

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MURILO DOS SANTOS

**PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA
GERAÇÃO (E2G)**

São Carlos
2025

MURILO DOS SANTOS

PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (E2G)

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

Orientador: Prof Fábio Bentes Freire.

São Carlos
2025

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui foi um verdadeiro desafio, aprendizados e crescimento. E, sinceramente, esse trabalho não teria nem a metade do significado sem a ajuda e o carinho de pessoas especiais que estiveram comigo nessa jornada. Quero começar agradecendo à minha família: meu pai, Valdemir, por sempre me lembrar de focar no que realmente importa para mim e nunca deixar de fazer o bem para os outros, sempre mantendo meus valores em mente. Minha mãe, Renata, que me dá amor incondicional, me empurra para a frente nos momentos difíceis e acredita em mim, mesmo quando eu estou na dúvida, e minha irmã, Amanda, que sempre sabe como me animar quando estou pra baixo, me escuta e dá conselhos quando as coisas ficam complicadas. Vocês foram minha base e meu lugar seguro em todas as horas.

Meus profundos agradecimentos aos meus amigos Felipe e Leandro. Durante essa jornada, eles se tornaram mais do que amigos; viraram minha segunda família. Eu sei que posso contar com eles para tudo, desde risadas até os desabafos mais profundos. Esses caras tornaram a faculdade muito mais leve, divertida e produtiva. Minha gratidão para vocês é eterna.

Não posso deixar de agradecer alguns professores incríveis que, mesmo que eu não tenha tido tanto contato, tornaram até as aulas mais chatas em momentos proveitosos. Eles realmente se importavam e dominavam o assunto, servindo como grandes referências. Quero citar a Maria do Carmo, o Fábio Freire, a Vádila Bettega, o Wu Hong Kwong, André Bernardo e Thiago Faggion Pádua.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Fábio Freire. Ele não é só um dos melhores professores que eu já tive, mas também um orientador excepcional. Com paciência e sabedoria, ele guiou todo esse trabalho com firmeza e sensibilidade. A orientação dele foi essencial para eu conseguir desenvolver este projeto.

Gostaria de agradecer aos profissionais e colegas que, de alguma forma, ajudaram neste trabalho, seja com dicas, materiais ou palavras de apoio.

E, por último, queria agradecer a mim mesmo por não ter desistido, mesmo nos momentos mais difíceis. Por continuar acreditando e dando o meu melhor em cada passo. Essa conquista é também um símbolo de superação.

A todos vocês, meu agradecimento sincero e profundo.

RESUMO

O etanol de segunda geração (E2G), também chamado de bioetanol, etanol verde ou etanol celulósico, é um biocombustível avançado, feito a partir dos resíduos restantes do processo de fabricação do etanol comum (o etanol de primeira geração, E1G) e do açúcar. É um produto que usa matéria-prima de baixo impacto ambiental que seria descartada e que tem excelente ganho logístico. Quimicamente, o etanol de segunda geração (E2G) é como o etanol de primeira geração (E1G), a grande diferença está na forma de produzi-los, que utiliza biomassa vegetal, reaproveitando resíduos vegetais, como palha, folhas, bagaço, cavaco, entre outros. A produção de etanol de segunda geração acontece por um processo altamente tecnológico de pré-tratamento da biomassa, hidrólise e posteriormente fermentação e dentre as vantagens desse processo de produção, temos: O aproveitamento desses resíduos, como bagaço e palha de cana, restos de milho, palha de trigo, entre outros, que normalmente seriam descartados ou queimados, contribuindo para a economia circular, transformando resíduos em energia renovável, promovendo o uso eficiente dos recursos e reduzindo o desperdício, tal processo também apresenta um maior rendimento por hectare, ou seja, produz mais etanol por área cultivada, sem a necessidade de expandir plantações, o que ajuda a preservar áreas de floresta e outros ecossistemas, fortalecendo a matriz energética limpa e renovável e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Por fim, contribui na redução de emissões de gases do efeito estufa, pois sua produção emite até 90% menos CO₂ em comparação com combustíveis fósseis, e menos do que o etanol de primeira geração. Atualmente tal processo de produção é considerado de alto custo devido a conversão da celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis ser tecnicamente complexo e exige o uso de enzimas ou processos termoquímicos ainda caros e apesar dos avanços, a eficiência da conversão ainda é menor que a do etanol de 1ª geração, o que afeta a rentabilidade da produção, porém, analisando perspectivas futuras, espera-se que os custos comecem a cair com a maturação da tecnologia e ganho de escala, além do impulso em relação a incentivos fiscais e a demanda por combustíveis mais limpos. A produção de E2G pode ser fundamental para países que buscam metas de descarbonização e uma transição energética mais verde. Em resumo, pode-se concluir que, o etanol de segunda geração é considerado uma solução promissora para os desafios energéticos globais, promovendo o uso mais eficiente da biomassa e reforçando o papel do Brasil como líder mundial na produção de biocombustíveis.

