



1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Avaliação técnico-econômica da implementação de uma biorrefinaria integrada de etanol: uma revisão bibliográfica

Technical-economic evaluation of the implementation of an integrated ethanol biorefinery: literature review

Julio Pansiere Zavarise^{1*}, Maristela Araujo Vicente², Fabio de Assis Ressel Pereira², Laura Marina Pinotti²

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil.

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil.

*Autor para correspondência, E-mail: juliopz2011@gmail.com

Resumo: No Brasil, o etanol é um combustível produzido em biorrefinarias de cana-de-açúcar que geram açúcar, etanol e bioeletricidade. O aproveitamento integral da biomassa lignocelulósica residual gerada nessas instalações pode contribuir para aumentar a produção de etanol, embora os custos relativamente elevados de instalação e operação de linhas de produção de etanol de segunda geração ainda sejam um entrave. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica de publicações sobre a simulação de processos de produção integrada de etanol em biorrefinaria de cana-de-açúcar. Para realizar uma bibliometria das publicações relevantes nesta temática foram consultadas duas bases de dados científicas e as publicações foram selecionadas pela data de publicação, pela média do número de citações anuais e pela análise dos resumos expandidos. Os metadados das publicações selecionadas foram utilizados para o mapeamento científico realizado no software *Bibliometrix*. Em relação aos resultados da análise bibliométrica, foram encontradas 152 publicações e observou-se uma taxa de crescimento anual de publicações igual a 12,6%. A maioria dos autores mais produtivos neste recorte de pesquisa são brasileiros e estão associados com universidades e instituições de pesquisa brasileiras. A partir da revisão bibliográfica realizada concluiu-se que a maior parte da análise de viabilidade de projetos de biorrefinarias de etanol de cana são realizadas no simulador de processo *Aspen Plus*, combinado com o uso de planilhas eletrônicas. Nos estudos selecionados, é consenso que a produção integrada de etanol apresenta maior produtividade quando comparada a operação autônoma de etanol de primeira geração, embora as dificuldades técnicas da produção de etanol de segunda geração ainda residam nas etapas de pré-tratamento e de hidrólise enzimática. Como principais metodologias de avaliação econômica dos projetos de instalação de biorrefinarias de etanol, destaca-se a taxa interna de retorno (TIR) e a avaliação do custo de capital associado ao preço de venda do etanol.

Palavras-chave: Simulação, Aspen, Bibliometria, Bagaço, Cana-de-açúcar.

Abstract: In Brazil, ethanol is a fuel produced in sugarcane biorefineries that generate sugar, ethanol and bioelectricity. The full use of the residual lignocellulosic biomass generated in these facilities can contribute to increasing ethanol production, although the relatively high costs of installing and operating second-generation ethanol production lines are still an obstacle. Thus, the objective of the present work was to perform a bibliographic review of publications on the simulation of integrated ethanol production processes in sugarcane biorefinery. To perform a bibliometrics of relevant publications on this topic, two scientific databases were consulted and the publications were selected by the date of publication, by the average number of annual citations and by the analysis of the expanded abstracts. The metadata of the

selected publications were used for the scientific mapping carried out in the Bibliometrix software. Regarding the results of the bibliometric analysis, 152 publications were found and an annual growth rate of publications equal to 12.6% was observed. Most of the most productive authors in this research section are Brazilian and are associated with Brazilian universities and research institutions. From the literature review carried out, it was concluded that most of the feasibility analysis of sugarcane ethanol biorefinery projects are carried out in the Aspen Plus process simulator, combined with the use of electronic spreadsheets. In the selected studies, there is a consensus that the integrated production of ethanol presents higher productivity when compared to the autonomous operation of first-generation ethanol, although the technical difficulties of the production of second-generation ethanol still reside in the pre-treatment and enzymatic hydrolysis stages. As the main methodologies for the economic evaluation of ethanol biorefinery installation projects, the internal rate of return (IRR) and the evaluation of the cost of capital associated with the ethanol sale price stand out.

Keywords: Simulation, Aspen, Bibliometrics, Bagasse, Sugarcane.

1 Introdução

As biorrefinarias são instalações industriais que integram processos e equipamentos de conversão de biomassa para produzir combustíveis, energia, materiais e produtos químicos a partir de biomassa (Bonomi et al., 2016). Conceitualmente, as biorrefinarias se assemelham às refinarias de petróleo (Conteratto et al., 2021), na qual uma única matéria-prima pode originar diversos produtos, com diferentes aplicabilidades. Nessas instalações, o aproveitamento integral da biomassa lignocelulósica pode ser uma alternativa viável e tecnológica para aumentar a produção atual de biocombustíveis, sem aumentar a área plantada de matérias-primas (Rodionova et al., 2022).

No Brasil, a produção de etanol de cana-de-açúcar em biorrefinarias é plenamente estabelecida (Dias et al., 2013), considerando-se as vantagens competitivas oferecidas pelas condições climáticas favoráveis, ampla disponibilidade de terras cultiváveis, bem como o incentivo estatal vigente há cerca de 50 anos (Aguilar et al., 2025). Nesse contexto, o país citado figura atualmente como o segundo maior produtor mundial de biocombustíveis líquidos, sendo o maior produtor de etanol de cana-de-açúcar (Energy Institute, 2024). É sabido, entretanto, que, futuramente pode ocorrer competição pelo uso deste insumo para a produção de alimentos, considerando-se um possível aumento da demanda global e local pelo etanol.

