



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

GABRIEL HENRIQUE VICENTIN CALDEIRA

**Produção de etanol de segunda geração no cenário brasileiro: identificação
de fatores para a eficiência e viabilidade do processo**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

São Carlos-SP

2025

Gabriel Henrique Vicentin Caldeira

Produção de etanol de segunda geração no cenário brasileiro: identificação de fatores para a eficiência e viabilidade do processo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química, da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Thais Suzane Milesi Esteves

São Carlos-SP

2025

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 17 de fevereiro 2025 perante a banca examinadora:

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Thais Suzane Milesi Esteves

DEQ/UFSCar convidado: Prof. Dr. Diego Andrade Lemos

Professora da Disciplina: Prof^ª. Dr^ª. Mônica Lopes Aguiar

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Arnaldo e Maria de Fátima, que lutaram incansavelmente para que eu pudesse chegar até aqui, pelo apoio e amor incondicionais demonstrados ao longo de toda a minha vida.

Ao meu irmão, Guilherme, por ser desde sempre meu ponto de apoio, meu melhor amigo e um exemplo de homem.

À minha companheira Bruna Aziz, por toda ajuda e motivação nessa jornada.

À professora Thais, pela paciência, dedicação e disposição em me orientar neste trabalho de conclusão, em todas as etapas.

Aos demais professores, que exerceram um papel fundamental na minha trajetória acadêmica. Muitos deles foram além de mestres, tornando-se também amigos, sempre dispostos a ajudar e contribuir para a formação dos estudantes.

Aos meus amigos e colegas, que conheci e cultivei ao longo desses anos de graduação, e aos meus amigos de longa data, que me apoiaram em inúmeros momentos e foram uma grande força para que eu conseguisse chegar até aqui. Em especial, ao meu amigo Pedro Lechado (*in memoriam*), que foi um amigo excepcional e uma grande motivação para superar desafios.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para o meu crescimento pessoal e profissional.

Meu sincero agradecimento a todos!

Epígrafe

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.”

(Max Weber)

RESUMO

Na busca por alternativas mais sustentáveis para a matriz energética global, o etanol de segunda geração (2G) surge como uma opção promissora, especialmente no Brasil, onde o bagaço de cana-de-açúcar e outras biomassas lignocelulósicas são abundantes e podem desempenhar um papel central no desenvolvimento da bioeconomia. A produção de etanol 2G utiliza subprodutos agrícolas e industriais, apresentando a vantagem de não competir diretamente com a cadeia alimentar, diferentemente dos biocombustíveis de primeira geração (1G). A biomassa lignocelulósica é composta por celulose, hemicelulose e lignina, dos quais celulose e hemicelulose são compostas por monômeros de açúcares fermentescíveis. Para acessar os açúcares presentes na biomassa lignocelulósica, primeiramente é necessária uma etapa de pré-tratamento para quebrar a estrutura recalcitrante da biomassa, seguida de uma hidrólise enzimática utilizando celulasas e hemicelulasas para liberar os açúcares. Este processo pode ser conduzido de diferentes maneiras, como SHF (hidrólise e fermentação separadas), SSF (sacarificação e fermentação simultâneas), SSCF (Sacarificação e co-fermentação simultâneas) e BPC (bioprocessamento consolidado). Adicionalmente, a competitividade econômica do etanol 2G é peça chave para sua implementação industrial. Neste contexto, o presente trabalho examinou as diferentes formas de condução dos processos de hidrólise enzimática e fermentação para produção de etanol, com foco especial para o impacto econômico de cada tipo de processo, explorando o impacto da concentração das enzimas, o tipo de biomassa utilizada e outras análises relevantes. Primeiramente foi realizada a análise bibliométrica dos processos utilizando o software VOSViewer® e uma extensa revisão da literatura para construção do banco de dados de parâmetros dos diferentes processos. Os dados obtidos foram tratados em Microsoft PowerBI® para construção de gráficos de tendência para identificação de correlações. Os resultados indicaram que a otimização dos fatores temperatura, tempo, carga enzimática, tipo de biomassa e tipo de processo são essenciais para a melhoria técnico-econômica da produção de etanol, em especial a condução do processo por BPC que, apesar de ainda haver poucos dados e estudos na área, apresentou o preço mínimo de venda de etanol (MESP) mais promissor (0,34 USD/L).

Palavras-chave: bioenergia; etanol de segunda geração; rotas de produção; MESP.

ABSTRACT

In the search for more sustainable alternatives for the global energy matrix, second-generation (2G) ethanol emerges as a promising option, especially in Brazil, where sugarcane bagasse and other lignocellulosic biomasses are abundant and can play a central role in the development of the bioeconomy. The production of 2G ethanol utilizes agricultural and industrial by-products, offering the advantage of not directly competing with the food chain, unlike first-generation (1G) biofuels. Lignocellulosic biomass is composed of cellulose, hemicellulose, and lignin, with cellulose and hemicellulose consisting of fermentable sugar monomers. To access the sugars, present in lignocellulosic biomass, a pretreatment step is first required to break down the biomass's recalcitrant structure, followed by enzymatic hydrolysis using cellulases and hemicellulases to release the sugars. This process can be conducted in different ways, such as SHF (separate hydrolysis and fermentation), SSF (simultaneous saccharification and fermentation), SSCF (simultaneous saccharification and co-fermentation), and BCP (consolidated bioprocessing). Additionally, the economic competitiveness of 2G ethanol is a key factor for its industrial implementation. In this context, the present study examined the different ways of conducting enzymatic hydrolysis and fermentation processes for ethanol production, with a particular focus on the economic impact of each process type, exploring the effects of enzyme concentration, biomass type, and other relevant analyses. First, a bibliometric analysis of the processes was carried out using VOSViewer® software, along with an extensive literature review to build a database of process parameters. The data obtained were processed using Microsoft Power BI® to create trend graphs for correlation identification. The results indicated that optimizing factors such as temperature, time, enzyme loading, biomass type, and process type is essential for improving the techno-economic feasibility of ethanol production. In particular, BCP processing, despite the limited data and studies in the field, showed the most promising minimum ethanol selling price (MESP) (0.34 USD/L).

Keywords: bioenergy; second-generation ethanol; production pathways; MESP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da Celulose.	14
Figura 2 - Esquema geral da estrutura lignocelulósica. A celulose é organizada em feixes de fibras.	16
Figura 3 - Estrutura da biomassa lignocelulósica antes e após o pré-tratamento.	17
Figura 4 - Etapas de processamento de biomassa lignocelulósica.	20
Figura 5 – Possíveis configurações de processo utilizadas para a produção de etanol 2G.	21
Figura 6 - Fluxograma das etapas seguidas para elaboração do trabalho.	26
Figura 7 - Evolução nas publicações sobre Etanol 2G com o passar dos anos	27
Figura 8 - Segmentação por área de pesquisa sobre etanol 2G segundo a base de dados Scopus.	28
Figura 9 - Países com expressivas produções científicas sobre etanol 2G , de acordo com a base de dados Scopus. a) Visão quantitativa; b) representação geográfica.	28
Figura 10 - Principais instituições que desenvolvem pesquisa e inovação sobre o tema etanol 2G, segunda a base de dados Scopus.	29
Figura 11- Autores mais relevantes no campo de etanol 2G agrupados pelo software VOSviewer, quanto maior o círculo, maior a produtividade do autor, os clusters de mesma cor, representam grupo de pesquisadores colaborativos.	29
Figura 12 - Variação de concentração de etanol (g/l) por conversão da biomassa em açúcar (%) com a variação de tamanho pela concentração de celulase.	34
Figura 13- Variação de concentração de etanol (g/l) por conversão da biomassa em açúcar (%) com a variação de tamanho pelo tempo.	36
Figura 14- Variação de concentração de etanol (g/L), temperatura (°C) com a variação de tamanho pela atividade enzimática de celulase (FPU/g).	37
Figura 15- Variação de concentração de etanol (g/l) pela atividade enzimática da Celulase com a variação do tamanho pelo tempo (h).	38
Figura 16 - Variação da média dos parâmetros da Tabela 3 pelo tipo de biomassa.	39
Figura 17- Comparação dos parâmetros médios com a variação do tipo de processo.	41
Figura 18- Variação da produção de etanol (g/l) pelo MESP (USD/L) e pelo tipo de biomassa empregado.	46
Figura 19- Média do MESP com diferenciação de biomassa e tipo de processo utilizado.	47
Figura 20 - Média do MESP com diferenciação de tipo de processo utilizado.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Produção mundial de Etanol de 2019 a 2023	23
Tabela 2 - Exportações Brasileiras Anuais de Etanol.....	23
Tabela 3- Resultados dos Parâmetros de Hidrólise Enzimática e Eficiência de Conversão em etanol a partir de Diferentes Biomassas para Produção de Etanol	31
Tabela 4- Comparação dos MESTs para etanol 2G em diferentes tipos de processos e biomassas utilizadas, onde SHF é hidrólise e fermentação separadas, SSF é sacarificação e fermentação simultâneas e SSCF é sacarificação e co-fermentação.	42

SUMÁRIO

1.	Introdução e justificativa	11
2.	Objetivos.....	13
3.	Revisão bibliográfica.....	13
3.1	Biomassa Lignocelulósica	13
3.2	Pré-tratamentos da biomassa	16
3.3	Hidrólise enzimática e fermentação da biomassa.....	18
3.5	Atual cenário do etanol 2G no brasil.....	22
3.6	Sustentabilidade do etanol 2G	24
4.	Metodologia.....	25
4.1	Análise e interpretação dos dados	25
4.2	Análise bibliométrica e de parâmetros de etanol 2G.....	25
5.	Resultados e Discussão.....	26
5.1	Análise bibliométrica.....	26
5.2	Parâmetros e análises de produção de etanol 2G.....	30
5.3	Viabilidade econômica do processo	42
6.	Conclusões.....	49
7.	Referências bibliográficas	51

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por energia, impulsionada pelo aumento populacional, urbanização acelerada e aspirações por melhores condições de vida, tem colocado a questão energética no centro das preocupações globais. Este cenário desafia o mundo a encontrar soluções sustentáveis que atendam às necessidades energéticas crescentes sem comprometer o equilíbrio ambiental, reforçando a importância de transitar para fontes renováveis e tecnologias mais eficientes. Atualmente, uma parcela significativa da demanda mundial por energia é atendida pela queima de combustíveis fósseis não renováveis, como derivados de petróleo, o que gera emissões significativas de gases de efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas (GALEMBECK, 2022). Diante desses desafios, as fontes de energia renováveis têm ganhado crescente atenção como soluções viáveis (IPCC, 2024).

Nesse cenário, o Brasil se posiciona como um dos maiores produtores e consumidores de etanol, um biocombustível importante para o meio ambiente e a economia. A produção de etanol de primeira geração (1G) a partir de culturas agrícolas, como cana-de-açúcar, está limitada pelo alto uso de recursos naturais e pela competição com a produção de alimentos. Em comparação, o etanol de segunda geração (2G), produzido a partir de subprodutos lignocelulósicos (bagaço, palha de cana etc.), traz grandes vantagens ambientais, como a redução dos gases de efeito estufa, além de não competir diretamente com a agricultura alimentar (SILVA, 2022).

A biomassa lignocelulósica é a principal matéria-prima do etanol 2G, a qual é formada por celulose, hemicelulose e lignina. A celulose e a hemicelulose, principais componentes da biomassa lignocelulósica, são polímeros de açúcares fermentescíveis. Por outro lado, a lignina, com sua estrutura complexa, confere rigidez e resistência à biomassa, dificultando sua degradação. Por isso, diferentemente do etanol de 1G, a produção de etanol de 2G requer etapas adicionais, como o pré-tratamento, para romper a estrutura lignocelulósica, e a hidrólise enzimática, para liberar açúcares fermentáveis (LEMÕES, 2018). O pré-tratamento promove a quebra da estrutura lignocelulósica, viabilizando o acesso de enzimas hidrolíticas na etapa de hidrólise enzimática subsequente, de forma a transformar celulose e hemicelulose em açúcares fermentescíveis, que por sua vez são utilizados na fermentação para produção de etanol.

Apesar dessas vantagens ambientais, o processo de produção de etanol 2G enfrenta desafios tecnológicos significativos, como a necessidade de enzimas mais eficientes, a redução dos custos operacionais e a escalabilidade comercial. O processo de produção de etanol 2G pode ser realizado em diferentes configurações. A Hidrólise e Fermentação Separadas (SHF,

do inglês “*Separated Hydrolysis and Fermentation*”) envolve um processo de duas etapas, onde o substrato é sacarificado seguido pela fermentação do açúcar, separadamente. Ela permite condições operacionais ideais em cada estágio, com um mínimo de interações entre elas, mas é demorada e limitada pela inibição causada pelo produto final (CHANDEL et al., 2021). Outras possíveis configurações consistem na Sacarificação e Fermentação Simultâneas (SSF, do inglês “*Simultaneous Saccharification and Fermentation*”) e na Sacarificação e Co-Fermentação Simultâneas (SSCF, do inglês “*Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation*”) as quais permitem a hidrólise de polissacarídeos juntamente com a fermentação de hexoses e/ou pentoses pela adição de enzima e levedura simultaneamente no reator. Elas são mais vantajosas quando comparadas ao SHF por reduzirem o tempo de processamento e o número de reatores, levando a maiores rendimentos de etanol. No entanto, as condições ótimas de temperatura são diferentes para sacarificação (~50 °C) e fermentação alcoólica (~30 °C) (OLOFSSON et. al., 2008). O bioprocessamento consolidado (BPC), por sua vez, é uma tecnologia emergente, na qual as etapas da produção de enzimas hidrolíticas, sacarificação do substrato e fermentação do etanol ocorrem no mesmo reator, realizadas por um único microrganismo ou complexo microbiano (PEREZ et al., 2023).

O Brasil possui vantagens competitivas importantes para a produção de etanol 2G, como a ampla disponibilidade de subprodutos lignocelulósicos provenientes da indústria sucroalcooleira. No entanto, desafios tecnológicos relacionados à otimização das etapas de pré-tratamento e hidrólise ainda precisam ser superados para viabilizar a produção de etanol 2G em escala comercial e contribuir para uma matriz energética mais sustentável (MELO, 2020), principalmente considerando o alto custo das enzimas hidrolíticas envolvidas no processo.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo identificar os fatores determinantes para a eficiência e viabilidade da produção de etanol 2G no Brasil. Por meio da análise de diferentes tipos de biomassa e de processos, busca-se fornecer informações que contribuam para o desenvolvimento de novos projetos e soluções tecnológicas capazes de superar os desafios ainda enfrentados pelo setor, e compreender como a variação de parâmetros importantes do processo afetam a eficiência produtiva e o impacto econômico

2. OBJETIVOS

Este trabalho de graduação teve como objetivo identificar os fatores determinantes à eficiência e viabilidade da produção de etanol 2G no Brasil a fim de fornecer informações que possam guiar o desenvolvimento e projeto de novos processos e superar os desafios técnicos ainda encontrados no cenário Brasileiro.

Os objetivos específicos foram:

- Levantamento bibliográfico de dados de processo de etanol 2G
- Análise dos dados de processos obtidos utilizando o software Power BI, para identificação de tendências e correlações
- Caracterização do cenário atual de etanol 2G no Brasil e no mundo através de uma análise bibliométrica utilizando software VOSviewer para análise;
- Comparar fatores para a eficiência e viabilidade econômica do processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados ao objetivo deste trabalho. Visando fornecer o conhecimento prévio necessário para o entendimento do projeto realizado, assim como o estado da arte do tema, são abordados os seguintes tópicos: biomassa lignocelulósica, pré-tratamentos da biomassa, hidrólise enzimática da biomassa, produção de etanol 2G, métodos de produção e por fim o atual cenário do etanol 2G no Brasil.

3.1 Biomassa Lignocelulósica

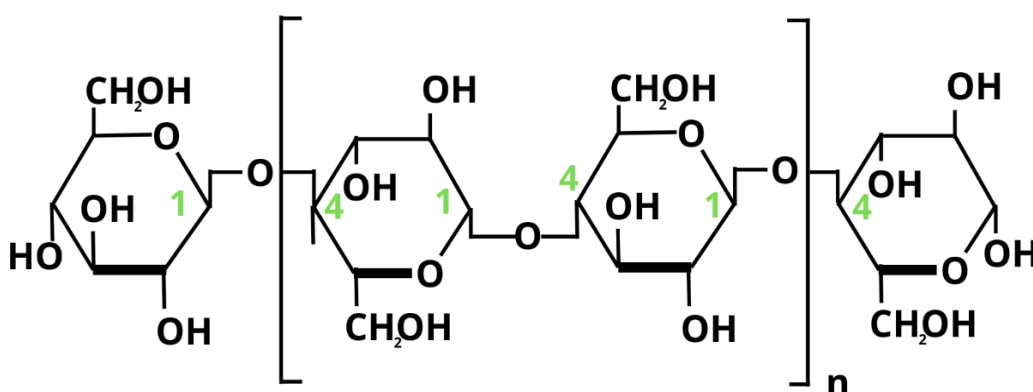
Nas últimas décadas, a produção de etanol como biocombustível ganhou relevância, especialmente no Brasil, que se destaca como um dos maiores produtores mundiais deste biocombustível devido à elevada capacidade de produção de cana-de-açúcar e ao crescimento do setor sucroenergético (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). Atualmente, no Brasil, a gasolina contém 27,5% de etanol anidro em sua composição. Estão em andamento testes para avaliar a viabilidade de aumentar essa proporção para 30%, conforme previsto na Lei do Combustível do Futuro, o que aumentaria a demanda potencial pelo anidro em 1,2 a 1,4 bilhões de litros em um ano (RURAL, 2025). Esses testes estão sendo conduzidos pelo Instituto Mauá de Tecnologia e os resultados preliminares são esperados para o primeiro trimestre de 2025. O etanol de 1G é produzido a partir de fontes alimentícias, como cana-de-açúcar, milho,

beterraba e outros vegetais ricos em açúcares, sendo um processo bem estabelecido no Brasil, com menores custos e alta produtividade (PACHECO, 2011). Embora o etanol 1G seja amplamente considerado uma fonte de energia renovável e sustentável, a competição por terras agrícolas, especialmente em contextos de escassez de recursos naturais, representa um desafio significativo para sua produção em larga escala (SILVEIRA, 2023). Esse é um dos motivos para os diversos avanços que vêm ocorrendo nos últimos anos, voltados ao aumento da eficiência das plantações, visando ampliar a produção utilizando a mesma área plantada.

