva, Bomtempo, Alves	Journal of Cleaner Production, 218, 871-879
17	2019	Flex cars and competition in fuel retail markets	Pessoa, Rezende, Assunção	International Journal of Industrial Organization, 63, 145-184
18	2018	Cogeneration of electricity and liquid fuels using a high temperature gas-cooled reactor as the heat source	Patterson	Nuclear Engineering and Design, 329, 204-212
19	2018	Biorefining and industrial symbiosis: A proposal for regional development in Brazil	Santos, Magrini	Journal of Cleaner Production, 177, 19-33
20	2018	Business models for commercial scale second-generation bioethanol production	Caíl Neto, Guimarães, Freire	Journal of Cleaner Production, 184, 168-178
21	2018	Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic	Mores, Finocchio, Barichello, Pedrozo	Journal of Cleaner Production, 177, 12-18
22	2018	Biofuel for vehicle use in China: Current status, future potential and policy implications	Hao et al.	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (Part 1), 645-653
23	2018	From commodity-based value chains to biomass-based value webs: The case of sugarcane in Brazil's bioeconomy	Scheiterle, Ulmer, Birner, Pyka	Journal of Cleaner Production, 172, 3851-3863
24	2017	Micro-level technological capability accumulation in developing economies: Insights from the Brazilian sugarcane ethanol industry	Figueiredo	Journal of Cleaner Production, 167, 416-431
25	2017	Perspectives for the Brazilian bioethanol sector: The innovation driver	Salles-Filho et al.	Energy Policy, 108, Pages 70-77
26	2017	Cellulosic ethanol: status and innovation	Lynd et al.	Current Opinion in Biotechnology, 45, 202-211
27	2017	Evolutionary models of sustainable economic change in Brazil: No-till agriculture, reduced deforestation and ethanol biofuels	Hogarth	Environmental Innovation and Societal Transitions, 24, 130-141
28	2016	Carbon exergy tax applied to biomass integrated gasification combined cycle in sugarcane industry	Fonseca Filho, Matelli, Balestieri	Energy, 103, 715-724
29	2016	A process integration approach for the production of biological isopropanol, butanol and ethanol using gas stripping and adsorption as recovery methods	Pyrgakis et al.	Biochemical Engineering Journal, 116, 176-194
30	2016	Critical technologies for sustainable energy development in Brazil: technological foresight based on scenario modelling	Oliveira et al.	Journal of Cleaner Production, 130, 12-24
31	2016	Navigating the transition to sustainable bioenergy in Sweden and Brazil: Lessons learned in a European and International context	Silveira, Johnson	Energy Research & Social Science, 13, 180-193
32	2014	New enzyme insights drive advances in commercial ethanol production	Harris, Xu, Kreel, Kang, Fukuyama	Current Opinion in Chemical Biology, 162-170
33	2014	Some important catalytic challenges in the bioethanol integrated biorefinery	Sousa-Aguiar et al.	Catalysis Today, 234, 13-23
34	2014	Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production integration in the Brazilian sugar and alcohol industry	veira, Tuna, Lamas, Silva, Martine	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 869-876
35	2014	Pioneer countries in the transition to alternative transport fuels: Comparison of ethanol programmes and policies in Brazil, Malawi and Sweden	Johnson, Silveira	Environmental Innovation and Societal Transitions, 1-24
36	2013	Ensaio sobre as virtudes do capital de risco corporativo para projetos de alta tecnologia no setor agrícola: a trajetória inovadora da Alellyx Applied Genomics e da CanaVialis	Bernardes, Varela, Consoni, Sacramento	RAUSP Revista de Administração, 48(2), 327-340
37	2012	Interações Tecnológicas Na Indústria Sucroalcooleira de Alagoas: Análise do Sistema Setorial de Inovação	Albuquerque, Santa Rita, Rosário	RAI Revista de Administração e Inovação, 9(2), 149-174
38	2012	Is there a causal relation between ethanol innovation and the market characteristics of fuels in Brazil?	Freitas, Kaneko	Ecological Economics, 74, 161-168
39	2011	The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook	Solomon, Krishna	Energy Policy, 39(11), 7422-7431
40	2011	Managing technological and social uncertainties of innovation: The evolution of Brazilian energy and agriculture	Hall, Matos, Silvestre, Martin	Technological Forecasting and Social Change, 78(7), 1147-1157
41	2011	The Brazilian sugarcane innovation system	Furtado, Scandiffio, Cortez	Energy Policy, 39(1), 156-166
42	2008	Fuel ethanol from cane molasses in Thailand: Environmental and cost performance	Nguyen, Gheewala	Energy Policy, 36(5), 1589-1599