Sobre o possível aumento da demanda local por etanol acredita-se que ele deverá ocorrer nos próximos anos considerando-se essencialmente, mas não somente, os mandatos de adição obrigatória de etanol à gasolina, sob a vigência da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (Neto, 2021; Andrade Junior et al., 2019). Para Karp et al. (2021), a demanda interna brasileira pelo etanol nos próximos anos poderá ser suprida por melhorias no uso das matérias-primas existentes e pelo aumento da área plantada e, por conseguinte, da produção destas últimas.

Considerando-se a ampla disponibilidade de bagaço de cana gerado nas indústrias sucroalcooleiras, o incremento vindo da produção de etanol de segunda geração (etanol 2G) pode ser uma alternativa adequada para suprir a demanda prevista. Apesar das vantagens do etanol 2G e da sua escala comercial da produção já ter sido alcançada no mundo (Correa et al., 2023), a maior parte do etanol brasileiro (cerca de 84% da produção total) continua sendo o etanol de primeira geração (1G) (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2025). Como entraves à expansão de plantas de etanol 2G podem ser apontadas a ausência de mecanismos de mercado para aumentar a produção total deste biocombustível (Garcia et al., 2022) e as dificuldades operacionais, concentradas nas etapas de pré-tratamento do bagaço e de hidrólise da celulose (Vasconcelos, 2017; Hoang e Nghiem, 2021).

Uma alternativa para aumentar a produção total de etanol no Brasil e superar os entraves operacionais da produção de etanol 2G seria promover a integração dos processos de produção de etanol de cana (Mizik 2021). Conforme Dias et al. (2013), a biorrefinaria integrada de etanol é capaz de aumentar a produção de etanol em até 24% quando comparada à biorrefinaria autônoma de etanol 1G. Também, pode-se supor que na biorrefinaria integrada haverá redução significativa de custos, tendo em vista o uso simultâneo de equipamentos e processos (Albarelli, 2013).

O processo de cogeração de vapor e de bioeletricidade pode permitir que as biorrefinarias de cana sejam autossuficientes em suprimento de eletricidade. Porém, na produção integrada de etanol sabe-se que parte do bagaço e palha de cana será encaminhada para a produção de etanol 2G e isso pode diminuir a cogeração. Assim, a quantidade de material lignocelulósico destinada a cada processo na configuração industrial tende a ser uma decisão complexa que precisa ser analisada sob diferentes aspectos, em diferentes cenários industriais. Em projetos de biorrefinarias integradas, a simulação computacional pode oferecer a

possibilidade de avaliar diferentes configurações industriais, testar cenários de produção e identificar inovações e ou limitações operacionais. A simulação e a integração de todos os processos de produção em uma “biorrefinaria virtual” podem produzir inventários econômicos consistentes, com estimativas de produção de etanol, coprodutos e resíduos (Bonomi, 2016).

Os inventários mencionados anteriormente, em conjunto com análises técnico-econômicas de cenários simulados com parâmetros experimentais, podem ser empregados, por exemplo, para determinar o tempo de retorno de investimentos em infraestrutura e para determinar as condições de efetiva rentabilidade das biorrefinarias de cana, com vistas para as possibilidades de otimização. Tais informações podem ser decisivas para o desenvolvimento e execução de novos projetos de produção integrada de etanol. A partir do que foi discutido, o presente estudo tem como objetivo geral realizar uma revisão bibliográfica de estudos sobre a simulação computacional de biorrefinarias de cana-de-açúcar, com ênfase na avaliação técnico-econômica da produção integrada de etanol, a fim de identificar as principais metodologias de avaliação técnico-econômica em biorrefinarias virtuais.

2 Metodologia

2.1 Estudo bibliométrico

As bases de dados consultadas para realizar o estudo bibliométrico foram a *Science Citation Index Expanded*, pela plataforma *Web of Science* (Thomson Scientific), e a Scopus, acessada pela plataforma *Science Direct*. As palavras-chave empregadas na primeira etapa de pesquisa foram: “*simulation*” AND “*biorefin**” AND “*ethanol*”. A fim de refinar os resultados encontrados, procedeu-se com a seleção de pesquisa por tópicos (pesquisa por correspondências no título, resumo, palavras-chave e palavras-chave do autor) e a exclusão de artigos de revisão. Além disso, os artigos duplicados foram identificados e filtrados nesta etapa.

Os metadados dos artigos selecionados na etapa anteriormente descrita foram analisados no software *Bibliometrix* e na plataforma *Biblioshiny*, sendo esta última uma interface interativa do *R Studio*. Assim, foi possível realizar o mapeamento científico (análise de citação, de coautoria e co-ocorrência de palavras) (Donthu et al., 2021). Este mapeamento foi realizado para identificar possíveis tendências e lacunas de pesquisa na área geral da presente temática de estudo.