Neste sentido, o etanol 2G surge como uma alternativa promissora por ser obtido a partir de biomassa lignocelulósica, como bagaço e palha de cana, uma matéria-prima renovável e amplamente disponível, que não compete com culturas alimentares e contribui para a sustentabilidade ambiental. (HERMINO, 2024). O potencial da biomassa lignocelulósica como matéria-prima está relacionado com sua composição, a qual é composta predominantemente por três frações principais: celulose, hemicelulose e lignina. Estas são os pilares estruturais das plantas, conferindo resistência e proteção contra degradação ambiental.

A celulose é um polímero linear de unidades de β -D-glicopiranosose, unidas por ligação glicosídica β -1 \rightarrow 4, e grau de polimerização variado (FENGEL; WEGENER, 1989). Esse polímero é composto por microfibrilas altamente organizadas, mantidas por ligações de hidrogênio e interações de Van der Waals, que conferem coesão e estrutura às fibras, influenciando diretamente suas propriedades físico-químicas., conferindo coesão e estrutura às fibras de celulose (WAKELYN, et al., 2006) apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura da Celulose.



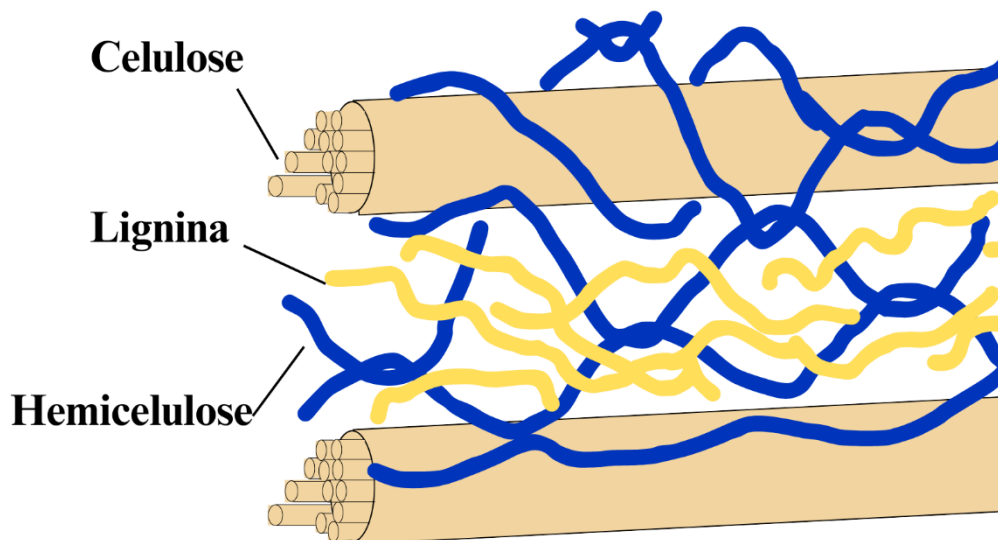
Fonte: Acervo pessoal.

A celulose apresenta regiões com alto grau de ordenamento, conhecidas como regiões cristalinas, onde as cadeias de glicanas estão firmemente ligadas umas às outras. Essas regiões cristalinas conferem maior resistência à tração, alongamento e solvatação da fibra de celulose. Por outro lado, a celulose também possui regiões amorfas, com menor grau de ordenamento, que proporcionam flexibilidade à fibra (VÁSQUEZ et al., 2007).

A hemicelulose é um complexo heteropolissacarídeo que consiste em uma cadeia principal de D-xilose com ramificações de açúcares, como β -D-glicose, β -D-manose, α -D-galactose, e α -L-arabinose, assim como ácidos glucurônicos, acéticos, urônicos e compostos fenólicos (FENGEL; WEGENER, 1989). Diferentemente da celulose, a hemicelulose não possui regiões cristalinas, característica que a torna mais suscetível à hidrólise química, mesmo sob condições mais brandas (SUN; CHENG, 2002). A hemicelulose desempenha um papel importante na estrutura da parede celular das plantas, contribuindo para sua flexibilidade e desempenhando funções específicas, dependendo dos diferentes tipos de açúcares que a compõem, como xilanas, mananas e galactanas (FENGEL; WEGENER, 1989).

A lignina é um polímero natural aromático complexo, que não é baseado em açúcar e ainda apresenta grandes desafios para ser utilizado como matéria-prima para o processo de fermentação microbiana para obtenção de bioprodutos de interesse para a sociedade. Esse biopolímero desempenha um papel fundamental na estrutura das plantas, conferindo rigidez e resistência mecânica aos tecidos vegetais (CARVALHO et al., 2010). Atua como uma "cola" que une as fibras de celulose e hemicelulose, fornecendo suporte estrutural. No entanto, a presença de lignina na biomassa lignocelulósica também apresenta desafios na sua conversão em produtos de valor, como a produção de biocombustíveis, uma vez que protege os polímeros contra os ataques microbianos e dificulta o acesso de enzimas hidrolíticas (DINIZ et al., 2024). É necessário desenvolver processos eficientes para quebrar a lignina e separá-la dos outros componentes da biomassa, a fim de maximizar a produção de produtos derivados da celulose e hemicelulose. Uma representação da disposição dessas três estruturas da biomassa é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Esquema geral da estrutura lignocelulósica. A celulose é organizada em feixes de fibras.



Fonte: Acervo pessoal.

Desta forma, considerando a recalcitrância da biomassa, para a produção de etanol 2G, essas estruturas precisam ser decompostas para liberar os açúcares fermentescíveis necessários para a fermentação. (MONTEIRO et al, 2016).

3.2 Pré-tratamentos da biomassa

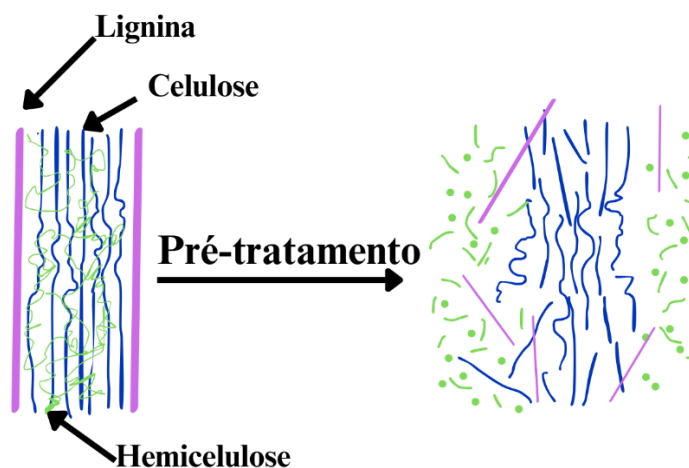
A estrutura do material lignocelulósico, que constitui a biomassa, foi desenvolvida evolutivamente para evitar a degradação por micro-organismos e animais (ZHAO et al., 2009). Essa estrutura apresenta diversos mecanismos de resistência à quebra de ligações químicas, tais como a presença da lignina, que atua como uma barreira física (SILVA et al, 2012). Além disso, os grupos acetil da hemicelulose alteram o reconhecimento catalítico das enzimas hidrolíticas, diminuindo o rendimento da hidrólise. A cristalinidade da celulose também reduz sua área superficial, essencial para a ação das enzimas celulasas (ZHAO et al., 2009). Com base nessas características, a primeira etapa no processamento da biomassa envolve o pré-tratamento, que tem a função de solubilizar os açúcares presentes na hemicelulose e aumentar a acessibilidade da celulose para as enzimas hidrolíticas.

O pré-tratamento busca gerar sólidos digestíveis que melhoram os rendimentos de açúcar durante a hidrólise enzimática, reduzir subprodutos de açúcar, incluindo as pentoses

provenientes da hemicelulose, diminuir a formação de inibidores que possam prejudicar as etapas de fermentação, recuperar componentes de lignina e subprodutos de baixo valor agregado, além de reduzir os custos energéticos (BRODEUR et al., 2011).

Nas últimas décadas, diversas tecnologias de pré-tratamento foram desenvolvidas, as quais podem ser classificadas em pré-tratamentos biológicos, físicos, químicos e físico-químicos. A combinação desses métodos também tem sido estudada (ALVIRA et al., 2020). A Figura 3 ilustra o que ocorre com a matéria prima após o pré-tratamento.

Figura 3 - Estrutura da biomassa lignocelulósica antes e após o pré-tratamento.



Fonte: Adaptado de MOSIER (2005).

Na literatura, o pré-tratamento ácido é o mais estudado. No pré-tratamento ácido, ácidos diluídos ou concentrados, como ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorídrico (HCl) ou ácido fosfórico (H_3PO_4), são usados para quebrar as ligações químicas da biomassa. O ácido remove a hemicelulose, convertendo-a em açúcares fermentescíveis, enquanto a celulose e a lignina são preservadas. O pré-tratamento ácido pode melhorar a acessibilidade da celulose às enzimas, mas altas concentrações de ácido podem levar à formação de subprodutos tóxicos que inibem a fermentação posterior (BEHERA et al., 2014).

Na indústria de etanol 2G, diferentes pré-tratamentos são utilizados para viabilizar a conversão da biomassa lignocelulósica, sendo os processos hidrotérmico (autohidrólise) e por explosão a vapor amplamente estudados, embora possuam mecanismos distintos de atuação (RUIZ, 2015). O pré-tratamento hidrotérmico, também conhecido como autohidrólise, utiliza

apenas água em alta temperatura (geralmente entre 160 °C e 220 °C) e alta pressão para despolimerizar a hemicelulose e preservar a celulose. Além de ser ambientalmente amigável, o processo não requer o uso de ácidos ou reagentes corrosivos, reduzindo custos associados ao uso de reatores resistentes à corrosão. Os produtos resultantes, como xilooligossacarídeos e substratos para produção de bioetanol, têm alto valor agregado, integrando o ciclo completo de aproveitamento da biomassa lignocelulósica (RUIZ, 2015).

Por outro lado, o pré-tratamento por explosão a vapor é considerado uma das principais alternativas para a produção de etanol 2G (BALLESTEROS et al., 2006). Esse processo se diferencia do hidrotérmico por envolver uma rápida descompressão após a exposição da biomassa ao vapor d'água saturado sob alta pressão. Esse alívio súbito de pressão promove uma ruptura mecânica da estrutura lignocelulósica, aumentando a acessibilidade da celulose às enzimas sem gerar grandes quantidades de subprodutos inibidores (LU et al., 2021). Como resultado, a biomassa se torna mais suscetível à hidrólise enzimática, tornando esse método um dos mais promissores para pré-tratamento. No entanto, sua aplicação exige equipamentos robustos e consumo energético elevado devido às altas pressões envolvidas (KUMAR et al., 2011).

O pré-tratamento alcalino envolve o uso de bases, como hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), para quebrar a estrutura da lignina e melhorar a acessibilidade da celulose e hemicelulose às enzimas. O pré-tratamento alcalino pode resultar em maior extração de lignina e remoção parcial da hemicelulose, tornando a celulose mais disponível para a hidrólise enzimática. No entanto, altas concentrações de bases alcalinas podem causar degradação da celulose e perda de açúcares fermentáveis, conforme citado por Kumar et al. (2011) e Sun (2021).

3.3 Hidrólise enzimática e fermentação da biomassa

A hidrólise enzimática é uma etapa crítica do processo de produção de etanol 2G. A ação das enzimas na celulose e hemicelulose resulta nos açúcares fermentescíveis que posteriormente são transformados em etanol (MAITAN-ALFENAS et al, 2015). Esta envolve diferentes enzimas hidrolíticas: celulasas, xilanases, β -glucosidases, β -xilosidases e enzimas acessórias (VILELA, 2013). Cada uma desempenhando a sua função específica na degradação dos polímeros e, assim, no aumento da eficiência da conversão de biomassa em açúcar.

As celulases são um conjunto de enzimas responsáveis pela degradação da celulose, o polissacarídeo mais abundante nas plantas. Elas são classificadas em três tipos principais: as endoglucanases, que quebram ligações glicosídicas β ,1-4 internas na cadeia de celulose, as exoglucanases, que removem unidades de celobiose nas extremidades das cadeias de celulose, e as β -glicosidases, que convertem a celobiose em glicose, um monossacarídeo facilmente fermentescível (MAITAN-ALFENAS et al, 2015). A celulose é composta por cadeias de glicose, e sua hidrólise resulta principalmente na liberação de glicose. O custo das enzimas varia bastante a depender da sua concentração e quantidade, mas a celulase pode ser encontrada a 1 kg com 10000u/g por R\$ 465,00 (CELULLASE, [s.d.]

As xilanases são enzimas que atuam sobre a hemicelulose, em especial na xilana, que é um polissacarídeo formado por unidades de xilose. A hemicelulose é mais heterogênea que a celulose, exigindo um conjunto diversificado de enzimas para sua completa degradação. As xilanases quebram as ligações glicosídicas entre as unidades de xilose, enquanto as β -xilosidases liberam xilose a partir dos oligossacarídeos produzidos (VAN DEN BRINK & DE VRIES, 2011). Essa enzima pode ser encontrada a 1 kg com 22000u/g por R\$ 471,29 (ENZIMA XILANASE, [s.d.]

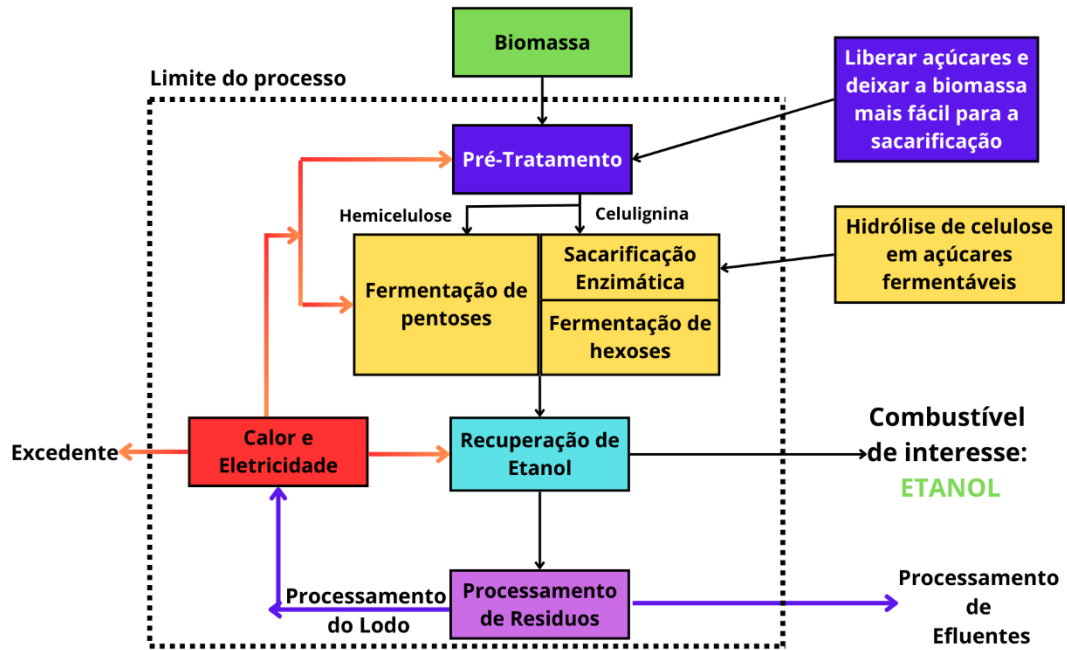
Além das celulases e xilanases, as enzimas acessórias, como arabinofuranosidases, acetilxilano esterases e ferulato esterases, desempenham papéis cruciais ao remover cadeias laterais e grupos funcionais da hemicelulose e da celulose (SOUZA; 2006). Essas enzimas facilitam o acesso das principais enzimas ao núcleo da biomassa, acelerando a degradação e a conversão em açúcares fermentescíveis (MAITAN-ALFENAS et al, 2015).

As enzimas utilizadas no processo de hidrólise enzimática da biomassa lignocelulósica são frequentemente derivadas de fungos filamentosos, como *Trichoderma reesei* e *Aspergillus niger*. Esses fungos são amplamente reconhecidos por sua alta capacidade de produzir enzimas celulolíticas em larga escala, essenciais para a conversão de celulose em açúcares fermentáveis. No entanto, a produção dessas enzimas requer etapas de purificação e otimização para aumentar sua eficiência, o que resulta em custos elevados e representa um dos principais desafios econômicos para a viabilização industrial do processo (FLORENCIO; BADINO; FARINAS, 2017).

Durante o processo, hexoses como a glicose e pentoses como a xilose são liberadas. As hexoses são fermentadas eficientemente por leveduras como *Saccharomyces cerevisiae* (SUN, Y.; CHENG, J. 2002). Na etapa final do processamento, o etanol é recuperado por meio da destilação. Após essa etapa, o efluente gerado contém uma fração sólida rica em lignina, a qual

pode ser aproveitada para a geração de vapor ao ser queimada (KUMAR et al., 2011). Uma representação simplificada desse fluxo de etapas é ilustrada no esquema mostrado na figura 4.

Figura 4 - Etapas de processamento de biomassa lignocelulósica.