Palavras-chave: E2G, Etanol, Produção, Processo, Sustentável, Resíduos, Impacto Ambiental, Biocombustíveis.

ABSTRACT

Second-generation ethanol (2G Ethanol), also known as bioethanol, green ethanol, or cellulosic ethanol, is an advanced biofuel made from the residual materials left over from the production of conventional ethanol (first-generation ethanol) and sugar. It is a product that utilizes raw materials with low environmental impact that would otherwise be discarded, offering excellent logistical advantages. Chemically, second-generation ethanol (2G Ethanol) is the same as first-generation ethanol (1G); the main difference lies in the production method, which uses plant biomass, repurposing agricultural residues such as straw, leaves, bagasse, wood chips, and others. The production of second-generation ethanol involves a highly technological process including biomass pretreatment, hydrolysis, and subsequent fermentation. Among the advantages of this production process are: the utilization of residues such as sugarcane bagasse and straw, corn leftovers, wheat straw, and more, which would normally be discarded or burned. This contributes to the circular economy by transforming waste into renewable energy, promoting efficient use of resources, and reducing waste. The process also yields a higher output per hectare, meaning more ethanol is produced per cultivated area without the need to expand plantations, which helps preserve forests and other ecosystems. It strengthens a clean and renewable energy matrix and reduces dependence on fossil fuels. Finally, it contributes to the reduction of greenhouse gas emissions, as its production emits up to 90% less CO₂ compared to fossil fuels, and even less than first-generation ethanol. Currently, this production process is considered high-cost because the conversion of cellulose and hemicellulose into fermentable sugars is technically complex and requires the use of enzymes or thermochemical processes that are still expensive. Despite technological advances, the conversion efficiency is still lower than that of first-generation ethanol, which affects production profitability. However, looking at future prospects, costs are expected to decrease as the technology matures and scales up, in addition to benefits from tax incentives and the growing demand for cleaner fuels. The production of 2G Ethanol can be crucial for countries aiming to meet decarbonization targets and achieve a greener energy transition. In summary, second-generation ethanol is considered a promising solution to global energy challenges, promoting more efficient use of biomass and reinforcing Brazil's role as a global leader in biofuel production.

Keywords: 2G Ethanol, Ethanol, Production, Process, Sustainable, Residues, Environmental Impact, Biofuel.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 - Evolução da produção de biocombustíveis no mundo.....	13
Figura 2 - Comparação entre a produtividade de São Paulo e a média do Brasil.....	16
Figura 3 - Estrutura da biomassa.....	24
Figura 4 - Modelo de esquema das etapas da produção do etanol de 2 geração.....	28
Figura 5 – Estrutura da biomassa após processo de pré-tratamento.....	31
Figura 6 – Processos de pré-tratamento da biomassa.....	32
Figura 7 – Fluxograma da rota produção de etanol 2G (fermentação separada).....	34
Figura 8 – Fluxograma da rota para produção de etanol 2G (co-fermentação).....	35
Figura 9 – Imagem representativa de um filtro rotativo.....	36
Figura 10 – Imagem representativa de um filtro tipo prensa.....	37
Figura 11 – Estrutura química dos compostos básicos da lignina.....	42
Figura 12 – Fluxograma de produtos originados da lignina.....	43
Figura 13 – Fermentação alcoólica.....	44
Tabela 1 – Comparativo entre fermentações de 1ª e 2ª gerações.....	47
Tabela 2 – Premissas econômicas utilizadas na avaliação financeira.....	51
Figura 14 – Método de alocação para cálculo do custo do etanol.....	53
Figura 15 – Estimativas de investimentos dos cenários (valores em R\$ milhões).....	54