2.2 Revisão bibliográfica

A fim de refinar os artigos selecionados na etapa anterior, utilizou-se uma nova palavra-chave (“*sugarcane*”) para selecionar somente os artigos que abordassem simulações computacionais de biorrefinarias de cana-de-açúcar. Ademais, os artigos que tinham data de publicação anterior a 2015 (tempo de publicação maior que 10 anos) foram excluídos.

Para classificar os artigos selecionados foi realizada, na plataforma *Biblioshiny*, a seleção das publicações por relevância. Os artigos com média anual de citações menor que 2,0 foram excluídos. Os artigos selecionados após o procedimento descrito foram avaliados de acordo com a leitura do resumo expandido gerado por inteligência artificial generativa e seguem listados na Tabela 1. Esta etapa final foi realizada a fim de selecionar para a revisão bibliográfica apenas as publicações com aderência ao tema de pesquisa do presente estudo.

2.3 Análise de anterioridade

A fim de identificar as inovações relacionadas com o tema de pesquisa aqui explorado foi realizada uma busca de anterioridades em bases de registros de patentes de inovação. A base de registros de patentes utilizada foi a base de dados do Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI). A pesquisa inicial foi realizada com a palavra-chave “*biorrefinaria*”, sem realizar a restrição por data de inserção do registro na base de dados. O critério de seleção dos registros foi a leitura dos resumos e das reivindicações dos registros de patentes. Os resultados encontrados seguem listados na Tabela 2.

É válido ressaltar que os registros analisados são inovações referentes aos processos industriais de biorrefinarias de etanol. Sendo assim, discutiu-se a possibilidade de avaliar tais inovações sob o contexto da simulação computacional, a fim de, possivelmente, integrar tais tecnologias em análises de cenários de configuração industrial, para produção integrada de etanol, a fim de desenvolver um trabalho com caráter inovador e atualizado em relação às tecnologias emergentes no contexto analisado.

3 Resultados

3.1 Estudo bibliométrico

A partir da pesquisa inicial foram encontradas 304 publicações nas plataformas da *Web of Science* e *Science Direct*, sendo que foram encontrados 152 artigos em duplicidade em ambas as bases. A partir da análise dos metadados das publicações no software *Bibliometrix*, foi constatado que os artigos encontrados eram provenientes de 113 fontes distintas e foram produzidos por 956 autores, de forma que nenhuma das publicações foi produzida por um único autor. A análise inicial indicou que a taxa de crescimento anual de publicações selecionadas é positiva e igual a 12,6%.

A Figura 1 expõe a evolução de publicações anuais dos artigos selecionados na pesquisa inicial. Nota-se que ocorreu um aumento significativo no número de publicações a partir de 2018, visto que neste ano houve um aumento de cerca de 25% no número de publicações em relação ao ano anterior. No período de 2020 a 2023 verificou-se um aumento consistente no número de publicações, sendo o ano de 2022 que apresentou o maior número de publicações anuais (32 publicações).

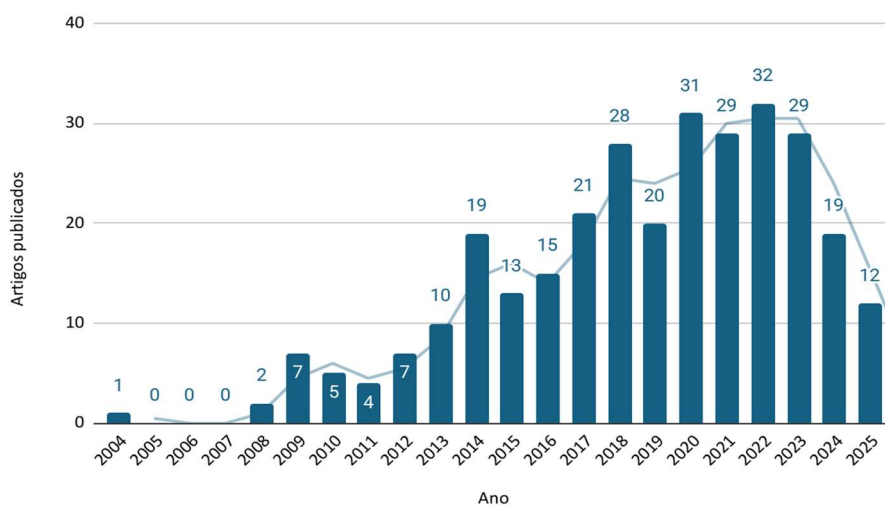


Figura 1. Artigos publicados de 2004 a 2025 selecionados com os termos de pesquisa relacionados ao tema do presente estudo.

Na Figura 2, tem-se os dez países de origem dos autores mais produtivos no período analisado considerando-se os artigos selecionados como banco de artigos extenso. Nota-se que o Brasil figura como país com o maior número de autores mais citados. Isso provavelmente pode ser explicado, tendo em vista a posição consolidada deste país como um dos cinco maiores produtores mundiais de etanol na penúltima década (Energy Institute, 2024).