Fonte: Adaptado de Wyman (2007).

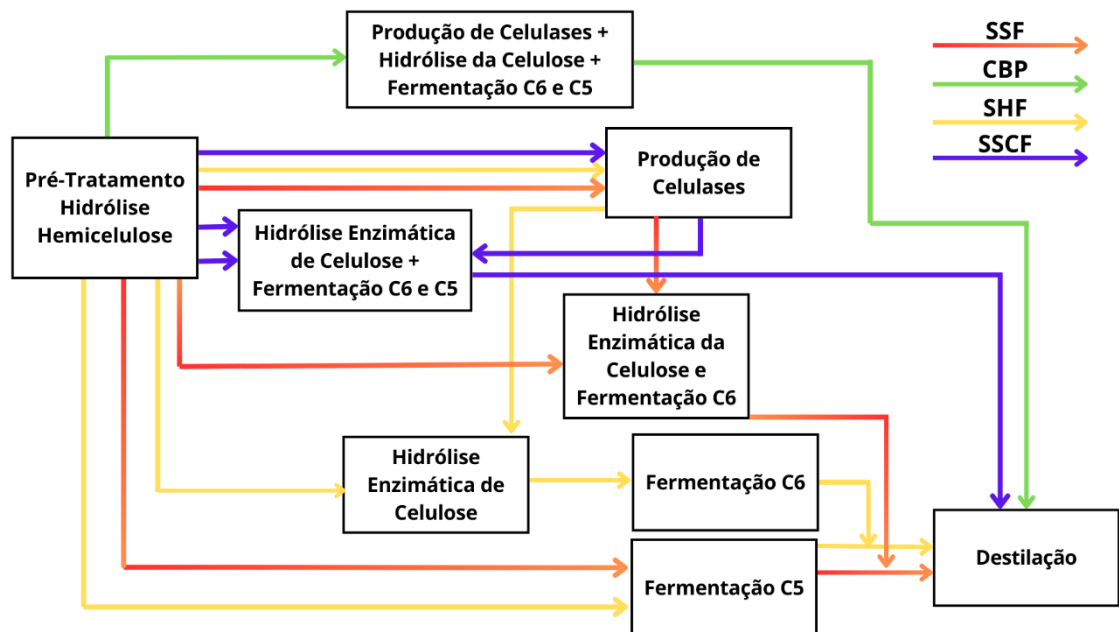
A fermentação das pentoses para a produção de etanol de 2G ainda enfrenta desafios técnicos devido à dificuldade de metabolização desses açúcares por leveduras industriais convencionais. Estudos têm explorado o uso de microrganismos como *Pichia membranifaciens* e *Pichia kudriavzevii*, que demonstram capacidade de fermentação de pentoses e resistência a temperaturas elevadas, tornando-se alternativas promissoras para a conversão eficiente da biomassa lignocelulósica em etanol. A adaptação dessas leveduras a diferentes condições de cultivo e o uso de pré-tratamentos adequados, como explosão a vapor catalisada com ácido, favorecem a obtenção de açúcares fermentáveis e aumentam o rendimento do processo (SILVA, 2020). Diversos fatores impactam diretamente o custo final da produção de etanol de segunda geração, incluindo o tipo de biomassa utilizada, o pré-tratamento empregado, o custo das enzimas, o rendimento da hidrólise enzimática e a estratégia do bioprocessamento. A biomassa escolhida influencia significativamente a eficiência do pré-tratamento, que pode facilitar ou dificultar a sacarificação enzimática e, conseqüentemente, afetar a produtividade e o

rendimento da fermentação. Esse impacto ocorre devido à concentração de açúcares disponíveis e à presença de inibidores, que podem reduzir a atividade microbiana e comprometer a eficiência da conversão para etanol (ALVES, 2023).

Um fator determinante para reduzir o custo de produção do etanol é o aproveitamento integral dos açúcares presentes na biomassa, incluindo hexoses e pentoses. Estudos indicam que a eficiência na fermentação de pentoses pode impactar significativamente o custo final do etanol (AGUILAR et al., 2002).

A eficiência da conversão de biomassa em etanol depende de uma série de etapas interconectadas, sendo a hidrólise enzimática e a fermentação processos críticos. A Figura 5 apresenta de forma simplificada uma compilação de diferentes conformações de processo para a produção de etanol 2G, onde C5 e C6 são respectivamente pentoses e hexoses.

Figura 5 – Possíveis configurações de processo utilizadas para a produção de etanol 2G.



Fonte: Acervo pessoal.

3.5 Atual cenário do etanol 2G no Brasil

O Brasil, nos últimos anos, tem se destacado como um dos principais produtores de etanol 2G no cenário global, apesar de ainda ser pouco representativo em relação à produção de etanol 1G. Segundo projeções da UDOP (2024), a produção de etanol 2G no Brasil foi de 300 milhões de litros em 2023, com expectativas de atingir 5 bilhões de litros anuais até 2025. Para isso, diversas plantas de produção estão em processo de criação para alcançar esse patamar, como a Raízen, que, em maio de 2024, inaugurou a maior planta de etanol 2G do mundo, com capacidade de produção de 82 milhões de litros por ano (UDOP, 2024). A Raízen emerge como um dos principais produtores de etanol 2G no Brasil. Projetos futuros da Raízen incluem a expansão das unidades de produção, com previsões de alcançar uma capacidade total de aproximadamente 440 milhões de litros por ano até a safra de 2025/26 (BNDES, 2025). Além disso, a empresa firmou um acordo com a Shell para a venda de etanol 2G até 2037, com um volume de vendas esperado de 3,3 bilhões de litros, sublinhando a forte demanda internacional, particularmente da Europa, por essa solução sustentável de bioenergia (VIRI, 2024).

Globalmente, a produção de etanol do Brasil em 2023 alcançou um volume recorde, consolidando-se como destaque no mercado global de bioenergia. Em termos de exportação, embora os Estados Unidos permaneçam liderando as exportações globais de etanol, o Brasil se posiciona como um importante exportador, como mostrado na Tabela 1 em bilhões de litros, especialmente considerando que quase todas as importações de etanol nos EUA provêm do Brasil.

Este panorama reflete a importância crescente do etanol 2G como um componente-chave na transição energética global, promovendo uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis e apoiando os esforços de descarbonização em várias indústrias. No caso do Brasil, como ilustrado na Tabela 1, observa-se um grande avanço na produção de etanol, com o país passando de 28 bilhões de litros em 2022 para 31,2 bilhões de litros em 2023, aumentando sua participação de 26,22% para 27,95%.

Os dados de produção de etanol no Brasil vêm crescendo gradualmente ano a ano, conforme mostrado na Tabela 2, acompanhados por uma variação significativa no valor desse produto. Desde 2015, observa-se um crescimento constante, com um ápice em 2022, quando o valor atingiu 716,72 US\$/m³. Esse cenário, aliado ao grande volume de produção, reforça a importância comercial do etanol para o Brasil.

Tabela 1- Produção mundial de Etanol de 2019 a 2023

Região	2019	2020	2021	2022	2023	Produção Mundial (%)
Estados Unidos	59,7	52,8	56,8	58,1	59,1	52,77%
Brasil	33,5	30,7	27,7	28,0	31,3	27,95%
União Europeia	5,2	5,0	5,3	5,5	5,5	4,91%
Índia	1,9	2,0	3,3	4,7	5,4	4,82%
China	3,9	3,6	3,4	3,5	3,6	3,21%
Canadá	1,9	1,6	1,6	1,7	1,7	1,52%
Tailândia	1,6	1,5	1,3	1,4	1,4	1,25%
Argentina	1,1	0,8	1,0	1,2	1,1	0,98%
Resto do Mundo	2,4	2,3	2,6	2,7	2,9	2,59%
Total	111	100	103	107	112	

Fonte: Renewable Fuels Association (2024).

Tabela 2 - Exportações Brasileiras Anuais de Etanol

Ano	US\$ Milhões F.O.B.	Metros Cúbicos (Em Milhares)	Preço Médio US\$/m³
2013	1.869	2.917	640,8
2014	898	1.398	642,41
2015	880	1.867	471,55
2016	896	1.789	501,02
2017	807	1.380	584,61
2018	891	1.682	529,72
2019	994	1.933	514,35
2020	1.201	2.695	445,57
2021	1.061	1.948	544,69
2022	1.758	2.453	716,72

Ano	US\$ Milhões F.O.B.	Metros Cúbicos (Em Milhares)	Preço Médio US\$/m³
2023	1.605	2.519	637,17
2023 - Jan-Mar	411	579	709,43
2024 - Jan-Mar	354	640	554,1

Fonte: Brasil (Base de Dados Comex Stat), 2025 - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

3.6 Sustentabilidade do etanol 2G

O etanol de 2G é amplamente promovido como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis devido aos motivos já mencionados neste trabalho e ao seu potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, a avaliação completa de seus impactos ambientais, incluindo o potencial de aquecimento global (GWP), exige uma análise detalhada do ciclo de vida (ACV). Diversos estudos exploram o GWP associado à produção de etanol 2G, utilizando dados de ACV para destacar as contribuições específicas de diferentes práticas agrícolas e insumos.

Buitrago e Belalcázar (2013) exemplificam como o GWP pode variar significativamente em função das práticas de cultivo e dos insumos utilizados. Especificamente, a produção de fertilizantes e a queima pré-colheita de cana-de-açúcar são identificadas como as maiores fontes de emissões de CO₂ equivalente (CO₂eq). A queima libera metano (CH₄) e monóxido de carbono (CO), ambos contribuindo para o GWP. Além disso, a aplicação de fertilizantes, especialmente ureia, é uma fonte substancial de óxido nitroso (N₂O), um gás com um potencial de aquecimento global significativamente mais alto que o CO₂ (BUITRAGO; BELALCÁZAR, 2013).

O estudo de Buitrago Tello (2014) destaca que a produção de fertilizantes representa 28% das emissões de CO₂eq, enquanto a queima pré-colheita contribui com 15%, devido às emissões de CH₄ e CO provenientes da queima da biomassa. Outro fator importante é o uso de fertilizantes nitrogenados no cultivo da cana-de-açúcar. O uso de ureia, por exemplo, é uma das principais fontes de emissões de N₂O, que possui um potencial de aquecimento global aproximadamente 300 vezes maior do que o CO₂. A otimização do uso de fertilizantes, juntamente com práticas agrícolas mais sustentáveis, pode reduzir significativamente as emissões associadas ao cultivo da cana. Além disso, a gestão eficiente de subprodutos

lignocelulósicos e o uso de bioeletricidade são estratégias eficazes para diminuir os impactos ambientais da produção de etanol 2G.

Outro estudo, apresentado por Muñoz (2014), considerando a ACV de etanol com 95% de água e 5% de etanol para a análise, resultou em emissões de 0,7 a 1,5 kg de CO₂ por kg de etanol ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Quando consideradas as emissões decorrentes da degradação ambiental, esse número aumenta para 1,3 a 2 kg de CO₂ por kg de etanol.

A produção de etanol 2G tem o potencial de reduzir o GWP em comparação com os combustíveis fósseis. No entanto, essa redução é altamente dependente de variáveis locais e processuais específicas. A ACV é uma ferramenta essencial para compreender essas variabilidades e otimizar a produção de biocombustíveis, considerando tanto o GWP quanto outros impactos ambientais críticos (BUITRAGO; BELALCÁZAR, 2013).

4. METODOLOGIA

O presente trabalho adota uma abordagem qualitativa e de caráter exploratório, baseada em revisão de literatura, com o objetivo de reunir, sintetizar e analisar estudos existentes sobre os fatores que influenciam a eficiência e viabilidade do processo de produção de etanol 2G. A coleta de dados foi realizada majoritariamente por meio das bases de dados Google Acadêmico, *Web of Science e Scopus*, visando uma ampla cobertura de publicações relevantes e de alta qualidade acadêmica. Foram incluídos, principalmente, artigos científicos, teses e livros. Para garantir a atualidade das informações, foram priorizados os trabalhos publicados nos últimos cinco anos. As publicações selecionadas estavam nos idiomas português, inglês e espanhol, permitindo, assim, uma análise abrangente que contempla estudos nacionais e internacionais.

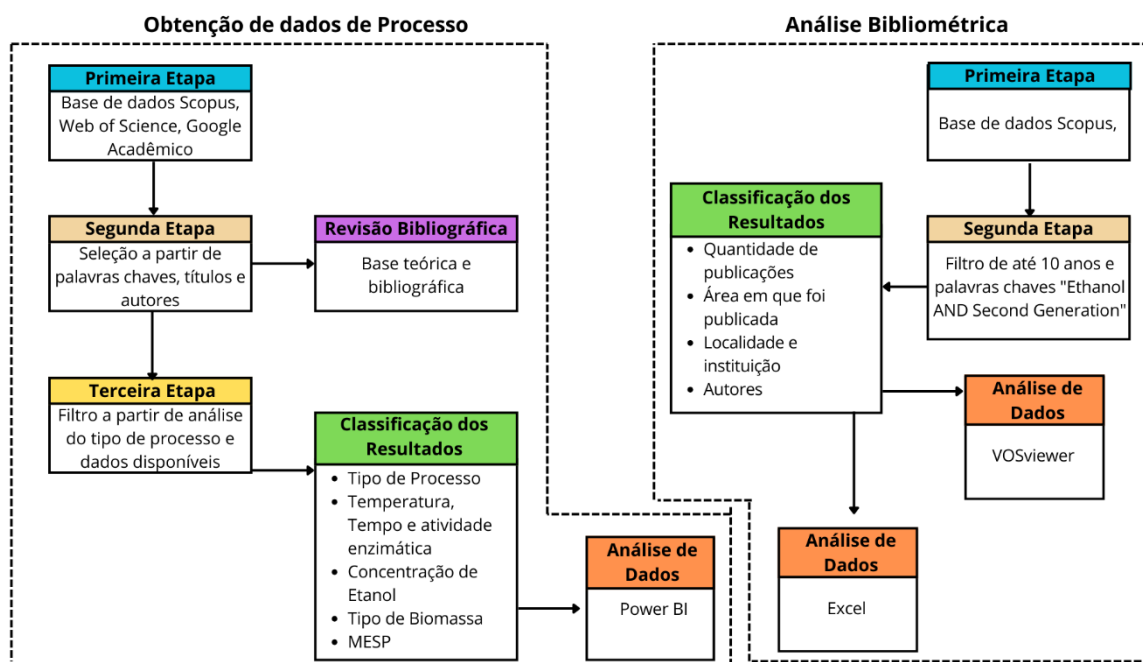
4.1 Análise e interpretação dos dados

Os dados foram avaliados por meio de gráficos de tendência e tabelas comparativas geradas no Microsoft Power BI Desktop (versão 2.138.1004.0), possibilitando uma melhor análise das relações entre parâmetros de processos, como temperatura e tempo de fermentação, tipo de processo e concentração de enzimas, além do preço mínimo de venda do etanol (MESP) e da concentração de etanol gerado após a fermentação.

4.2 Análise bibliométrica e de parâmetros de etanol 2G

Os dados da análise bibliométrica foram obtidos por meio de uma busca por artigos relacionados ao etanol 2G, coletados na base de dados Scopus, entre os anos de 2015 e 25 de outubro de 2024. Para as pesquisas, foram utilizadas as palavras-chave “*second generation*” AND “*ethanol*”, com o auxílio do software VOSviewer® (versão 1.6.20). Na Figura 6, é apresentado um fluxograma das etapas seguidas para a elaboração dessas análises.

Figura 6 - Fluxograma das etapas seguidas para elaboração do trabalho.



Fonte: Acervo pessoal.

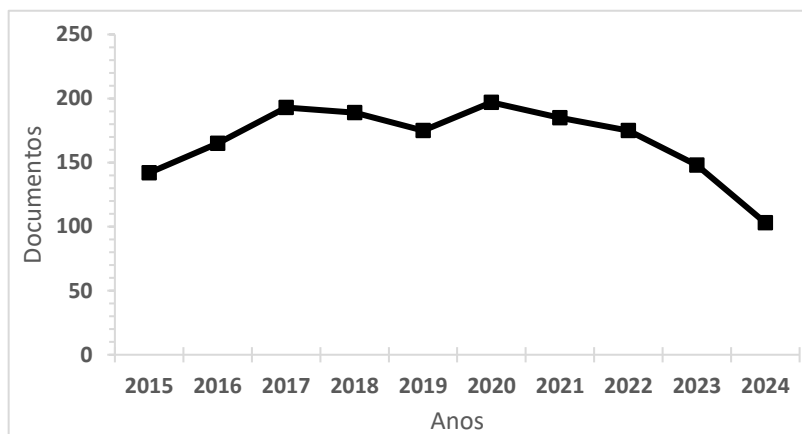
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise bibliométrica

Primeiramente, foi realizado um levantamento de dados bibliométricos para uma maior compreensão do tema abordado no presente trabalho. Ao analisar a evolução das publicações sobre etanol 2G, observa-se uma redução no número de estudos nos últimos quatro anos (Figura 7). Essa tendência pode ser atribuída aos desafios técnicos e econômicos ainda enfrentados na produção industrial desse biocombustível, incluindo a complexidade dos processos de conversão da biomassa lignocelulósica e os elevados custos de produção (GARCEZ, 2024). Esses obstáculos provavelmente motivaram os pesquisadores a buscar outras alternativas para

o uso da biomassa, em vez de explorar a superação dessas barreiras, como por exemplo a produção de produtos de maior valor agregado, como químicos de plataforma.