LISTA DE SIGLAS E NOMES

E2G - Etanol de segunda geração

E1G - Etanol de primeira geração

2G - Segunda geração

1G - Primeira geração

GEE - Gases do efeito estufa

P&D+I - Investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação

SP - São Paulo

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

pH - Potencial hidrogeniônico

ILPF - Integração lavoura-pecuária-floresta

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

R\$ - Reais

PROPEQ - Projeto e Pesquisa em Engenharia Química

CBP - Bioprocesso Consolidado

SSCF - Sacarificação e Co-fermentação Simultâneas

SHF - Hidrólise e Fermentação em etapas separadas

5-HMF - 5-hidroximetilfurfural

η_{cel} - Eficiência da célula

C5 - Caldo rico em xilose (5 carbonos)

C6 - Caldo rico em glicose (6 carbono)

H₂SO₄ - Ácido sulfúrico

HCl - Ácido clorídrico

H₃PO₄ - Ácido fosfórico

NADH - Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo Reduzido

ATP - Adenosina Trifosfato

BVC - Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar

IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

MLC - Material lignocelulósico

Reporto - Regime Tributário para Incentivo à Modernização e à Ampliação da Estrutura Portuária

Repenec - Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura

CSLL - Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

SUMÁRIO

2. OBJETIVOS.....	10
3. BIOCOMBUSTÍVEIS.....	11
3.1 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO.....	11
3.2 PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL.....	12
4. CANA DE AÇÚCAR.....	14
5. ETANOL.....	16
5.1 ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO (E1G).....	16
5.2 PRODUÇÃO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO (E1G).....	18
5.3 ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (E2G).....	21
5.3.1 ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO DO (E2G).....	21
5.3.2 OBTENÇÃO DO E2G.....	23
5.3.3 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA.....	25
5.3.4 CELULOSE.....	25
5.3.5 HEMICELULOSE.....	26
5.3.6 LIGNINA.....	26
5.4 ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO E2G.....	27
5.4.1 PRÉ-TRATAMENTO.....	28
5.4.2 SEPARAÇÃO C5/C6.....	32
5.4.3 HIDRÓLISE.....	37
5.4.4 SEPARAÇÃO DA LIGNINA.....	40
5.4.5 FERMENTAÇÃO.....	42
6. IMPLEMENTAÇÃO DO ETANOL DE 2ª GERAÇÃO.....	46
7. INVESTIMENTO INDUSTRIAL.....	48
8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	53
9. SUGESTÕES DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O ETANOL 2G NO BRASIL.....	55
10. CONCLUSÃO.....	57
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58

1. INTRODUÇÃO

Com a crise climática, vem surgindo uma crescente demanda por fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Nesse caso os biocombustíveis aparecem como uma alternativa interessante, com o etanol sendo um dos mais promissores, especialmente no Brasil, que apresenta uma excelente produção a partir da cana-de-açúcar. O etanol de primeira geração (1G), obtido por meio da fermentação dos açúcares da cana-de-açúcar, consolidou-se como uma importante solução energética desde a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), na década de 1970 (GOLDEMBERG et al., 2008), porém a produção tradicional de etanol, no qual é chamado de etanol de primeira geração (1G), acaba tendo algumas desvantagens, como não aproveitar tudo que a biomassa tem a oferecer e a competição com a produção de alimentos (REIS et al., 2016).