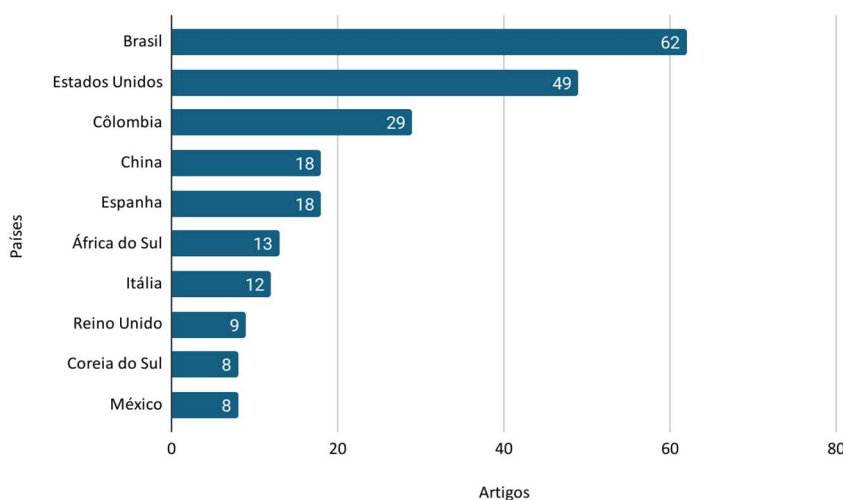


Figura 2. 10 países dos autores mais produtivos em publicações de artigos originais publicados de 2004 a 2025.

É válido ressaltar que, no Brasil, o desenvolvimento contínuo das tecnologias de produção de etanol é incentivado pela iniciativa estatal desde meados da década de 70, a partir do programa Proálcool, o que

provavelmente contribuiu para o escalonamento da pesquisa e desenvolvimento sobre produção de etanol no país. Com o aumento previsto da demanda global por esse biocombustível, acredita-se que os estudos envolvendo simulação computacional, em biorrefinarias virtuais, passaram a ganhar destaque no país na última década, como pode ser avaliado pela análise do gráfico das publicações anuais (Figura 1).

Os Estados Unidos e a Colômbia ocupam o segundo e o terceiro lugar em número de autores produtivos, respectivamente. A posição dos Estados Unidos é justificada pelo desenvolvimento de pesquisas acerca de biorrefinarias integradas de milho, tendo em vista que o país citado anteriormente é o maior produtor mundial de etanol, conforme dados do *Statistical Review of Energy* (Energy Agency, 2024).

Já a Colômbia é um país que figura entre os 10 maiores produtores de açúcar e de etanol de cana-de-açúcar (UNICA, 2023) e assim, como o Brasil, o país referido adotou a prática de adicionar o etanol à gasolina com o intento de reduzir o impacto ambiental da queima de combustíveis de origem fóssil. Dessa forma, acredita-se que as publicações encontradas foram desenvolvidas pelos pesquisadores e universidades colombianas resultam da necessidade de estudar alternativas para aumentar a produção de etanol, sem efetivamente aumentar a área plantada de cana. Como mencionado anteriormente, a literatura especializada indica que isto pode ser alcançado ao implementar a produção integrada de etanol.

A Figura 3 se trata de um diagrama esquemático que relaciona as palavras-chave dos artigos selecionados a sua frequência de ocorrência, fornecendo maior destaque para as palavras citadas mais vezes nas publicações selecionadas.

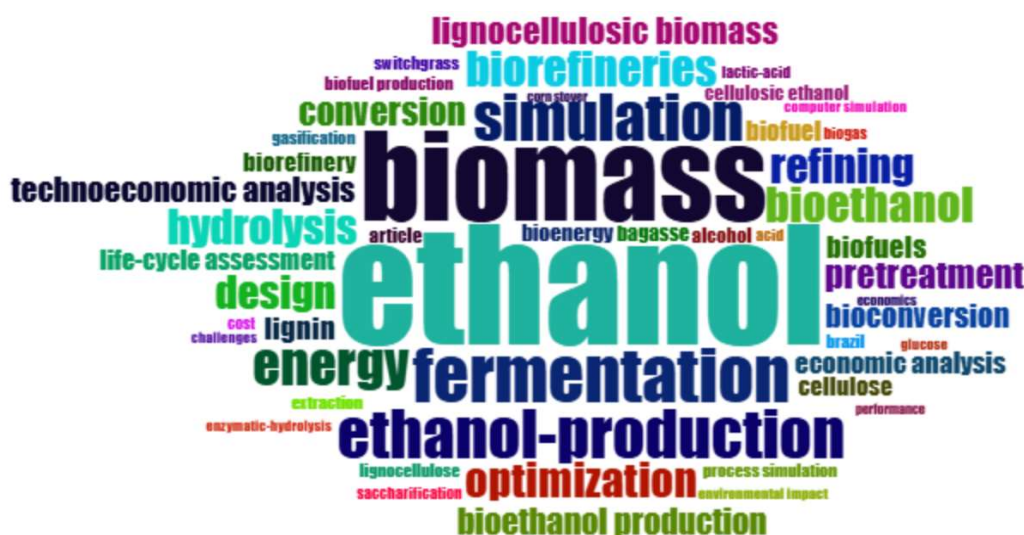


Figura 3. Nuvem de palavras-chave dos artigos originais selecionados como banco de artigos extenso.