Figura 7 - Evolução nas publicações sobre Etanol 2G com o passar dos anos



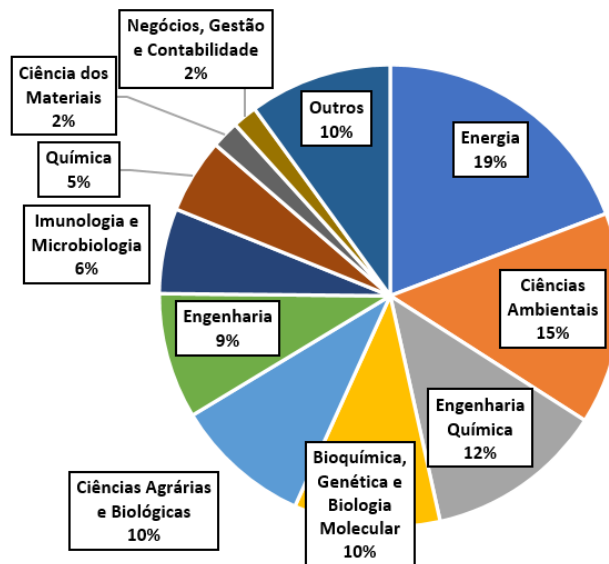
Fonte: Acervo pessoal.

A pesquisa sobre etanol 2G é multidisciplinar e inclui áreas de especialização como engenharia química, ciência ambiental, ciência biomédica, ciência de materiais e ciência agrícola. A Figura 8 destaca a predominância das áreas de energia, ciências ambientais e engenharia química na literatura relacionada a este tema, evidenciando a abrangência e a complexidade deste campo de pesquisa. Por exemplo, no campo da engenharia química, muitos estudos concentram-se na otimização dos processos de produção e no aumento da eficiência das tecnologias de conversão de biomassa, (BAEYENS et al., 2015; BEZERRA; RAGAUSKAS, 2016; MOHSENZADEH; 2017; SHARMA; 2020). Na ciência ambiental, a sustentabilidade da produção de etanol 2G é avaliada considerando fatores como emissões de gases de efeito estufa (GEE), uso de recursos naturais e impacto ambiental. Estudos indicam que o etanol 2G pode reduzir significativamente as emissões de GEE em comparação com combustíveis fósseis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (JULIANI, 2013).

Além de sua natureza multidisciplinar, a pesquisa sobre etanol 2G é relevante em diferentes regiões do mundo, com contribuições notáveis do Brasil, Índia, Estados Unidos, China e Espanha (Figuras 9-a e 9-b). As principais instituições que pesquisam o tema estão, em grande parte, localizadas no Brasil, como a Universidade Federal de São Carlos e a Universidade de São Paulo, que possuem uma grande quantidade de publicações. Outras instituições de destaque incluem a Technical University of Denmark, o Centre National de la

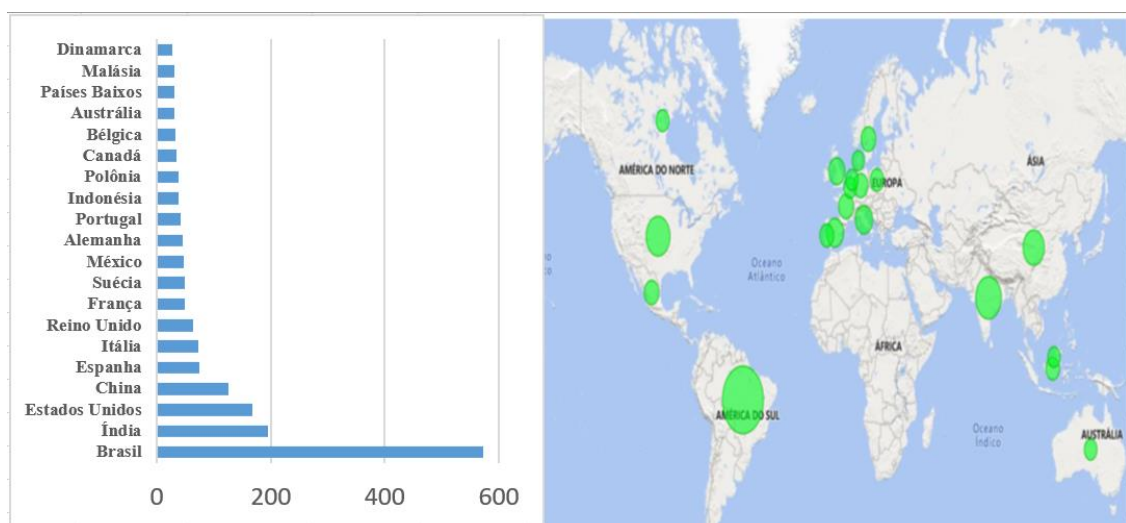
Recherche Scientifique, a University of Illinois Urbana-Champaign e a Beijing University of Chemical Technology (Figura 10).

Figura 8 - Segmentação por área de pesquisa sobre etanol 2G segundo a base de dados Scopus.



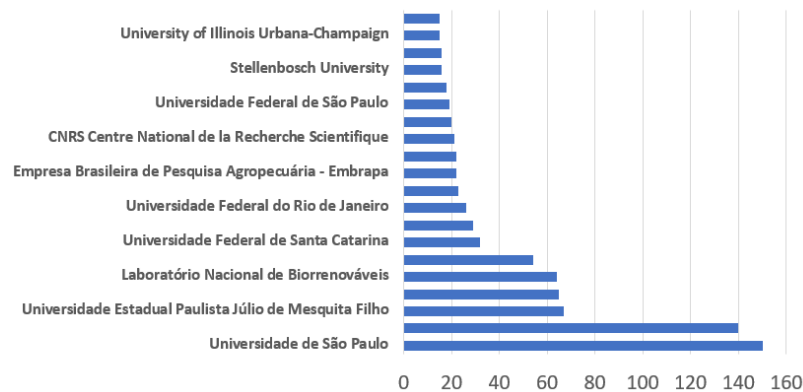
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 9 - Países com expressivas produções científicas sobre etanol 2G, de acordo com a base de dados Scopus. a) Visão quantitativa; b) representação geográfica.



Fonte: Acervo pessoal.

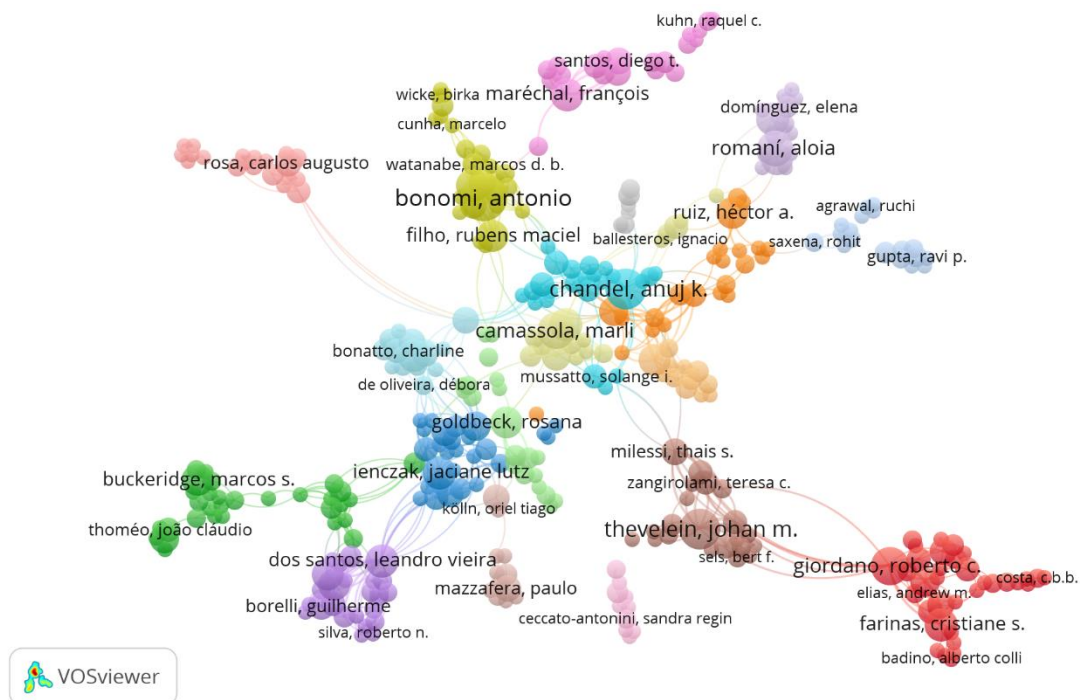
Figura 10 - Principais instituições que desenvolvem pesquisa e inovação sobre o tema etanol 2G, segundo a base de dados *Scopus*.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 11, são apresentados os autores mais relevantes no campo do etanol 2G, segundo a base *Scopus*, agrupados de acordo com as citações de seus trabalhos, formando clusters que representam grupos colaborativos, dos quais Anuj K. Chandel, Jaciane L. Ienczak e Antônio Bonomi, se destacam com 24, 20 e 20 trabalhos publicados, respectivamente.

Figura 11- Autores mais relevantes no campo de etanol 2G agrupados pelo software VOSviewer, quanto maior o círculo, maior a produtividade do autor, os clusters de mesma cor, representam grupo de pesquisadores colaborativos.



Fonte: Dados gerados em VOSViewer.

5.2 Parâmetros e análises de produção de etanol 2G

Com base na revisão bibliográfica, foram selecionados os principais parâmetros que influenciam diretamente o processo de produção de etanol 2G. Esses parâmetros são cruciais para avaliar e otimizar a eficiência do processo, garantindo sua viabilidade em escala industrial. O tipo de biomassa é um dos fatores mais relevantes, pois a composição química e a estrutura física variam amplamente entre diferentes materiais lignocelulósicos, impactando diretamente a eficiência da conversão. A concentração de etanol produzida, medida em g/L, reflete o rendimento final do processo e está diretamente relacionada à sua viabilidade econômica pois quanto maior a concentração, menor os gastos na etapa de destilação. A atividade enzimática da Celulase, frequentemente expressa em FPU/g, é outro parâmetro essencial, pois avalia a capacidade da enzima de degradar a celulose em açúcares fermentáveis.

O tempo, medido em horas, foi considerado exclusivamente para a etapa de hidrólise em processos onde ocorre separadamente da sacarificação. Nos processos em que a sacarificação e a fermentação ocorrem de forma simultânea, foi considerada a temperatura específica dessa etapa. A temperatura, expressa em graus Celsius, também é um fator determinante para a otimização da atividade enzimática e para o aumento da eficiência geral do processo. Além disso, a conversão da biomassa, representada em porcentagem, refere-se à eficiência da transformação inicial do material lignocelulósico em açúcares fermentáveis, etapa fundamental para a subsequente fermentação.

É importante destacar que as figuras subsequentes desconsideraram dados reportados no formato UI/g para a atividade enzimática. Tal decisão foi tomada devido à inconsistência de fatores de conversão encontrados na literatura para essa parametrização, além de trabalhos como os de John (2024), Cheng et al. (2014) e Lu et al. (2021), entre outros, utilizarem escalas diferentes, o que poderia afetar a uniformidade da análise. Contudo, esses dados foram considerados na discussão, a fim de ampliar o entendimento sobre as possíveis variações de resultados e sua relevância no contexto geral do processo

Tabela 3- Resultados dos Parâmetros de Hidrólise Enzimática e Eficiência de Conversão em etanol a partir de Diferentes Biomassas para Produção de Etanol

Tipo de Processo	Tipo de Biomassa	Concentração de Etanol Produzida (g/L)	Atividade Enzimática (Celulase) (FPU/g ou UI/g)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Conversão da Biomassa (%)	Referência
SHF	Álamo	35,0	35 FPU/g	48	50	91,36%	Xu et al., 2024
SHF	Alcaçuz	8,2	294,36 U/g	24	55	81,06%	Chang et al., 2024
SSF	Algas marinhas	14,9	15 FPU/g	24	35	71,37%	González-Gloria et al., 2023
SSF	<i>Arundodonax</i> (cana-do-reino)	29,2	30 FPU/g	72	45	58,90%	Silva et al, 2015
-	Bagaço de agave	55,0	20 FPU/g	72	50	87,56%	Aguilar et al., 2018
SHF	Bagaço de Cana-de-açúcar	14,1	35 U/g	48	50	39,07%	Wilson et al., 2021
SSF	Bagaço de Cana-de-Açúcar	4,3	70 FPU/g	72	55	62,75%	Srimachai et al, 2014
SSF	Bagaço de Cana-de-açúcar	58,0	40 FPU/g	78	30	75,00%	Paschos et al., 2015
SSF	Bagaço de Cana-de-açúcar	73,4	20 FPU/g	72	42	78,00%	Saini et al., 2023
SHF	Bagaço de Cana-de-açúcar	23,4	10 FPU/g	120	50	78,47%	De Albuquerque et al., 2013
BPC	Bagaço de Cana-de-açúcar	28,0	7,5 FPU/g	72	37	86,50%	Arnthong et al., 2024

Tipo de Processo	Tipo de Biomassa	Concentração de Etanol Produzida (g/L)	Atividade Enzimática (Celulase) (FPU/g ou UI/g)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Conversão da Biomassa (%)	Referência
SHF	Bagaço de Cana-de-açúcar	22,1	30 FPU/g	72	50	93,00%	Ramiya e Krishnan, 2020
SSF	Bagaço de Cana-de-açúcar	18,8	20 FPU/g	96	40	93,36%	Huang et al., 2015
SSF	Bagaço de Cana-de-açúcar	4,9	100 U/g	48	39	-	Jugwanth et al., 2020
SSF	Bagaço de Cana-de-açúcar	65,4	25 FPU/g	120	35	-	Khajeeram et al., 2017
-	Bagaço de grãos de cerveja	14,8	42,0 U/g	18	50	-	Yohannan et al., 2010
SHF	Bagaço de sorgo doce	24,6	15 FPU/g	72	42	55,00%	Tinôco et al., 2021
SSF	Brotos de videira	13,3	20 FPU/g	48	-	67,40%	Dávila et al., 2019
SHF	Casca de arroz	23,4	736,92 U/mg	72	50	-	John et al., 2024
SHF	Casca de trigo	24,3	736,92 U/mg	72	50	-	John et al., 2024
SHF	Cedro Japonês	50,0	180 FPU/g	120	50	64,00%	Cheng et al, 2014 - Lu, J., et al, 2021
SSF	Farelo de trigo	5,0	10 FPU/g	48	35	-	Rajendran, 2016
SHF	Fibra de fruta de palma	33,8	2,5 FPU/g	20	42	62,00%	Seonghun Kim, 2018

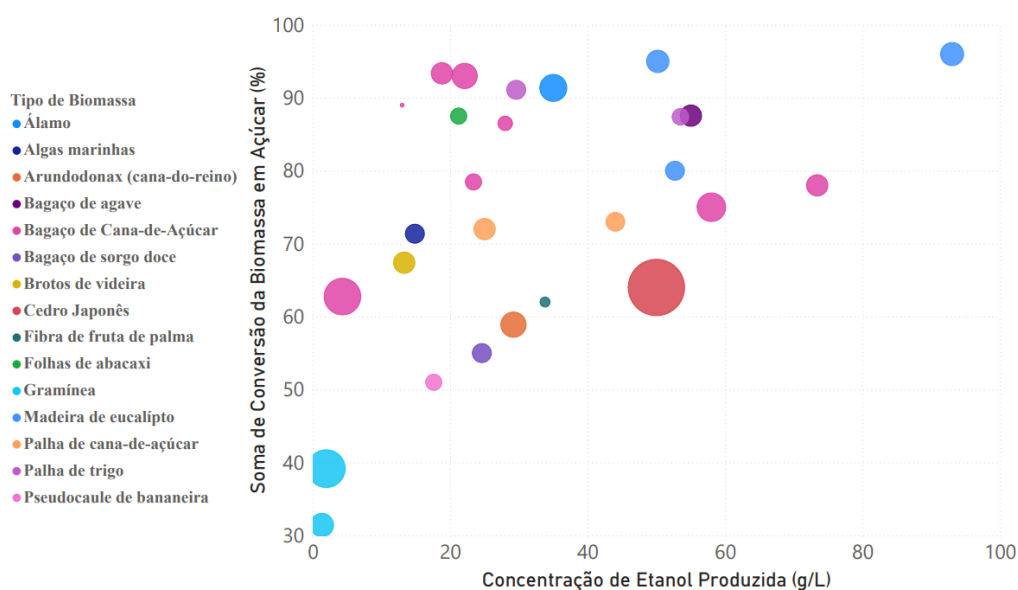
Tipo de Processo	Tipo de Biomassa	Concentração de Etanol Produzida (g/L)	Atividade Enzimática (Celulase) (FPU/g ou UI/g)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Conversão da Biomassa (%)	Referência
SHF	Folhas de abacaxi	21,2	10 FPU/g	72	50	87,50%	Mund et al., 2021
SHF	Gramínea	1,3	25 FPU/g	48	50	31,42%	Saini et al., 2022
SHF	Gramínea	2,0	75 FPU/g	48	50	39,16%	Saini et al., 2022
SSF	Madeira de eucalipto	52,7	15 FPU/g	48	35	80,00%	Domínguez, 2017
SSF	Madeira de eucalipto	50,2	22,5 FPU/g	72	35	95,00%	Romaní A, et al, 2014
SSF	Madeira de eucalipto	93,0	24,23 FPU/g	48	35	96,00%	Gomes et al., 2021
SHF	Palha de arroz	15,6	126 IU/g	120	50	-	Kaur et al., 2020
SSF	Palha de cana-de-açúcar	25,0	20 FPU/g	30	37	72,00%	Santos et al., 2012
SSF	Palha de cana-de-açúcar	44,0	14,5 FPU/g	57	40	73,00%	Pratto et al., 2020
-	Palha de milho	-	30 FPU/g	48	50	70,00%	Niu et al., 2024
SSF	Palha de trigo	-	15 FPU/g	72	42	80,00%	Ballesteros et al., 2006
SSCF	Palha de trigo	53,5	10,60 FPU/g	72	30	87,40%	Sun et al., 2021
SSF	Palha de trigo	29,6	15 FPU/g	144	37	91,10%	Sakdaronnarong et al, 2017
SHF	Pseudocaule de bananeira	17,6	10 FPU/g	76	50	51,00%	Legodi et al., 2021

Tipo de Processo	Tipo de Biomassa	Concentração de Etanol Produzida (g/L)	Atividade Enzimática (Celulase) (FPU/g ou UI/g)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Conversão da Biomassa (%)	Referência
SSF	Resíduos vegetais	30,0	114,53 U/g	72	30	92,00%	Pierotti et al., 2023
SSF	Resíduos vegetais	11,1	10 FPU/g	48	35	-	Rajendran et al., 2016
BPC	Bagaço de Cana-de-açúcar	13,0	0 FPU/g adicionadas	7	35	89,0%	Perez et al., 2023

Fonte: Acervo pessoal.