Em destaque, no centro da nuvem de palavras, encontra-se, excetuando-se as palavras-chave empregadas como termos de pesquisa, a palavra *biomass*, que provavelmente refere-se a biomassa lignocelulósica, na forma de bagaço ou palha de cana-de-açúcar, uma vez que esta expressão também aparece na nuvem analisada, com menor destaque. Outras palavras que podem ser identificadas são termos relacionados ao processo de produção de etanol celulósico, como: *bioethanol* (bioetanol), *hydrolysis* (hidrólise), *saccharification* (sacarificação), *fermentation* (fermentação) e *pre-treatment* (pré-tratamento).

Como discutido por alguns autores (Vasconcelos, 2017; Hoang e Nghiem, 2021; Garcia et al., 2022), as etapas de pré-tratamento e de hidrólise enzimática da celulose ainda permanecem como os principais entraves operacionais para o escalonamento comercial da produção de etanol 2G, e consequentemente, tendem a inviabilizar o desenvolvimento e implementação de projetos de produção integrada de etanol.

Outras palavras relevantes se referem a etapa de avaliação da viabilidade técnica e econômica dos projetos de biorrefinarias virtuais, a saber: *techno economic analysis* (análise técnico-econômica), *life-cycle assessment* (análise do ciclo de vida) e *optimization* (otimização de processos). As palavras-chave anteriormente mencionadas, no contexto da análise aqui realizada, podem indicar possíveis exemplos de metodologias de avaliação de viabilidade econômica a serem incorporadas a partir da simulação computacional de cenários de produção integrada de etanol.

A partir da simulação dos processos integrados de produção de etanol e da aplicação conjunta de metodologias de avaliação técnico-econômica, espera-se ser possível gerar inventários econômicos consistentes sobre o produto citado anteriormente e possíveis subprodutos/resíduos gerados. Além disso, a avaliação conjunta pode contribuir para identificar gargalos técnicos e econômicos e otimizar processos em

um contexto multi-objetivo, com vistas ao aproveitamento energético da biomassa de cana, o aumento da produção de etanol, a redução dos custos totais e a diminuição dos impactos ambientais associados à produção de etanol.

3.2 Revisão bibliográfica

Ao excluir os artigos com média anual do número de citações menor que 2,0, foram selecionados apenas 48 artigos. A fim de analisar o conteúdo dos artigos citados foram gerados resumos expandidos de todos os artigos referidos com o emprego de inteligência artificial generativa. Após realizar análise dos resumos expandidos foram selecionados 05 artigos, que seguem listados na Tabela 1.

Tabela 1. Artigos selecionados na etapa de revisão bibliográfica.

Título	Autores e ano de publicação	Número de citações	País	Revista
<i>Techno-economic assessment of bioenergy and biofuel production in integrated sugarcane biorefinery: Identification of technological bottlenecks and economic feasibility of dilute acid pretreatment.</i>	Vasconcelos et al. (2020)	38	Brasil	<i>Energy</i>
<i>A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane.</i>	Moonsamy et al. (2022)	30	África do Sul	<i>Industrial Crops & Products</i>
<i>Flexible heat integration system in first-/second-generation ethanol production via screening pinch-based method and multiperiod model.</i>	Pavão et al. (2023)	9	Brasil	<i>Energy</i>
<i>Techno-Economic Feasibility of Biomass Washing in 1G/2G Sugarcane Biorefineries.</i>	Pinto et al. (2021)	4	Brasil	<i>BioEnergy Research</i>
<i>Techno-economic impacts of varied compositional profiles of sugarcane experimental hybrids on a biorefinery producing sugar, ethanol and electricity.</i>	Mendes et al. (2021)	31	Brasil	<i>Chemical Engineering Research and Design</i>

O estudo de Vasconcelos et al. (2020) avaliou a viabilidade técnico-econômica de uma biorrefinaria integrada de cana, voltada para produção de etanol e bioeletricidade. Neste estudo, foi avaliado, especificamente, o uso de um cultivar experimental de cana híbrido estudado anteriormente e o pré-tratamento da biomassa com ácido diluído. Para avaliar os processos de integração, foi empregada a metodologia da plataforma “Biorrefinaria Virtual” (Bonomi, 2016), combinada com o simulador de balanços de massa e energia *Aspen Plus*. Os autores identificaram gargalos operacionais e econômicos, a saber, o elevado custo de capital e de insumos químicos, bem como a fermentação do licor de pentoses (açúcares de cinco carbonos).

A fermentação das pentoses foi avaliada como uma alternativa para aumentar a produção total de etanol e aumentar o lucro obtido, em relação ao cenário onde houve somente a fermentação dos açúcares de seis carbonos (processo convencional). Por meio de simulações computacionais e análises econômicas de sensibilidade, o estudo referido destacou a relevância do tempo de hidrólise enzimática das pentoses e a influência da composição química da cana para a rentabilidade econômica do processo, considerando-se que o aumento do tempo do processo anteriormente mencionado eleva consideravelmente os custos totais associados à produção do etanol e uma menor quantidade de sólidos totais, isto é, uma matéria prima com menor teor de matéria recalcitrante, tende a diminuir os custos associados ao pré-tratamento, dentro das condições analisadas.

Pavão et al. (2023) apresentaram um sistema flexível de integração energética para a produção de etanol 1G e etanol 2G em biorrefinarias de cana-de-açúcar. Os autores propuseram uma metodologia que combinou uma abordagem baseada em "Pinch" para otimização da integração de calor com um modelo multiperíodo para o projeto de redes de trocadores de calor. O modelo matemático da planta de produção integrada de etanol e bioeletricidade foi implementado no ambiente EMSO (*Environment for Modelling, Simulation, and Optimization*). O objetivo do trabalho referido é otimizar o uso do bagaço de cana, seja para produção de etanol 2G ou para geração de eletricidade, com possibilidade de adaptação às flutuações dos preços de mercado. Nas condições mencionadas anteriormente os autores determinaram que o sistema proposto pode aumentar a fração de bagaço destinada para a produção de etanol 2G de 66% para 77%, sem comprometer a autossustentabilidade da planta quanto ao suprimento de energia elétrica, considerando-se a integração e otimização energética da biorrefinaria,

Pinto et al. (2021) avaliaram a viabilidade técnico-econômica de adicionar-se uma etapa de lavagem após o pré-tratamento da biomassa de bagaço de cana em biorrefinarias integradas para a produção de etanol. Os autores investigaram a influência de diferentes protocolos de lavagem sobre a hidrólise enzimática e a fermentação no simulador *Aspen Plus*. Os principais resultados obtidos indicaram que a lavagem da biomassa sob condições brandas pode aumentar significativamente o rendimento de glicose e a produtividade de etanol, tornando-a uma opção economicamente competitiva com um valor presente líquido (VPL) positivo. O trabalho referido apresentou a importância de otimizar as condições de lavagem para melhorar a lucratividade e a sustentabilidade das biorrefinarias.

Mendes et al. (2017) investigaram o impacto técnico-econômico de seis diferentes cultivos híbridos experimentais de cana-de-açúcar na produção de açúcar, etanol e bioeletricidade em uma biorrefinaria. Os pesquisadores utilizaram, conjuntamente, a plataforma "Biorrefinaria Virtual " (Bonomi, 2016) e o simulador *Aspen Plus* para implementar os balanços de massa e energia, simular processos e analisar o retorno interno de investimento (TIR). Os autores concluíram que a composição química da cana-de-açúcar, como lignina, sacarose e fibra, bem como a produtividade de campo, devem ser consideradas simultaneamente para otimizar o desempenho econômico da biorrefinaria.

A análise de dados do estudo citado anteriormente indicou que o cultivo ideal para a biorrefinaria integrada, dentro das condições estudadas, foi aquele que apresentou, simultaneamente, os seguintes parâmetros: a maior produtividade por área de cultivo, elevado teor relativo de sacarose e fibras e baixo teor relativo de lignina. Já a análise de sensibilidade sugeriu que o preço de venda do etanol e os investimentos são os fatores mais críticos para o TIR, reforçando a importância das biorrefinarias multiproduto, a fim de assegurar a rentabilidade econômica dos empreendimentos nesse contexto.

Moosamy et al. (2022) investigaram a produção integrada de etanol a partir de cana-de-açúcar, comparando a viabilidade econômica de diferentes configurações de refinarias. Os pesquisadores analisaram diferentes cenários no simulador *Aspen Plus*, a partir de dados de produção e parâmetros obtidos de uma biorrefinaria localizada na África do Sul. Os cenários foram projetados em três configurações, a saber: produção autônoma de etanol 1G de melaço de cana, produção autônoma de etanol 2G a partir de resíduos lignocelulósicos como bagaço e palha de cana, e produção integrada de etanol 1G/2G. Além disso, o presente estudo utilizou análises técnico-econômicas e de sensibilidade para determinar a configuração industrial mais rentável, com foco no custo mínimo de venda do etanol. Os resultados indicam que a integração do melaço e da biomassa lignocelulósica pode oferecer benefícios econômicos significativos, especialmente em cenários que otimizam a co-fermentação e minimização dos custos de capital. Conforme os autores, a produção integrada visa ser energeticamente autossuficiente e reduzir os custos de conversão da biomassa lignocelulósica, tornando o etanol 1G/2G uma opção de combustível rentável e sustentável.

Em relação a utilização de simuladores, 04 dos 05 estudos analisados utilizaram o *Aspen Plus* como simulador de processos para implementar os cenários e seus respectivos processos. Isso demonstra a popularidade deste ambiente computacional nesse contexto. Em relação, aos processos de integração de produção de etanol, destaca-se o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica de cana e a fermentação das pentoses como pontos cruciais na operação das biorrefinarias integradas. Por mais que a fermentação das pentoses tenha a potencialidade para aumentar a produção de etanol, é necessário avaliar os custos envolvidos, principalmente àqueles relativos à hidrólise enzimática dos polímeros de açúcares de cinco carbonos, uma vez que, as enzimas específicas para o fim mencionado tendem a ser mais caras em relação às enzimas convencionais.

Em relação às metodologias de avaliação técnico-econômica, a análise de sensibilidade, o custo do capital e a determinação do TIR, que inclui o fluxo de caixa descontado, foram citados nos artigos analisados, o que pode sugerir o uso de tais indicadores de viabilidade nas análises realizadas para investimentos em biorrefinarias integradas de etanol. Também é válido ressaltar que o custo de venda do

etanol e de outros subprodutos, como a bioeletricidade, parece ser uma variável relevante a ser incluída nas análises de rentabilidade de projetos, uma vez que a produção do etanol 2G ou a produção integrada de etanol está diretamente relacionada a cogeração de vapor e eletricidades na biorrefinarias.