Os estudos referentes à tabela acima foram classificados e divididos em gráficos de dispersão e gráficos de radar. A Figura 12 é a primeira referente a essa massa de dados que será analisada, correlacionando parâmetros importantes como a variação na concentração de etanol, a biomassa utilizada, a conversão da biomassa e a concentração de celulase.

Figura 12 - Variação de concentração de etanol (g/l) por conversão da biomassa em açúcar (%) com a variação de tamanho pela concentração de celulase.



Fonte: Dados gerados em Power BI.

A produção de etanol a partir de diferentes fontes de biomassa apresenta variações consideráveis, influenciadas por fatores como a atividade enzimática, o tipo de biomassa e as condições experimentais. Os estudos utilizando o bagaço de agave, apesar de aplicarem uma atividade enzimática relativamente baixa (20 FPU/g), apresentam uma conversão de 87,56%. Esse resultado sugere que, embora a atividade enzimática seja limitada, o bagaço de agave é altamente susceptível à hidrólise enzimática, com eficiente liberação de açúcares fermentáveis, provavelmente devido a características específicas da biomassa ou a processos de pré-tratamento eficazes.

Já nos estudos com álamo, uma quantidade de enzima mais alta (35 FPU/g), proporcionou uma conversão de 91,36%, destacando-se entre as fontes estudadas. A combinação de uma boa atividade enzimática e características favoráveis da biomassa contribui para sua eficiência na produção de etanol. Isso reflete a importância tanto da quantidade de enzimas utilizadas quanto das propriedades físicas e químicas da biomassa para a conversão eficiente em açúcares. Já o cedro japonês, apesar da grande quantidade de celulase (180 FPU/g), apresenta uma concentração de etanol de apenas 50 g/L e 64% de conversão.

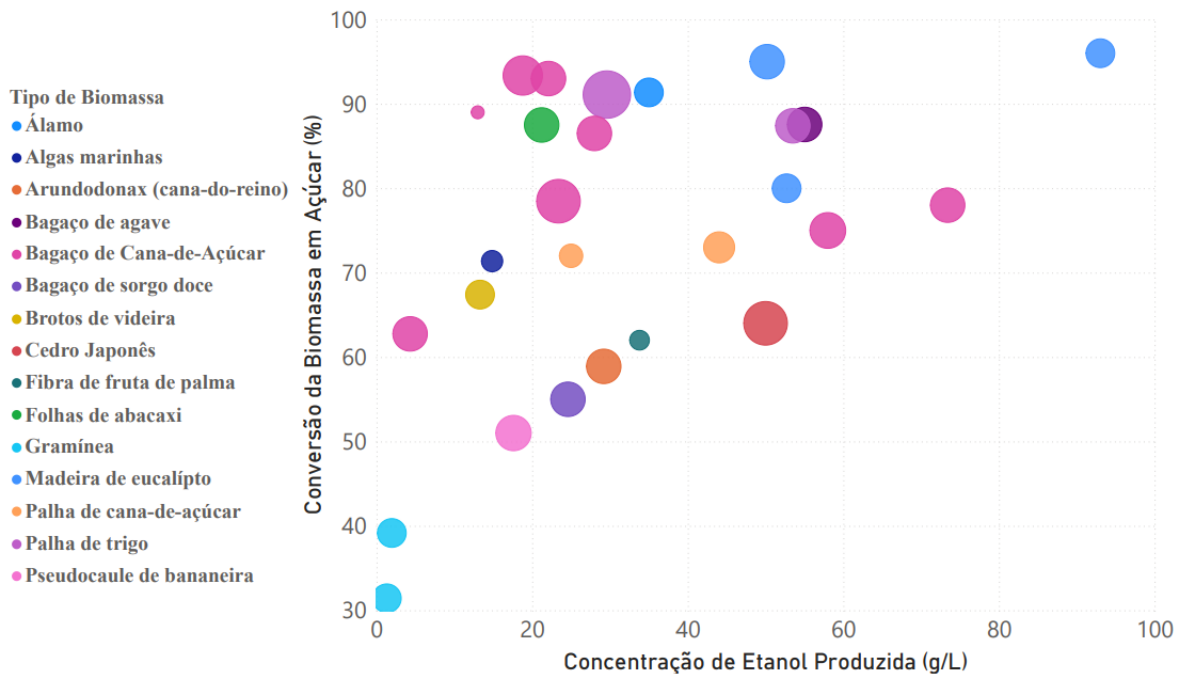
Em contraste, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta uma conversão mais variável, que oscila entre 39,07% e 78,47%. Essa variação pode ser explicada por diversos fatores, como o tipo específico de cana, os métodos de pré-tratamento utilizados e a atividade das enzimas utilizadas. A diferença nos resultados do bagaço de cana sugere que a biomassa de cana pode ser mais sensível a variações nos parâmetros do processo, tornando o controle das condições experimentais essencial para otimizar a conversão. A Figura 13 ilustra os mesmos parâmetros da Figura 12, porém com a variação de tamanho dos dados conforme o tempo da reação.

Nessa análise com a variação apenas do tamanho dos pontos pelo tempo revela *insights* importantes sobre a eficiência do processo de conversão. No gráfico, a concentração de etanol (g/L) aumenta conforme a conversão da biomassa em açúcar (em %), indicando uma correlação positiva entre essas duas variáveis. Isso sugere que, à medida que mais açúcar é gerado a partir da biomassa, maior é a quantidade de etanol produzido, o que é esperado, uma vez que o etanol é o produto final da fermentação dos açúcares.

Além disso, a variação no tamanho dos pontos de dispersão, que representa o tempo, mostra que, normalmente, quanto maior o tempo de reação, maior é a produção de etanol. Isso reflete a dinâmica do processo, em que a conversão continua ao longo do tempo, com a atividade enzimática e as reações de fermentação alcançando maiores rendimentos à medida

que o tempo de processamento aumenta. No entanto, é possível que o aumento do tempo também traga desafios, como a degradação de açúcares ou a diminuição da eficiência das enzimas, o que pode levar a uma desaceleração no aumento da concentração de etanol após certo ponto. Esses resultados indicam que, embora o aumento do tempo possa melhorar a conversão e a produção de etanol, existe uma relação complexa entre tempo, atividade enzimática e eficiência do processo, sendo necessário otimizar esses parâmetros para maximizar a produção de etanol sem comprometer a qualidade do produto ou a eficiência geral da conversão.

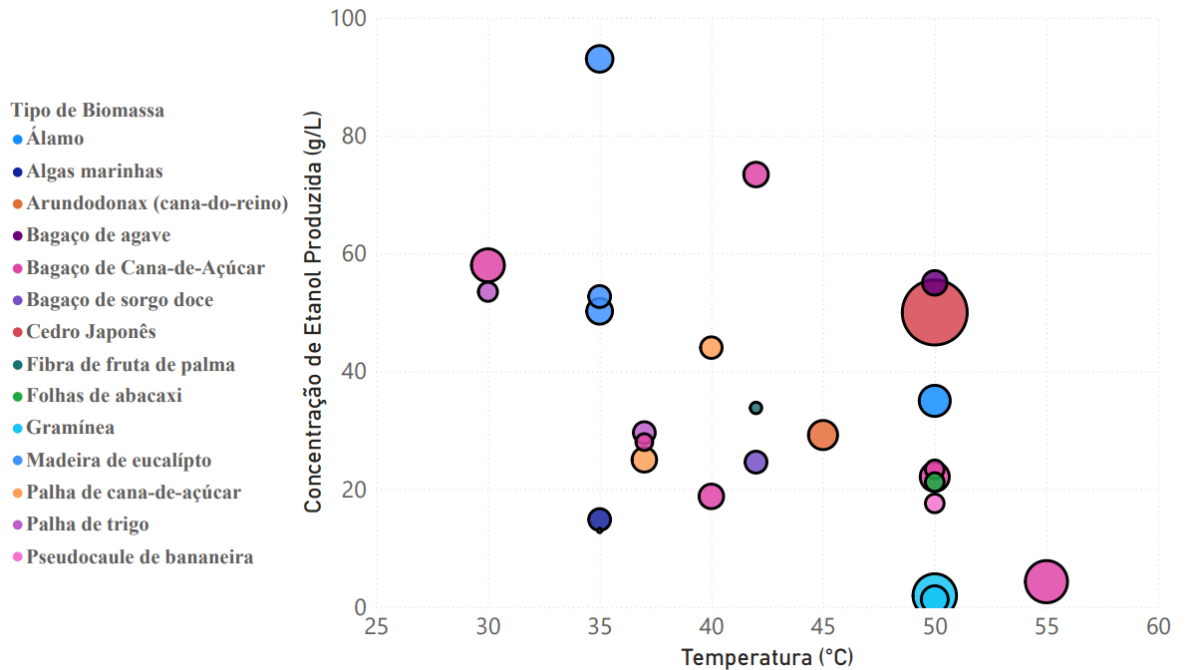
Figura 13- Variação de concentração de etanol (g/l) por conversão da biomassa em açúcar (%) com a variação de tamanho pelo tempo.



Fonte: Dados gerados em Power BI.

Após essas análises, ainda é válido avaliar a variação da concentração de etanol em função da temperatura e da atividade enzimática, como representado na Figura 14. Por fim, no modelo de gráfico de dispersão para esses dados, é possível observar a variação na concentração de etanol produzida em função da concentração de celulase e o impacto do tempo como mostra na Figura 15.

Figura 14- Variação de concentração de etanol (g/L), temperatura (°C) com a variação de tamanho pela atividade enzimática de celulase (FPU/g).



Fonte: Dados gerados em Power BI.

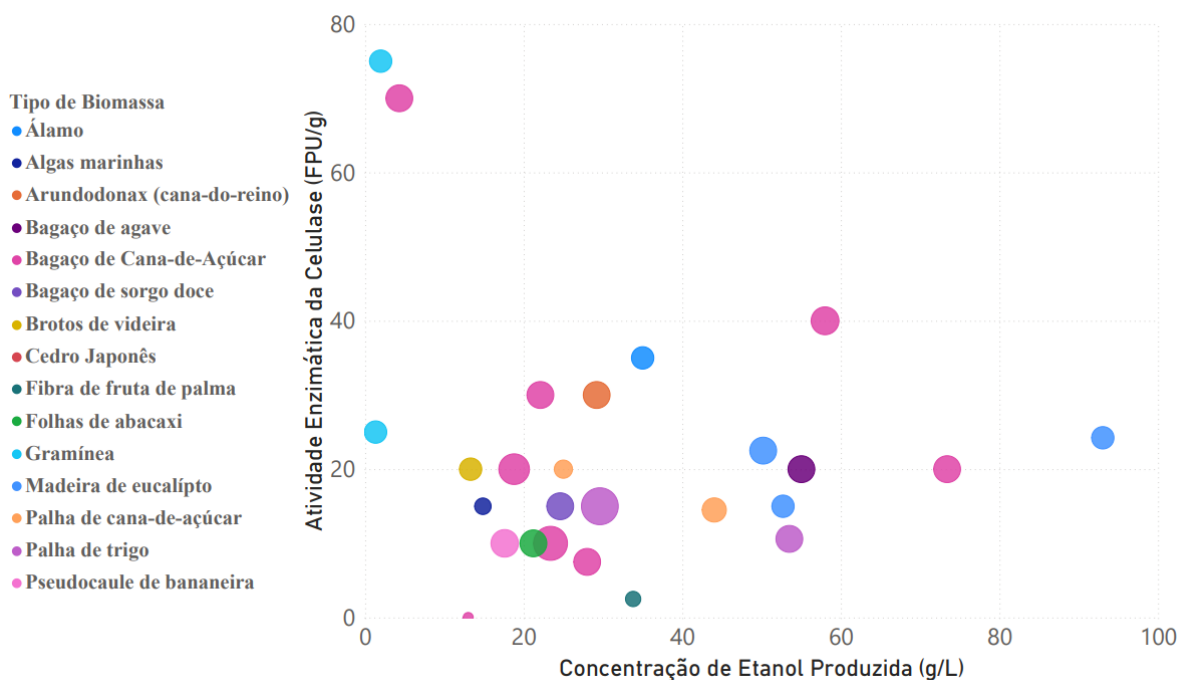
A Figura 14 mostra que a concentração de etanol tende a aumentar com o aumento da temperatura, o que é consistente com o comportamento esperado em processos enzimáticos. Isso ocorre porque temperaturas mais elevadas geralmente aceleram as reações químicas, incluindo a hidrólise enzimática dos polissacarídeos, resultando em maior disponibilidade de açúcares fermentáveis e, conseqüentemente, maior produção de etanol. No entanto, é necessário um controle mais rígido e o uso de agentes fermentadores mais resistentes para suportar temperaturas mais altas.

Entretanto, a variação no tamanho dos pontos, que representa a atividade enzimática de celulase, sugere que a eficiência da conversão está diretamente ligada à quantidade de enzima presente no processo. Acelerações na produção de etanol com o aumento da temperatura podem ser observadas especialmente quando há uma alta atividade enzimática. Isso implica que, para temperaturas mais altas, uma maior quantidade de celulase pode ser crucial para otimizar a hidrólise da biomassa e garantir que a produção de etanol não seja limitada pela disponibilidade de enzimas.

Por outro lado, temperaturas muito elevadas podem comprometer a atividade das enzimas, especialmente em processos que exigem condições específicas para preservar a

eficácia das proteínas (SOARES, 2023). Nesse sentido, a atividade enzimática de celulase (FPU/g) parece ser um fator-chave para maximizar a eficiência do processo em diferentes temperaturas. Isso sugere que, além de considerar a temperatura ideal para a reação, também é necessário controlar a dosagem de celulase para garantir que a produção de etanol seja otimizada, sem que a enzima perca sua atividade devido ao excesso de calor.

Figura 15- Variação de concentração de etanol (g/l) pela atividade enzimática da Celulase com a variação do tamanho pelo tempo (h).



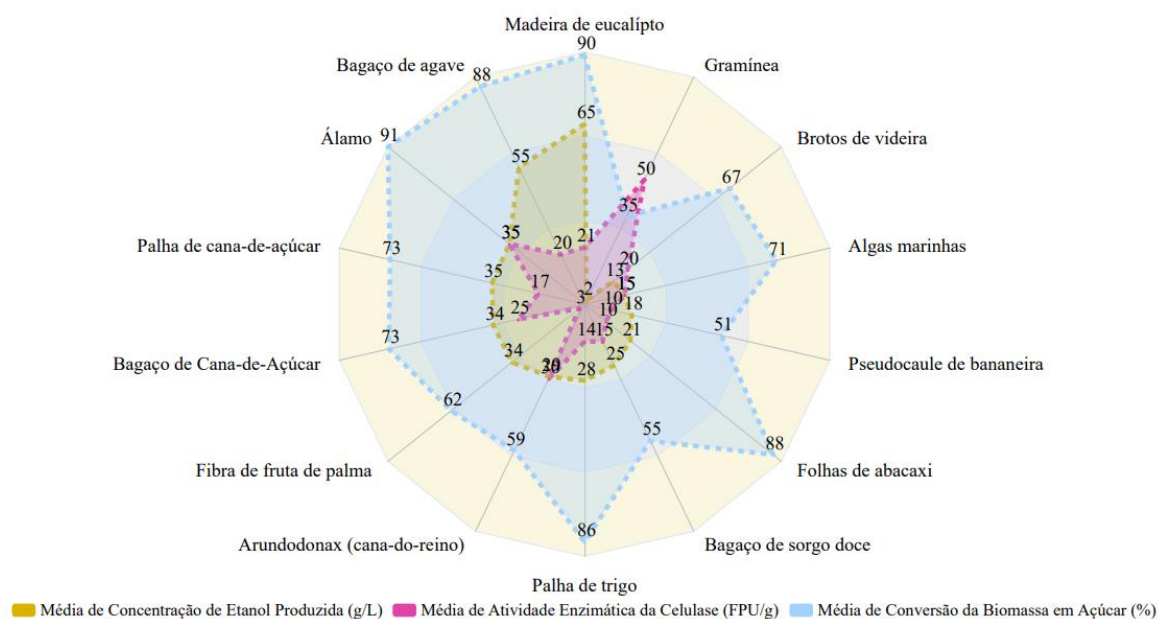
Fonte: Dados gerados em Power BI.

Já a Figura 15 mostra que o tempo de reação influencia diretamente a produção de etanol, pois tempos mais longos favorecem a conversão da biomassa, mas podem reduzir a eficiência do processo devido à inibição enzimática e ao aumento dos custos operacionais. A análise sugere que um intervalo entre 50 e 100 horas é um período adequado entre eficiência e produtividade, pois tempos inferiores podem resultar em conversão incompleta, enquanto tempos superiores nem sempre garantem ganhos expressivos. Isso era esperado, pois o crescimento celular passa por uma fase de adaptação, crescimento exponencial, fase estacionária e após um tempo, morte celular, assim, otimizar a duração da reação é essencial para maximizar a produção de etanol sem afetar a viabilidade econômica do processo.