3.3 Análise de anterioridade

Foram encontrados 06 registros de patentes. As informações obtidas sobre cada registro de patente de inovação seguem organizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição dos registros de patentes selecionados no banco de dados do Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI). Fonte: INPI (2025).

Identificação da patente	Título
BR112015015595A2	Processos e aparelho de biorrefinaria para separar celulose, hemicelulose e lignina da biomassa
BR1120150156215A2	Processo para fracionamento de biomassa e processo de biorrefinaria
BR112014161313A8	Processo para hidrolisar material lignocelulósicos
PI10122567A2	Processo de biorrefinaria, e, processo para hidrólise enzimática de fibra de celulose
PI08196419B1	Processo de produção de álcool em um contexto de biorrefinaria
BR102014023395	Sistema Catalítico e Processo De Obtenção De Bioetanol 2G a partir de Xilana/Oligômeros de Xilose (OXs)

Observou-se que 05 das 06 patentes analisadas do Tabela 2 apresentaram inovações na etapa de fracionamento da biomassa lignocelulósica. Este material é composto por três constituintes essenciais, a saber: celulose, hemicelulose e lignina (Martins, Rabelo e Costa et al., 2015). A fim de ser aproveitada no contexto da biorrefinaria a biomassa deve passar pelos processos de pré-tratamento, que pode ser realizado por diferentes métodos, classificados como físicos, químicos, físico-químicos e/ou biológicos (Rabelo et al., 2010; Vieira et al., 2020), ou, ainda, por uma combinação destes métodos (Sindhu et al., 2016). Um exemplo disto foi descrito na patente de inovação PI10122567A2 pela utilização combinada do dióxido de enxofre (SO₂) e do etanol, um método químico, associado à explosão a vapor da fibra celulósica.

Todas as seis patentes analisadas (Tabela 2) incluíram registros de inovação na etapa da hidrólise enzimática da celulose e da hemicelulose. Uma das patentes analisadas propõe a produção de grupos de enzimas celulolíticas e hemicelulolíticas a partir da própria biomassa lignocelulósica a ser utilizada como matéria-prima. Conforme descrito por Garcia et al. (2022), a hidrólise enzimática da biomassa lignocelulósica ainda permanece como uma das etapas determinantes no escalonamento da produção comercial de etanol celulósico no Brasil. Dessa forma, é justificável que tal etapa do processo de produção do etanol 2G seja prioritária nos registros de inovações na área de pesquisa do presente estudo bibliométrico.

Conforme Vieira et al. (2020), o contexto das biorrefinarias de cana-de-açúcar enfrenta uma elevada necessidade de inovações tecnológicas e abordagens sustentáveis. Vandenberghe et al. (2022), discutiram que muitas soluções inovadoras relativas ao etanol em tais biorrefinarias podem não estar protegidas por patentes ou podem estar em desenvolvimento. Neste contexto, a simulação de biorrefinarias virtuais de cana-de-açúcar se apresenta como uma ferramenta versátil, amplamente disponível e com vasta potencialidade de aplicação, sendo uma das ferramentas mais completas para simular e permitir realizar uma avaliação de diferentes cenários de integração de linhas de produção de etanol, de forma que a sua utilização, combinada com a análise técnico-econômica de investimentos, pode viabilizar e otimizar o uso das inovações tecnológicas aqui discutidas.

4 Conclusões

Os resultados apresentados e discutidos no presente estudo, sob as condições de análise delimitadas, indicam que as publicações científicas sobre avaliação técnico-econômica de biorrefinarias virtuais integradas de etanol estão concentradas no território brasileiro, considerando-se a predominância de autores relevantes e afiliações destes últimos serem associados ao Brasil. Acredita-se que o elevado número de publicações no país referido se justifique pelo aumento da demanda por etanol esperado para os próximos anos e o incentivo para a produção de combustíveis de segunda geração, considerando-se possibilidade de

redução das emissões de gases de efeito estufa e o aumento da produção total de etanol sem a ampliação da área de cana-de-açúcar plantada.

A revisão bibliográfica e a busca por anterioridade realizadas indicaram, em consonância, que as etapas com maiores dificuldades operacionais na produção integrada continuam sendo as etapas de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica e a hidrólise enzimática da celulose e da hemicelulose, fato que pode ser reforçado pela aparição de palavras-chaves relacionadas aos temas citados anteriormente. Isso pode indicar que estas etapas de processo e parâmetros relacionados a elas, como custos de enzimas e preço de venda de produtos químicos, devem ser priorizadas em novas pesquisas no recorte de pesquisa mencionado anteriormente.

Quanto aos simuladores computacionais de processos utilizados nos estudos selecionados, verificou-se que a expressiva maioria deles empregou o software *Aspen Plus* combinado ao uso de planilhas eletrônicas. Tal fato pode indicar uma lacuna de pesquisas na exploração de simuladores gratuitos disponíveis.

Em relação aos indicadores de viabilidade econômica, foram citados com maior frequência relativa, a taxa interna de retorno (TIR) e as análises de custo de capital investido. Vale ressaltar que tais metodologias, geralmente, foram associadas a análises de impacto social e ambiental dos empreendimentos, como por exemplo a ACV, o que pode representar uma tendência nesta área de pesquisas.