Adicionalmente, a hidrólise da biomassa possui uma primeira fase conhecida como liquefação, onde ocorre o aumento do teor de água livre no meio como consequência da hidrólise das frações amorfas da biomassa (DA SILVA et al., 2020), favorecendo a transferência de massa no reator e consequentemente as taxas de conversão de forma que um tempo insuficiente para que esta etapa ocorra, pode prejudicar o rendimento global do processo (SILVA et al., 2020).

Continuando a análise a respeito da Tabela 3, foi separado os parâmetros médios obtidos, de concentração de etanol produzido (g/l), atividade enzimática da celulase (FPU/g) e conversão da biomassa em açúcar (%) no gráfico de radar abaixo, Figura 16, comparando entre si as biomassas utilizadas, afim de simplificar a visualização entre si do potencial de cada biomassa utilizada nesses parâmetros estudados.

Figura 16 - Variação da média dos parâmetros da Tabela 3 pelo tipo de biomassa.



Fonte: Dados gerados em Power BI.

A partir da análise da Figura 16, observa-se que a biomassa de bagaço de agave e álamo se destacam positivamente, especialmente quando comparadas a outras fontes de biomassa. O bagaço de agave, por exemplo, apresenta uma alta conversão de biomassa em açúcar, mesmo com uma atividade enzimática mais baixa, o que sugere uma boa eficiência no processo de liberação de açúcares. Esse resultado pode ser atribuído a características específicas da biomassa ou a processos de pré-tratamento eficazes, que facilitam a conversão. Já o álamo, com

uma boa atividade enzimática (35 FPU/g), também mostra uma conversão eficiente e uma boa produção de etanol, indicando que é uma fonte equilibrada para a produção de etanol, com alto rendimento tanto em termos de atividade enzimática quanto de conversão de biomassa.

Por outro lado, fontes como o bagaço de cana-de-açúcar apresentam uma maior dispersão no gráfico, com variações em sua conversão de biomassa e na atividade enzimática. Isso reflete a complexidade da biomassa e a influência de fatores como o tipo de cana, pré-tratamento aplicado e condições de processamento, que embora amplamente utilizada, pode ser influenciada por fatores como o tipo de cana, o pré-tratamento aplicado e as condições de processamento (SANTUCCI, 2018). As variações observadas indicam que, enquanto a conversão de biomassa em açúcar pode ser alta em algumas condições, a atividade enzimática pode não ser suficiente em outros casos, prejudicando a eficiência do processo.

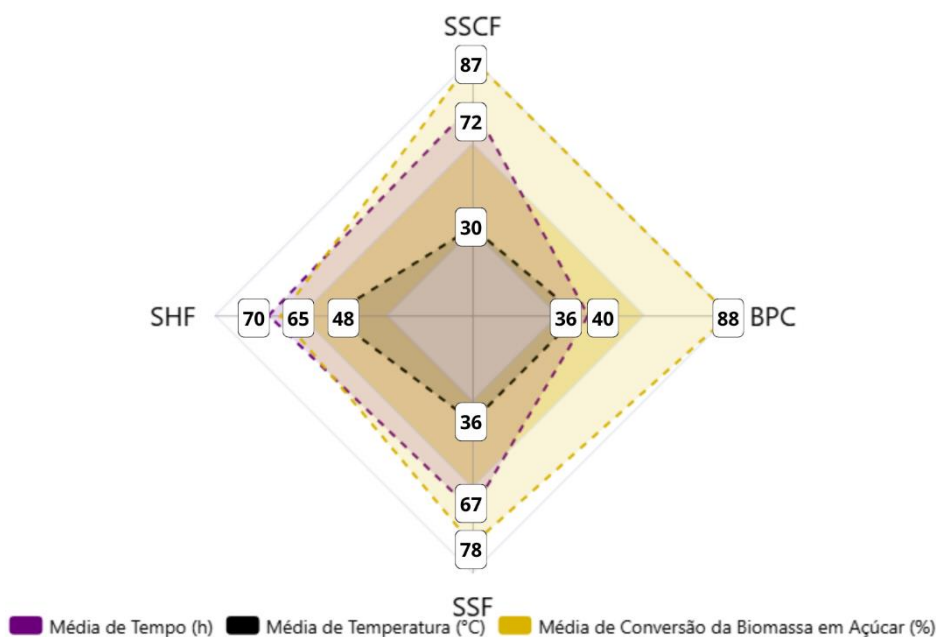
O gráfico de radar evidencia a importância da combinação de alta atividade enzimática com boa conversão de biomassa para otimizar a produção de etanol. Embora a concentração de etanol não seja o único indicador de eficiência, sua correlação com as outras variáveis mostra que a maximização da conversão de açúcares, a escolha de biomassa e a escolha da enzima utilizada são cruciais para alcançar altos rendimentos. A biomassa que apresentar um bom equilíbrio entre esses parâmetros provavelmente será mais eficiente na produção de etanol, e esse tipo de gráfico facilita a comparação entre as diferentes fontes de biomassa para escolher a mais adequada para processos de bioconversão.

Além disso, a comparação da atividade enzimática entre os trabalhos avaliados revela como a escolha de enzimas e suas capacidades catalíticas influenciam diretamente os resultados. Autores que utilizam enzimas em maiores doses tendem a obter melhores resultados na conversão de biomassa e produção de etanol. Essa análise também sugere que, em alguns casos, a conversão de biomassa em açúcar pode ser mais influenciada por variáveis externas, como o tipo de biomassa ou as condições de processamento, do que pela atividade enzimática isoladamente, quando por exemplo é comparado madeira de eucalipto com gramínea, no primeiro caso tem-se até 96% de conversão com 24,23 FPU/g, enquanto no segundo, mesmo com 75 FPU/g chegou-se a apenas 39%, ou quando comparamos a grande variação de conversão do bagaço de cana de açúcar pela atividade enzimática, que chega a 87% de conversão a 7,5 FPU/g, 72 h e 37 °C, porém 75% a 40 FPU/g, 78h e 50 °C.

A Figura 17 compara os processos SHF, SSF, SSCF e BPC em relação ao tempo médio de processamento, temperatura média de operação e conversão da biomassa em açúcares fermentescíveis. Esses parâmetros são essenciais para avaliar a eficiência e a viabilidade técnica

de cada metodologia, impactando diretamente os custos e a produtividade do etanol. Processos com maior conversão podem demandar mais tempo ou temperaturas elevadas, influenciando o consumo energético e a escolha do método mais adequado para cada tipo de biomassa. Essa análise comparativa permite identificar relações entre eficiência e tempo de reação.

Figura 17- Comparação dos parâmetros médios com a variação do tipo de processo.



Fonte: Dados gerados em Power BI.

Dentre os processos analisados, SHF e SSF são os mais representativos, permitindo uma avaliação mais robusta de suas características. O SHF apresenta conversão média de 65%, com temperatura de 48°C e um tempo de 70 horas, proporcionando um controle mais eficiente das condições enzimáticas e fermentativas. No entanto, o tempo mais longo pode ser uma limitação em aplicações industriais. Já o SSF, ao integrar as etapas de hidrólise e fermentação, reduz custos e simplifica o processo, apresenta conversão maior (78%) e um tempo mais reduzido (67 horas).

Além desses métodos, SSCF e BPC demonstram potencial promissor, embora os dados disponíveis sejam mais limitados. O SSCF, que possibilita a conversão simultânea de açúcares C5 e C6, obteve 87,4% de conversão e tempo reduzido de 72 horas, sendo uma alternativa viável para substratos lignocelulósicos ricos em pentoses. O BPC, ao consolidar todas as etapas em um único sistema, apresentou eficiência semelhante (88%), e com tempo reduzido, de

apenas 40 horas. Apesar dessas vantagens, a implementação em larga escala ainda enfrenta desafios técnicos e biotecnológicos. Dessa forma, a escolha do processo mais adequado dependerá das características da biomassa utilizada e da viabilidade econômica de cada metodologia.

5.3 Viabilidade econômica do processo

Para avaliar a viabilidade econômica do processo de produção do etanol 2G, é necessário analisar os custos de produção e o MESP em diferentes configurações de processo. Diversos fatores influenciam esse parâmetro, como eficiência, tipo de processo, custo dos insumos, do capital, escala de produção, mercado e logística, tipo de pré-tratamento, entre outros. A análise de viabilidade envolve a comparação dos MESP's com base em diferentes tipos de biomassa, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, resíduos florestais e gramíneas energéticas, para verificar a competitividade do etanol 2G em relação aos combustíveis fósseis e ao etanol 1G. Os dados apresentados na Tabela 4 comparam os MESP's obtidos em diferentes estudos, sem correção da inflação, destacando as variações de preço conforme o tipo de processo, a biomassa utilizada e a concentração de etanol produzida.

Tabela 4- Comparação dos MESP's para etanol 2G em diferentes tipos de processos e biomassas utilizadas, onde SHF é hidrólise e fermentação separadas, SSF é sacarificação e fermentação simultâneas e SSCF é sacarificação e co-fermentação.

Tipo de Processo	Biomassa	Produção g/L	MESP (USD/L)	Referência
SSF	Bagaço de sorgo doce	19,1	0,43	Tinôco et al, 2021
SHF	Palha de trigo	36	0,99	Sanchez et al, 2013
SSF	Resíduos florestais	39,4	0,36	Rachel et al, 2024
SHF	Bagaço	39,5	0,97	Macrelli et al, 2012
SSCF	Bagaço de milho	40	0,66	Petersen et al, 2021

Tipo de Processo	Biomassa	Produção g/L	MESP (USD/L)	Referência
SSF	Palha de cana-de-açúcar	44	0,62	Pratto, Bruna, et al, 2020
SSCF	Madeira dura	50	0,91	Piccolo, 2009
SSCF	Bagaço de cana-de-açúcar	51,4	1,93	Moonsamy, et al, 2022
SSCF	Bagaço de cana-de-açúcar	55,1	0,63	Gubicza et al, 2016
SSF	Madeira de eucalipto	61,4	0,2	Gomes et al, 2021
SSF	Bagaço de cana-de-açúcar	65,4	0,44	Khajeeram e Unrean, 2017
SSCF	Bagaço de cana-de-açúcar	71,5	0,17	Losordo et al, 2016
SSCF	Álamo	72	0,53	Sengupta et al, 2020
SSCF	Palha de milho	74,6	0,55	Yuan et al, 2022
SHF	Bagaço de cana-de-açúcar	81,6	0,47	Dai et al, 2021
SSF	Álamo	87	0,69	Sengupta et al, 2020
SSCF	Milho	90,3	0,83	Wu et al, 2021
SHF	Polpa de café	-	0,76	Sadhukhan et al, 2019
SHF	Álamo	-	0,65	Qian, et al, 2024
SHF	Álamo e alto teor de glucano	-	0,71	National Academy of Sciences et al, 2009
SHF	Alga marrom	-	0,55	Fasahati et al, 2015
SSCF	Bagaço de cana-de-açúcar	-	0,91	Huang et al, 2020

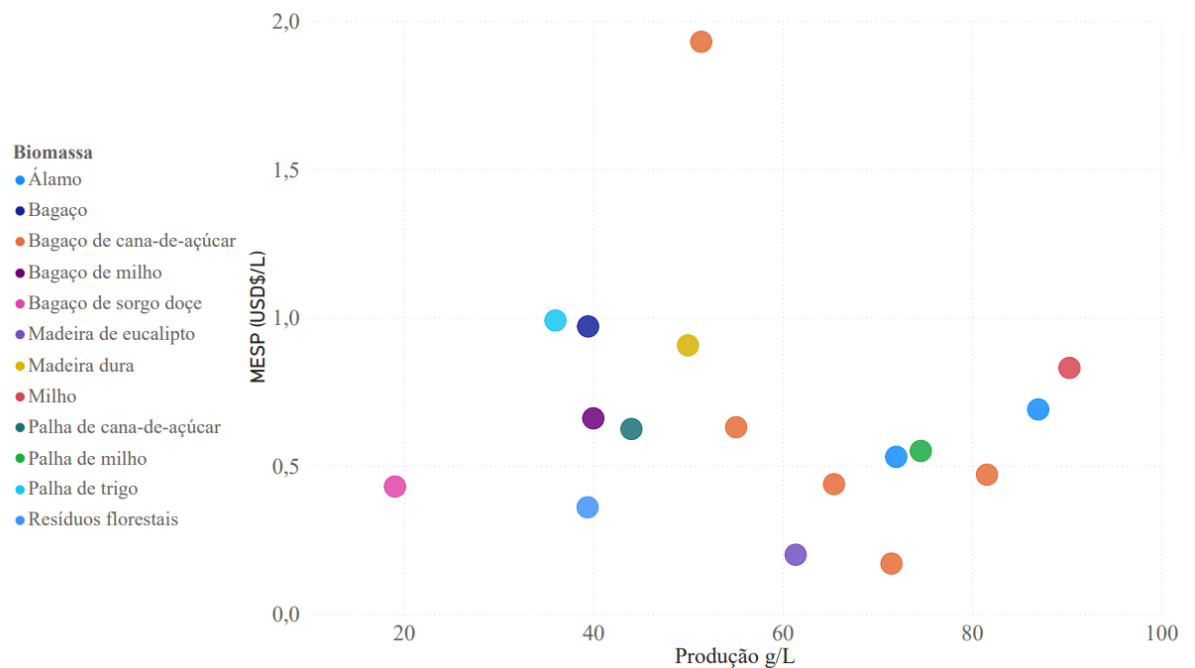
Tipo de Processo	Biomassa	Produção g/L	MESP (USD/L)	Referência
SSCF	Bagaço de cana-de-açúcar	-	0,73	Ntimbani et al, 2021
SSCF	Bagaço de cana-de-açúcar	-	1,14	Ntimbani et al, 2021
SSF	Cana-do-reino	-	0,4	Wang et al, 2022
SHF	Capim (<i>Panicum virgatum L.</i>)	-	0,84	Larnaudie et al, 2021
SSCF	Capim (<i>Panicum virgatum L.</i>)	-	0,46	Huang et al, 2009
BPC	Capim (<i>Panicum virgatum L.</i>)	-	0,17	Laser, 2009
SSF	Eucalipto	-	0,74	Stephen et al, 2023
SSF	Lascas de madeira	-	0,57	Olofsson et al, 2017
SSCF	Madeira de álamo	-	0,41	Huang et al, 2009
SHF	Miscanthus x giganteus	-	0,65	Boakye-Boaten et al, 2017
SHF	Palha de arroz	-	1,68	Peng et al, 2021
SSCF	Palha de milho	-	0,39	Aden et al, 2002
SHF	Palha de milho	-	0,57	Humbird et al, 2011
SHF	Palha de milho	-	1,16	Kazi et al, 2010
SSCF	Palha de milho	-	0,38	Huang et al, 2009
SSCF	Palha de milho	-	0,27	Sendich et al, 2008
BPC	Palha de milho	-	0,21	Sendich et al, 2008

Tipo de Processo	Biomassa	Produção g/L	MESP (USD/L)	Referência
SSCF	Palha de milho	-	0,58	Bals et al, 2011
SSF	Palha de milho	-	1,01	Vasilakou, Konstantina, et al, 2023
SSCF	Palha de milho	-	0,58	Jin et al, 2017
BPC	Palha de milho	-	0,48	Hoey et al, 2024
BPC	Palha de milho	-	0,5	Lynd et al, 2017
SHF	Palha de trigo	-	0,54	Sadhukhan et al, 2019
SSCF	Palha de trigo	-	1,23	Hasanly et al, 2018
SHF	Picea	-	0,96	Da Silva et al, 2017
SHF	Resíduos de eucalipto	-	2,37	Correia et al, 2024
SHF	Resíduos de milho	-	2,65	Correia et al, 2024
SHF	Resíduos de milho	-	0,53	Martinez-Hernandez et al, 2019

Fonte: Acervo pessoal.

A partir do tratamento dos dados obtidos na Tabela 4 utilizando o Power BI, foi possível identificar que a produção de etanol e o custo de produção variam consideravelmente dependendo do tipo de biomassa utilizado e do processo empregado (Figura 18). O bagaço de cana-de-açúcar apresenta uma produção de etanol que varia entre 51,4 g/L e 71,5 g/L, dependendo do estudo, destacando-se como uma biomassa eficiente. A variação do MESP, no entanto, é significativa. Em alguns estudos, o custo de produção é relativamente baixo, como no estudo de Khajeeram e Unrean de 2017 (0,44 USD/L), enquanto em outros, como o de Moonsamy et al. (2022), o MESP atinge 1,93 USD/L. Essas diferenças podem ser atribuídas à escolha do processo de conversão, como SSF ou SSCF, e à eficiência das enzimas e tecnologias empregadas.

Figura 18- Variação da produção de etanol (g/l) pelo MESP (USD/L) e pelo tipo de biomassa empregado.



Fonte: Dados gerados em Power BI.

O álamo, por sua vez, apresenta produções de até 87 g/L, o que o torna uma biomassa altamente produtiva. O MESP do álamo, de 0,69 USD/L, também é relativamente baixo, o que sugere que essa biomassa possui um bom desempenho econômico, especialmente considerando seu alto rendimento. O MESP mais baixo do álamo, em comparação com o bagaço de cana em alguns casos, pode indicar que ele é uma opção interessante do ponto de vista econômico, especialmente quando aliado a processos de conversão eficientes. No entanto, no contexto brasileiro, a viabilidade do cultivo do álamo é limitada. Essa espécie é mais adequada a climas temperados e regiões com baixas temperaturas, como o hemisfério norte. No Brasil, o álamo só teria potencial em áreas restritas, como regiões de altitude ou no extremo sul do país, onde as condições climáticas se aproximam das ideais para seu cultivo.