De forma geral, as avaliações de viabilidade devem ser consideradas aplicáveis dentro das condições de estudo especificadas, uma vez que tais conclusões são limitadas exclusivamente a estes cenários de produção. Por mais que a simulação computacional seja uma ferramenta abrangente e flexível parece ser necessário considerar as limitações mencionadas anteriormente ao interpretar e comparar a viabilidade e rentabilidade de projetos para a produção integrada de etanol, tendo em vista a dinamicidade e complexidade do mercado interno deste biocombustível e de outros possíveis coprodutos das biorrefinarias de cana, como a bioeletricidade e os produtos químicos derivados, como resinas, solventes e adesivos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências bibliográficas

- Aguiar, DR, Taheripour, F e Silva, DA (2025) 'Ethanol fuel in Brazil: Policies and carbon emission avoidance', *Biofuels*, 16(3), pp. 248-258.
- Albarelli, JQ (2013) Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda geração: simulação, integração energética e análise econômica. [Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)].
- Andrade Junior, MAU et al. (2019) 'Exploring future scenarios of ethanol demand in Brazil and their land-use implications', *Energy Policy*, 134, p.110958.
- Bonomi, A et al. (2016) *Virtual biorefinery*. Cham: Springer International Publishing.
- Conteratto, C et al. (2021) 'Biorefinery: A comprehensive concept for the sociotechnical transition toward bioeconomy', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, p.111527.
- Correa, C et al. (2023) 'Brazil and the world market in the development of technologies for the production of second-generation ethanol', *Alexandria Engineering Journal*, 67, pp.153-170.
- CTBE – Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (2012) *The Virtual Sugacane Biorefinery - 2011 Report*. Relatório Técnico.
- Dias, MO et al. (2013) 'Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane', *Chemical Engineering Research and Design*, 91(8), pp.1411-1417.
- Donthu, N et al. (2021) 'How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines', *Journal of Business Research*, 133, pp.285-296.
- Empresa de Pesquisa Energética (2025) *Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

- abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf (Acesso: 04 Setembro 2025).
- Energy Institute (2024) Statistical Review of World Energy. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review/> (Acesso: 06 Outubro 2025).
- Garcia, TC et al. (2022) ‘Consumers’ willingness to pay for second-generation ethanol in Brazil’, *Energy Policy*, 161, p.112729.
- Hoang, TD e Nghiem, N (2021) ‘Recent developments and current status of commercial production of fuel ethanol’, *Fermentation*, 7(4), p.314.
- Karp, SG et al. (2021) ‘Bioeconomy and biofuels: the case of sugarcane ethanol in Brazil’, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(3), pp.899-912.
- Mendes, FM et al. (2017) ‘Techno-economic impacts of varied compositional profiles of sugarcane experimental hybrids on a biorefinery producing sugar, ethanol and electricity’, *Chemical Engineering Research and Design*, 125, pp.72-78.
- Mizik, T (2021) ‘Economic aspects and sustainability of ethanol production—a systematic literature review’, *Energies*, 14(19), p.6137.
- Moonsamy, TA et al. (2022) ‘A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane’, *Industrial Crops and Products*, 188, p.115675.
- Neto, PAM (2021) ‘Why Brazil imports so much corn-based ethanol: The role of Brazilian and American ethanol blending mandates’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, p.111706.
- Pavão, LV et al. (2023) ‘Flexible heat integration system in first-/second-generation ethanol production via screening pinch-based method and multiperiod model’, *Energy*, 271, p.127017.
- Pinto, AS et al. (2021) ‘Techno-economic feasibility of biomass washing in 1G2G sugarcane biorefineries’, *BioEnergy Research*, 14, pp.1253-1264.
- Rabelo, SC (2010) Avaliação e otimização de pré-tratamentos e hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração. [Tese de Doutorado, instituição não informada].
- Rodionova, MV et al. (2022) ‘A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3), pp.1481-1498.
- Silva Martins, LH et al. (2015) ‘Effects of the pretreatment method on high solids enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of the cellulosic fraction of sugarcane bagasse’, *Bioresource Technology*, 191, pp.312-321.
- Sindhu, R et al. (2016) ‘Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products—An overview’, *Renewable Energy*, 98, pp.203-215.
- União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia - UNICA (2023). Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/colombia-se-aproxima-do-brasil-pelo-etanol> (Acesso: 06 Outubro 2025).
- Vandenberghe, LPS et al. (2022) ‘Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, p.112721.
- Vasconcelos, MH (2017) Desenvolvimento e análise econômica de modelos de biorrefinaria integrada 1G2G empregando pré-tratamento ácido diluído. [Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo].
- Vasconcelos, MH et al. (2020) ‘Techno-economic assessment of bioenergy and biofuel production in integrated sugarcane biorefinery: Identification of technological bottlenecks and economic feasibility of dilute acid pretreatment’, *Energy*, 199, p.117422.
- Vieira, S et al. (2020) ‘Sustainability of sugarcane lignocellulosic biomass pretreatment for the production of bioethanol’, *Bioresource Technology*, 299, p.122635.