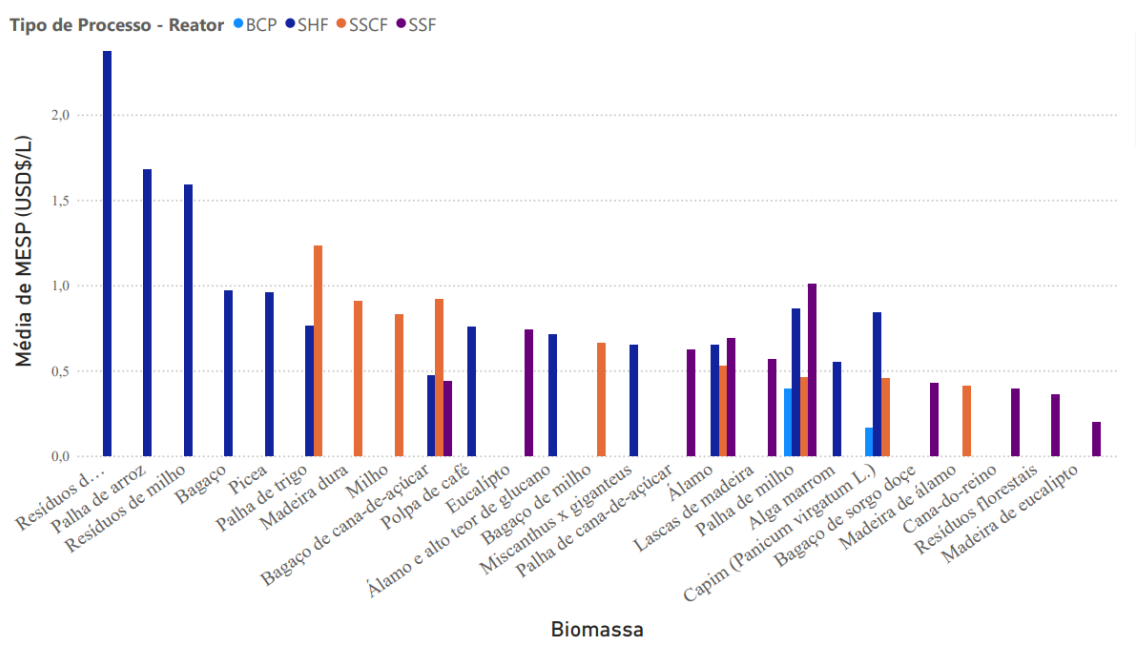
A madeira de eucalipto, embora apresente uma produção de etanol relativamente modesta (61,4 g/L), destaca-se pelo baixo MESP, estimado em 0,20 USD/L, o que a torna uma alternativa promissora no contexto brasileiro. O Brasil, como um dos maiores produtores mundiais de eucalipto, dispõe de extensas áreas de cultivo e uma cadeia produtiva consolidada, principalmente voltada para a indústria de celulose e papel. Durante o processamento industrial, estima-se que para cada 100 toneladas de celulose produzida, sejam geradas aproximadamente

48 toneladas de subprodutos lignocelulósicos, como cascas, galhos e cavacos residuais. Esses subprodutos representam uma oportunidade significativa para a produção de etanol 2G, aproveitando a biomassa já disponível e reduzindo a dependência de fontes externas de matéria-prima (DANIEL, 2017).

A alta produtividade do eucalipto em climas tropicais, somada à infraestrutura existente para o seu processamento, favorece a redução de custos logísticos e operacionais. Além disso, o Brasil conta com políticas de incentivo à produção de biocombustíveis, como o programa RenovaBio, que promovem a integração de processos para aumentar a eficiência econômica da produção de etano (BRASIL - L13576, 2017). Estratégias como o reaproveitamento de lignina para geração de energia, o uso de subprodutos lignocelulósicos previamente tratados e a recuperação de subprodutos, como xilooligossacarídeos, são especialmente relevantes nesse cenário. Essas abordagens não apenas contribuem para a redução do MESP, mas também ampliam a viabilidade econômica de biorrefinarias integradas no país (DANIEL, 2017).

A Figura 19 representa mais claramente a variação média do MESP, diferenciando as biomassas e os tipos de processos utilizados. Ela fornece uma visão clara de como essas variáveis impactam os custos de produção. A comparação entre os diferentes tipos de processos (SSF, SHF e SSCF) e as biomassas utilizadas permite identificar as combinações mais econômicas, essenciais para otimizar a produção em larga escala.

Figura 19- Média do MESP com diferenciação de biomassa e tipo de processo.

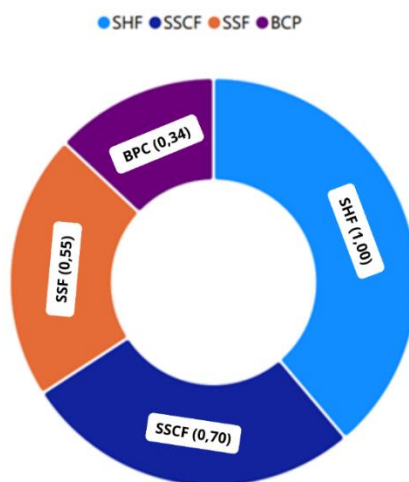


Fonte: Dados gerados em Power BI.

Os processos SSF e SSCF apresentam valores de MESP mais baixos que o SHF devido à integração das etapas de sacarificação e fermentação, reduzindo custos com energia, tempo e infraestrutura. O SSCF ainda permite a co-fermentação de açúcares C6 e C5, aumentando o aproveitamento da biomassa. Essas vantagens tornam processos como o SSF e SSCF ideais para biomassas como eucalipto e bagaço de cana, que apresentam alta viabilidade econômica. Em contraste, o processo SHF costuma ter custos mais elevados devido à separação das etapas de sacarificação e fermentação. Esse processo demanda maior consumo de energia e enzimas, o que eleva o MESP. O aumento nos custos pode ser atribuído à maior complexidade do processo e ao tempo adicional necessário para a conversão, resultando em um custo de produção mais alto.

Ao analisar as biomassas, nota-se que fontes como o bagaço de cana-de-açúcar, amplamente disponível e de baixo custo, apresentam um MESP menor quando submetidas ao processo SSF, embora não haja estudos disponíveis para comparação com o BPC. Já a palha de milho, que apresenta um MESP médio entre os quatro processos analisados, mostra o BPC como o processo de menor custo. A quantidade de pesquisas sobre o BPC ainda é limitada em comparação com outros processos; no entanto, no espaço amostral considerado neste trabalho, o BPC resultou no menor MESP médio, conforme demonstrado na Figura 20. Isso reforça que a escolha da biomassa, associada ao processo tecnológico mais adequado, exerce um impacto significativo na viabilidade econômica da produção de etanol.

Figura 20 - Média do MESP com diferenciação de tipo de processo utilizado.



Fonte: Dados gerados em Power BI.

A análise da Figura 19 revela diferenças significativas no custo de produção de etanol entre os diferentes tipos de processo utilizados. O processo SSF apresentou um MESP de 0,55 USD/L, posicionando-se em um custo intermediário em comparação com os demais processos. Em contraste, o processo de BPC demonstrou o menor valor de MESP, com 0,34 USD/L, indicando uma maior eficiência econômica. Esse custo mais baixo pode ser atribuído à eliminação da necessidade de um pré-tratamento extensivo e ao uso de microrganismos geneticamente modificados, que realizam tanto a hidrólise da biomassa quanto a fermentação dos açúcares em um único processo. Esse processo reduz significativamente os custos com enzimas e simplifica a logística e a infraestrutura necessárias para o processo uma vez que nesta conformação de processo a produção de enzimas, a hidrólise da biomassa e a fermentação ocorrem em um único reator, dispensando a utilização de enzimas comerciais.

Esses resultados destacam a importância da escolha do processo na viabilidade econômica da produção de etanol. O BPC se mostra uma opção mais econômica em comparação com os processos tradicionais de SSF, SHF e SSCF, principalmente devido à sua capacidade de otimizar recursos e reduzir custos operacionais. A eficiência econômica do BPC sugere que a integração das etapas de produção pode ser uma estratégia vantajosa para melhorar a competitividade do etanol como biocombustível no mercado.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi possível identificar os fatores determinantes para a eficiência e viabilidade da produção de etanol 2G, por meio do levantamento bibliográfico de dados de processo, da análise dessas informações utilizando o software Power BI, da caracterização do cenário atual a partir de uma análise bibliométrica com o software VOSviewer e da comparação de fatores que influenciam a eficiência, viabilidade econômica e impacto ambiental do processo.

O estudo dos parâmetros que maximizam a viabilidade de uma biorrefinaria é essencial para reduzir impactos ambientais, explorar alternativas de energia sustentável e obter produtos de alto valor agregado. Com base nas análises realizadas, conclui-se que a produção de etanol a partir de biomassa é um processo multifacetado, no qual diversos fatores interagem de forma complexa. As variáveis relacionadas à concentração de etanol, atividade enzimática e conversão de biomassa em açúcares são fundamentais para determinar a eficiência do processo.

Principais resultados obtidos na revisão bibliométrica dessa pesquisa:

- Biomassas como bagaço de agave e álamo mostraram alto equilíbrio entre conversão de biomassa e eficiência na produção de etanol, sendo promissoras sob condições otimizadas;
- O bagaço de cana-de-açúcar apresentou grande variabilidade nos resultados, evidenciando a sensibilidade do processo a fatores como tipo de biomassa, pré-tratamento e enzimas utilizadas;
- Variáveis como carga enzimática, conversão de biomassa em açúcares, temperatura, tempo, tipo de biomassa e tipo de processo são determinantes para a eficiência.

Análise bibliométrica:

- O Brasil lidera o ranking mundial de publicações sobre etanol 2G, com quase três vezes mais trabalhos do que o segundo colocado;
- Apesar dessa liderança, houve uma redução no número de estudos nos últimos anos, possivelmente devido ao redirecionamento de esforços para outras aplicações do material lignocelulósico, como a obtenção de produtos de maior valor agregado.

Tecnologias emergentes:

- O processo BPC apresentou um MESP médio de 0,34 USD/L, a menor dos 4 tipos de processos estudados, destacando-se como uma alternativa econômica e promissora, apesar da escassez de estudos sobre essa tecnologia.

A integração e otimização das variáveis técnico-econômicas, como temperatura, tempo, atividade enzimática e tipo de biomassa, são essenciais para aumentar a eficiência do processo e garantir sustentabilidade. É fundamental investir em tecnologias avançadas e realizar um controle rigoroso das condições experimentais para impulsionar o avanço da indústria de biocombustíveis. Além disso, explorar novas rotas tecnológicas, como o BPC, pode contribuir para a viabilidade econômica e sustentabilidade da produção de etanol 2G.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEN, A. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. **National Renewable Energy Lab.(NREL)**, 2002.

AGUILAR, D. L. et al. Scale-up and evaluation of hydrothermal pretreatment in isothermal and non-isothermal regimen for bioethanol production using agave bagasse. **Bioresource technology**, v. 263, p. 112–119, 2018.

AGUILAR, R. et al. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. **Journal of food engineering**, v. 55, n. 4, p. 309–318, 2002.

ALVES, J. Caracterização físico-química do bagaço de malte: abordagem experimental e suas possibilidades de aproveitamento. **Porto Alegre**, 2023.

ALVIRA, P. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. **Bioresource technology**, v. 101, p. 4851–4861, 2010.

ARNTHONG, J. Overexpression of LAS21 in cellulase-displaying *Saccharomyces cerevisiae* for high-yield ethanol production from pretreated sugarcane bagasse. **Fermentation**. v. 8, n. 11, p. 652, 2022.

BAEYENS, J. et al. Challenges and opportunities in improving the production of bioethanol. **Progress in energy and combustion science**, v. 47, p. 60–88, 2015.

BALLESTEROS, I. et al. Ethanol Production From Steam-Explosion Pretreated Wheat Straw. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, p. 129–132, 2006.

BALS, B. Evaluating the impact of ammonia fiber expansion (AFEX) pretreatment conditions on the cost of ethanol production. **Bioresource technology**, v. 102, n. 2, p. 1277–1283, 2011.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). BNDES aprova R\$ 1 bilhão para Raízen produzir etanol de segunda geração. **Agência de Notícias BNDES**, 2025. Disponível em: [https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-aprova-R\\$-1-bilhao-para-Raizen-produzir-etanol-de-segunda-geracao/#:~:text=Com%20o%20apoio%20financeiro%20do,bilh%C3%B5es%20de%20litros%20em%202024](https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-aprova-R$-1-bilhao-para-Raizen-produzir-etanol-de-segunda-geracao/#:~:text=Com%20o%20apoio%20financeiro%20do,bilh%C3%B5es%20de%20litros%20em%202024). Acesso em: 04 fev. 2025.

BEHERA, S. Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 36, p. 91–106, 2014.

BEZERRA, T. L.; RAGAUSKAS, A. J. A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production. **Biofuels, bioproducts & biorefining : Biofpr**, v. 10, n. 5, p. 634–647, 2016.

BOAKYE-BOATEN, N. Techno-economic analysis for the biochemical conversion of *Miscanthus x giganteus* into bioethanol. **Biomass and Bioenergy**, v. 98, p. 85–94, 2017.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm. Acesso em: 07 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Exportações brasileiras de etanol*. 10 fev. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-etanol-comercio-exterior-brasileiro/001EXPORTAESBRASILEIRASDEETANOL_10022025.pdf. Acesso em: 2 fev. 2025.

BRODEUR, G. Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. **Enzyme research**, n. 1, 2011.

BUITRAGO, R.; BELALCÁZAR, L. Análisis del ciclo de vida para la producción de bioetanol en Colombia por medio de OpenLCA. **Épsilon**, p. 145–156, 2013.

CARVALHO, A. M. Teores de hemiceluloses, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no Cerrado. **Embrapa Cerrados**, p. 1–15, 2010.

ENZYMES.BIO. Cellulase. Disponível em: https://enzymes.bio/pt/categoria-produto/cellulase/?srsltid=AfmBOooP_Yp9F5vnAC7PIBjtvlnIp066PNQ5fzjsXKQoNP S4OC_IE2M. Acesso em: 02 fev. 2025.

CHANDEL, A. K. et al. Brazilian biorefineries from second generation biomass: critical insights from industry and future perspectives. **Biofuels, bioproducts & biorefining : Biofpr**, v. 15, n. 4, p. 1190–1208, 2021.

CHANG, S. Comprehensive reutilization of Glycyrrhiza uralensis residue by extrusion-biological pretreatment for coproduction of flavonoids, cellulase, and ethanol. **Bioresource Technology**, 2024.

CHENG, N. et al. Amphipathic lignin derivatives to accelerate simultaneous saccharification and fermentation of unbleached softwood pulp for bioethanol production. **Bioresource technology**, v. 173, p. 104–109, 2014.

CORREIA, B. Sustainability Assessment of 2G Bioethanol Production from Residual Lignocellulosic Biomass. **Processes**, v. 12, n. 5, p. 987, 2024.

DAI, Y. Lowering whole cost for sugarcane-based ethanol production by engineered *Zymomonas mobilis*. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 12, p. 1894–1907, 2021.

DANIEL, J. S. V. et al. Evaluation of productivity of sweet potato genotypes for first and second generation bioethanol production. **African journal of biotechnology**, v. 16, n. 49, p. 2289–2298, 2017.

DA SILVA, André Rodrigues Gurgel; ERRICO, Massimiliano; RONG, Ben-Guang. Process alternatives for bioethanol production from organosolv pretreatment using lignocellulosic biomass. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING**, 13., 2017. Anais [...]. AIDIC, p. 1–6.

DA SILVA, A. S. et al. Constraints and advances in high-solids enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: a critical review. **Biotechnology for biofuels**, v. 13, n. 1, 2020.

DÁVILA, I. Multiproduct biorefinery from vine shoots: Bio-ethanol and lignin production. **Renewable Energy**, v. 142, p. 612–623, 2019.

DE ALBUQUERQUE WANDERLEY, M. C. et al. Increase in ethanol production from sugarcane bagasse based on combined pretreatments and fed-batch enzymatic hydrolysis. **Bioresource technology**, v. 128, p. 448–453, 2013.

DINIZ, Layse Mendes. Aplicação da hemicelulose como substrato flexível em sensores de pressão, temperatura e umidade. 2024. 106 f., il. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

DOMÍNGUEZ, E. Evaluation of strategies for second generation bioethanol production from fast growing biomass Paulownia within a biorefinery scheme. **Applied Energy**, v. 187, p. 777–789, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de conjuntura dos biocombustíveis – Ano 2021**. Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2022/02. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 18 jun. 2024.

ENZYMES.BIO. Xylanase Enzyme For Brewers. [s.d.]. Disponível em: <https://enzymes.bio/pt/product/xylanase-enzyme-for-brewers/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

FASAHATI, P. et al. Industrial-scale bioethanol production from brown algae: Effects of pretreatment processes on plant economics. **Applied Energy**, v. 139, p. 175–187, 2015.

FENGEL, D.; WEGENER, G.; GREUNE, A. Studies on the delignification of spruce wood by organosolv pulping using SEM-EDXA and TEM. **Wood Science and Technology**, p. 123–130, 1989.

FLORENCIO, C.; BADINO, A. C.; FARINAS, C. S. Current challenges on the production and use of cellulolytic enzymes in the hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Química nova**, 2017.

GALEMBECK, Fernando. Energia: resolver problemas, explorar oportunidades: demandas atuais de aumento na produção de energia de fontes renováveis criam grandes oportunidades para o Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 74, n. 4, p. 01-07, 2022.

GARCEZ, L. **Etanol de segunda geração (E2G) como alternativa de produção de combustível derivado da cana-de-açúcar: uma revisão bibliográfica entre uma revisão bibliográfica entre 2011 e 2023**, 2024.

GOMES, D. G.; TEIXEIRA, J. A.; DOMINGUES, L. Economic determinants on the implementation of a Eucalyptus wood biorefinery producing biofuels, energy and high added-value compounds. **Applied Energy**, v. 303, 2021.

GONZÁLEZ-GLORIA, K. D. Scale-up of hydrothermal processing: Liquid hot water and pilot-scale tubular steam explosion batch reactor for bioethanol production using macroalgae *Sargassum* spp biomass. **Bioresource Technology**, v. 369, 2023.

GUBICZA, K. Techno-economic analysis of ethanol production from sugarcane bagasse using a Liquefaction plus Simultaneous Saccharification and co-Fermentation process. **Bioresource technology**, v. 208, p. 42–48, 2016.

HASANLY, A. K.; MAHDI, K.; ALAVIJEH, M. Techno-economic assessment of bioethanol production from wheat straw: a case study of Iran. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, p. 357–377, 2018.

HERMINO, V. **Avaliação da fermentabilidade de hidrolisados de sementes do açaí para a produção de Bioetanol e Ácidos Orgânicos no contexto de Biorrefinaria de Segunda Geração (2G)**, 2024.

HOEY, M. Scale sensitivity of ethanol production via consolidated bioprocessing with consideration of feedstock cost. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, 2024.

HUANG, H.-J. Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: a comparative process and economic analysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 234–246, 2009.

HUANG, Kefeng; FASAHATI, Peyman; MARAVELIAS, Christos T. System-level analysis of lignin valorization in lignocellulosic biorefineries. **Isience**, v. 23, n. 1, 2020.

HUANG, Y. Efficient enzymatic hydrolysis and simultaneous saccharification and fermentation of sugarcane bagasse pulp for ethanol production by cellulase from *Penicillium oxalicum* EU2106 and thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* ZM1-5. **Biomass and Bioenergy**, v. 77, p. 53–63, 2015.

HUMBIRD, D. Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. p. 40–43, 2011.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *Hydrolysis for Corn Stover*. Report No. NREL/TP-510-32438. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, jun. 2002. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/32438.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2025.

JIN, M. et al. Toward high solids loading process for lignocellulosic biofuel production at a low cost: Biofuel Production at High Solids Loading. **Biotechnology and bioengineering**, v. 114, n. 5, p. 980–989, 2017.

JOHN, A. J.; SELVARAJAN, E. Ionic liquid-assisted pretreatment of lignocellulosic biomass using purified *Streptomyces* MS2A cellulase for bioethanol production. **International journal of biological macromolecules**, v. 270, n. Pt 1, p. 132149, 2024.

JUGWANTH, Y.; SEWSYNKER-SUKAI, Y.; GUEGUIM KANA, E. B. Valorization of sugarcane bagasse for bioethanol production through simultaneous saccharification and fermentation: Optimization and kinetic studies. **Fuel (London, England)**, v. 262, n. 116552, p. 116552, 2020.

KAUR, J. et al. A low-cost approach for the generation of enhanced sugars and ethanol from rice straw using in-house produced cellulase-hemicellulase consortium from *A. niger* P-19. **Bioresource technology reports**, v. 11, n. 100469, p. 100469, 2020.

KAZI, F. K. et al. Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover. **Fuel (London, England)**, v. 89, p. S20–S28, 2010.

KHAJEERAM, S.; UNREAN, P. Techno-economic assessment of high-solid simultaneous saccharification and fermentation and economic impacts of yeast consortium and on-site enzyme production technologies. **Energy (Oxford, England)**, v. 122, p. 194–203, 2017.

KIM, S.; KUMAR, P. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, n. 1, p. 1–20, 2011.

LARNAUDIE, V.; FERRARI, M. D.; LAREO, C. Life cycle assessment of ethanol produced in a biorefinery from liquid hot water pretreated switchgrass. **Renewable energy**, v. 176, p. 606–616, 2021.

LASER, M. et al. Comparative Analysis of Efficiency, Environmental Impact, and Process Economics for Mature 88 Biomass Refining Scenarios. **Biofuels, Bioproducts, & Biorefining**, v. 3, p. 247–270, 2009.

LEGODI, L. M. et al. Enzymatic hydrolysis and fermentation of banana pseudostem hydrolysate to produce bioethanol. **International journal of microbiology**, v. 2021, p. 5543104, 2021.

LEMÕES, J. S. et al. Chemical pretreatment of *Arundo donax* L. for second-generation ethanol production. **Electronic journal of biotechnology: EJB**, v. 31, p. 67–74, 2018.

LOSORDO, Z. et al. Cost competitive second-generation ethanol production from hemicellulose in a Brazilian sugarcane biorefinery: Integrated Ethanol Production from Hemicellulose. **Biofuels, bioproducts & biorefining : Biofpr**, v. 10, n. 5, p. 589–602, 2016.

LU, J. et al. Production of high concentration bioethanol from reed by combined liquid hot water and sodium carbonate-oxygen pretreatment. **Energy (Oxford, England)**, v. 217, n. 119332, p. 119332, 2021.

LYND, L. R. et al. Cellulosic ethanol: status and innovation. **Current opinion in biotechnology**, v. 45, p. 202–211, 2017.

MACRELLI, S.; MOGENSEN, J.; ZACCHI, G. Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from wheat straw using enzymes produced on-site: Integrated vs. non-integrated configurations. **Biotechnology for Biofuels**, n. 5, 2012.

MAITAN-ALFENAS, G. P.; VISSER, E. M.; GUIMARÃES, V. M. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: converting food waste in valuable products. **Current opinion in food science**, v. 1, p. 44–49, 2015.

MARTINEZ-HERNANDEZ, E. et al. Techno-economic and greenhouse gas analyses of lignin valorization to eugenol and phenolic products in integrated ethanol biorefineries. **Biofuels, bioproducts & biorefining : Biofpr**, v. 13, n. 4, p. 978–993, 2019.

MELO, Nícolas Rocha. Etanol 2G: processo produtivo e seu contexto atual no Brasil. 2020. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

MOHSENZADEH, A.; ZAMANI, A.; TAHERZADEH, M. J. Bioethylene production from ethanol: A review and techno-economical evaluation. **ChemBioEng reviews**, v. 4, n. 2, p. 75–91, 2017.

MONTEIRO, M. et al. Produção de etanol de primeira e segunda geração. **Acta Iguazu**, n. 5, p. 211–217, 2016.

MOONSAMY, T. A. et al. A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane. **Industrial crops and products**, v. 188, n. 115675, p. 115675, 2022.

MOSIER, N. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**, v. 96, n. 6, p. 673–686, 2005.

MUND, N. K. et al. Cellulose solvent-based pretreatment and enzymatic hydrolysis of pineapple leaf waste biomass for efficient release of glucose towards biofuel production. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 12, n. 9, p. 4117–4126, 2022.

MUÑOZ, I. et al. Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. **The international journal of life cycle assessment**, v. 19, n. 1, p. 109–119, 2014.

NIU, Y. et al. Valorization of lignocellulosic biomass: Progress in the production of second-generation bioethanol. **Renewable Energies**, v. 2, n. 2, 2024.

NTIMBANI, R. N.; FARZAD, S.; GÖRGENS, J. F. Techno-economics of one-stage and two-stage furfural production integrated with ethanol co-production from sugarcane lignocelluloses. **Biofuels, bioproducts & biorefining : Biofpr**, v. 15, n. 6, p. 1900–1911, 2021.

OLOFSSON, J. et al. Integrating enzyme fermentation in lignocellulosic ethanol production: life-cycle assessment and techno-economic analysis. **Biotechnology for biofuels**, v. 10, n. 1, p. 51, 2017.

OLOFSSON, K.; BERTILSSON, M.; LIDÉN, G. A short review on SSF - an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. **Biotechnol Biofuels**, v. 14, p. 1–14, 2008.

PACHECO, Thályta Fraga. **Produção de etanol: primeira ou segunda geração?** Brasília: Embrapa Agroenergia, 2011. Circular Técnica, 04. ISSN 2177-4420. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 19 jan. 2025.

PASCHOS, T.; XIROS, C.; CHRISTAKOPOULOS, P. Simultaneous saccharification and fermentation by co-cultures of *Fusarium oxysporum* and *Saccharomyces cerevisiae* enhances ethanol production from liquefied wheat straw at high solid content. **Industrial crops and products**, v. 76, p. 793–802, 2015.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. Página oficial do IPCC. 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/2024/>. Acesso em: 04 Janeiro 2025.

PENG, J. et al. Techno-economic analysis of bioethanol preparation process via deep eutectic solvent pretreatment. **Industrial crops and products**, v. 172, n. 114036, p. 114036, 2021.

PEREZ, C. L. et al. Evaluation of consolidated bioprocessing of sugarcane biomass by a multiple hydrolytic enzyme producer *Saccharomyces* yeast. **Bioenergy research**, v. 16, n. 4, p. 1973–1989, 2023.

PETERSEN, A. M. et al. Systematic cost evaluations of biological and thermochemical processes for ethanol production from biomass residues and industrial off-gases. **Energy conversion and management**, v. 243, n. 114398, p. 114398, 2021.

PICCOLO, C.; BEZZO, F. A techno-economic comparison between two technologies for bioethanol production from lignocellulose. **Biomass & bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 478–491, 2009.

PIEROTTI, D. et al. Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for second-generation ethanol production from xylo-oligosaccharides and acetate. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 19182, 2023.

PRATTO, B. et al. Experimental optimization and techno-economic analysis of bioethanol production by simultaneous saccharification and fermentation process using sugarcane straw. **Bioresource technology**, v. 297, n. 122494, p. 122494, 2020.

QIAN, Q. et al. Life cycle assessment and techno-economic analysis of wood-based biorefineries for cellulosic ethanol production. **Bioresource technology**, v. 399, n. 130595, p. 130595, 2024.

RACHEL, S. et al. **Validation of Pre-Treatments for Cost Effective Production of Bioethanol from Floral Wastes**, 2024.

RAJENDRAN, K.; RAJOLI, S.; TAHERZADEH, M. Techno-economic analysis of integrating first and second-generation ethanol production using filamentous fungi: An industrial case study. **Energies**, v. 9, n. 5, p. 359, 2016.

RAMIYA; KRISHNAN, C. Enhanced production of cellulase from a novel strain *Trichoderma gamsii* M501 through response surface methodology and its application in biomass saccharification. **Process Biochemistry**, v. 99, p. 48–60, 2020.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Annual Ethanol Production**. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 08 out. 2024.

ROMANÍ, A. et al. Integrated approach for effective bioethanol production using whole slurry from autohydrolyzed Eucalyptus globulus wood at high-solid loadings. **Fuel (London, England)**, v. 135, p. 482–491, 2014.

RUIZ, H. A. Hydrothermal pretreatments of macroalgal biomass for biorefineries. **Products and Refinery Design**, v. 2, p. 467–491, 2015.

RURAL, G. **Teor de etanol anidro na gasolina deve subir a 30%; impacto nos preços não é consenso**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/teor-etanol-anidro-gasolina-subir-30-impacto-precos-nao-consenso-060125>>. Acesso em: 1 fev. 2025.

SADHUKHAN, J. et al. Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition. **Bioresource technology reports**, v. 7, n. 100230, p. 100230, 2019.

SAINI, Jitendra Kumar et al. Enhanced cellulosic ethanol production via fed-batch simultaneous saccharification and fermentation of sequential dilute acid-alkali pretreated sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 372, p. 128671, 2023.

SAINI, S. et al. Fungal oxidoreductases and CAZymes effectively degrade lignocellulosic component of switchgrass for bioethanol production. **Fuel (London, England)**, v. 328, n. 125341, p. 125341, 2022.

SAKDARONNARONG, C. et al. Ionosolv pretreatment of sugarcane bagasse and rice straw assisted by catalytic hydrothermal and microwave heating for biorefining. **Food and bioproducts processing**, v. 105, p. 104–116, 2017.

SANCHEZ, A. et al. Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production. **Fuel (London, England)**, v. 113, p. 165–179, 2013.

SANTOS, D. D. S. **Produção de etanol de segunda geração por *Zymomonas mobilis* naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica**, 2012.

SANTOS, J. R. A. et al. Optimization of ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* UFPEDA 1238 in simultaneous saccharification and fermentation of delignified sugarcane bagasse. **Industrial crops and products**, v. 36, n. 1, p. 584–588, 2012.

SANTUCCI, B. S. **Estudo dos efeitos dos tratamentos físico-mecânicos na hidrólise da celulose do bagaço de cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2018.

SAULO; JULIANI, A. Sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. **Estudos avançados**, v. 27, p. 195–212, 2013.

SENDICH, E. et al. Engineering *Escherichia coli* for ethanol production from xylose by the introduction of foreign genes encoding xylose utilization enzymes. **Biotechnology and Bioengineering**, n. 4, p. 795–803, 2008.

SENGUPTA, Priya. Conversion of Poplar Carbohydrates and Lignin into Fuel Ethanol and Polyurethane Following Co-Solvent Pretreatment. 2020. **Tese (Doutorado)** – University of California, Riverside, Riverside, Califórnia, 2020.

SHARMA, B.; LARROCHE, C.; DUSSAP, C.-G. Comprehensive assessment of 2G bioethanol production. **Bioresource technology**, v. 313, n. 123630, p. 123630, 2020.

SILVA, D. A. et al. Impactos econômicos e ambientais da produção do etanol de segunda geração no Brasil. **Brasil. Engineering Sciences**, v. 10, p. 31–38, 2022.

SILVA, G. M. et al. Ethanol production from sugarcane bagasse using SSF process and thermotolerant yeast. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 2, p. 193–200, 2015.

SILVA, Ricardo Justino da. Efeito de pré-tratamento hidrotérmico na hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)** – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.

SILVEIRA, Vinícius Ferreira de Brito. Formas alternativas de se produzir etanol: uma análise sobre o etanol de primeira, segunda e terceira geração. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)** – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

SOARES, Danyela Carla Elias. Avaliação da eficácia, segurança e viabilidade bacteriológica de produtos probióticos utilizados na carcinicultura. 2023. 145 f. **Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais)** – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

SOUZA, C. S. D. **Derivatização química e caracterização de uma lignina do bagaço de cana-de-açúcar**. Uberlândia, 2006.

SRIMACHAI, T.; THONGLIMP, V.; O-THONG, S. Ethanol and methane production from oil palm frond by two stage SSF. **Energy procedia**, v. 52, p. 352–361, 2014.

STEPHEN, J. D.; MABEE, W. E.; SADDLER, J. N. Lignocellulosic ethanol production from woody biomass: The impact of facility siting on competitiveness. **Energy policy**, v. 59, p. 329–340, 2013.

SUN, Y. et al. Metabolic and evolutionary engineering of diploid yeast for the production of first- and second-generation ethanol. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 9, p. 835928, 2021.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 1–11, 2002.

TELLO, R.; BUITRAGO; BELALCAZAR, L. **LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE BIOETHANOL PRODUCTION IN COLOMBIA BY USING OPENLCA**, 2014.

TINÔCO, D.; GENIER, H. L. A.; DA SILVEIRA, W. B. Technology valuation of cellulosic ethanol production by *Kluyveromyces marxianus* CCT 7735 from sweet sorghum bagasse at elevated temperatures. **Renewable energy**, v. 173, p. 188–196, 2021.

UDOP. Raízen inaugura segunda planta de etanol 2G; capacidade quase quadruplica até 2025. **Udop**, 27 maio 2024. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2024/05/27/raizen-inaugura-segunda-planta-de-etanol-2g-capacidade-quase-quadruplica-ate-2025-26.html>. Acesso em: 04 Janeiro 2025.

VASILAKOU, K. et al. Geospatial environmental techno-economic assessment of pretreatment technologies for bioethanol production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 187, n. 113743, p. 113743, 2023.

VÁSQUEZ, M. P. et al. Enzymatic hydrolysis optimization to ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 137–140, n. 1–12, p. 141–153, 2007.

VILELA, D. **Análise da produção de celulasas e beta glicosidase produzidas por *Streptomyces* sp.** Goiânia, 2013

VIRI, N. **Raízen assina contrato de € 3,3 bi de E2G com a Shell**. 2024, Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/transicao-energetica/biocombustiveis/raizen-assina-contrato-de-e-33-bi-de-e2g-com-a-shell>. Acesso em: 19 jan. 2025.

WANG, X. et al. Techno-economic assessment of poly-generation pathways of bioethanol and lignin-based products. **Bioresource technology reports**, v. 17, n. 100919, p. 100919, 2022.

WILSON, G. Sugarcane bagasse saccharification by enzymatic hydrolysis using endocellulase and β -glucosidase immobilized on different supports. **Catalysts**, v. 11, n. 3, p. 340, 2021.

WU, B. et al. Current status and future prospective of bio-ethanol industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, n. 111079, p. 111079, 2021.

WYMAN, C. E. Biomass ethanol: technical progress, opportunities, and commercial challenges. **Annual review of energy and the environment**, p. 189–226, 1999.

XU, F. Highly Efficient Production of Cellulosic Ethanol from Poplar Using an Optimal C6/C5 Co-Fermentation Strain of *Saccharomyces cerevisiae*. **Microorganisms**, v. 12, n. 6, p. 1174, 2024.

YOHANNAN, B. K. et al. Distiller's spent grains: a substrate for bioethanol? Em: WALKER, G. M.; HUGHES, P. S. (Eds.). **Distilled Spirits**. Nottingham, UK: Nottingham University Press, 2012. p. 147–154.

YUAN, X. Modified simultaneous saccharification and co-fermentation of DLC pretreated corn stover for high-titer cellulosic ethanol production without water washing or detoxifying pretreated biomass. **Energy**, v. 247, p. 123488, 2022.

ZHAO, X.; CHENG, K.; LIU, D. Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 82, n. 5, p. 815–827, 2009.

WAKELYN, P. J. et al. **Cotton fiber chemistry and technology**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.