Apesar de seus benefícios ambientais e socioeconômicos, a produção de etanol 1G apresenta também apresenta limitações estruturais que comprometem sua sustentabilidade em longo prazo. Entre os principais desafios estão a utilização parcial da biomassa (apenas os açúcares solúveis do caldo da cana são aproveitados), o uso intensivo de insumos agrícolas e a grande demanda hídrica (CHUM et al., 2011; FOLEY et al., 2011). Além disso, a crescente pressão para reduzir ainda mais as emissões de GEE e ampliar a eficiência do uso da terra e da biomassa reforça a necessidade de evoluir para modelos produtivos mais eficientes e menos impactantes.

É nesse contexto que se insere o etanol de segunda geração (E2G), também conhecido como etanol celulósico, produzido a partir da fração lignocelulósica da biomassa, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, subprodutos abundantes e muitas vezes subutilizados no processo 1G (SOUZA et al., 2020). Diferentemente do etanol 1G, o etanol 2G permite um aproveitamento mais integral da matéria-prima, aumentando o rendimento por hectare sem necessidade de expandir a área plantada, o que contribui significativamente para a redução da pressão ambiental sobre biomas sensíveis (REIS et al., 2016).

Com isso, torna-se interessante realizar a transição da produção de etanol de primeira para a segunda geração, no entanto, tal transição não é isenta de desafios. A complexidade tecnológica dos processos como o de pré-tratamento e hidrólise da biomassa lignocelulósica, os altos custos de produção, a escala industrial ainda limitada e a necessidade de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D+I) constituem barreiras para sua plena inserção no mercado (MENDEZ et al., 2022). Mesmo assim, avanços recentes na biotecnologia, na engenharia de processos e nas políticas públicas voltadas à

descarbonização, como o programa RenovaBio, têm promovido um ambiente mais favorável à expansão do etanol 2G (MORAES et al., 2018).

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de transição gradual e planejada do modelo baseado exclusivamente no etanol de primeira geração para um sistema integrado que incorpore a produção de etanol de segunda geração. Essa mudança representa não apenas uma resposta aos desafios ambientais globais, mas também uma oportunidade estratégica para o Brasil consolidar sua liderança mundial na produção de biocombustíveis sustentáveis.

Porém, para produção do E2G se enfrenta alguns desafios técnicos e econômicos. A conversão eficiente da biomassa lignocelulósica precisa passar por etapas como pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação, que ainda têm seus obstáculos, principalmente quanto à resistência da biomassa, ao custo das enzimas e à adaptação das leveduras fermentadoras (MENDEZ et al., 2022). Apesar disso, os avanços em biotecnologia e a criação de tecnologias integradas estão tornando a produção industrial do etanol 2G cada vez mais viável, com algumas usinas já em funcionamento no Brasil, como as de Piracicaba (SP) e de São Manoel (SP), que utilizam resíduos da própria lavoura (UNICA, 2023).

O processo de produção do etanol de segunda geração é mais complexo e envolve várias etapas interligadas, desde pré-tratamento da biomassa, com o objetivo de romper a estrutura rígida da lignina e tornar a celulose e a hemicelulose mais acessíveis às enzimas hidrolíticas até a hidrólise enzimática, na qual enzimas específicas convertem os polissacarídeos em açúcares fermentáveis, e por fim a fermentação, que transforma esses açúcares em etanol, geralmente por leveduras geneticamente modificadas para aproveitar diferentes tipos de açúcares, para no final, ser separado e purificado por destilação (SILVA et al., 2020; CHANDEL et al., 2019).

2.OBJETIVOS

Com base no contexto acima descrito, este estudo visou explorar e analisar o processo de produção de etanol de segunda geração, com base em uma ampla literatura acadêmica disponível sobre o assunto. Ao longo do estudo, o processo de produção foi examinado em detalhes, utilizando fontes diversas, incluindo publicações acadêmicas, relatórios do setor e insights de profissionais atuantes na área. A análise abrange o fluxo de trabalho geral da produção, os principais desafios associados à implementação em larga escala e os principais gargalos que atualmente limitam a eficiência do processo. Além disso, este trabalho buscou avaliar potenciais melhorias e delinear perspectivas futuras para o desenvolvimento da produção de etanol de segunda geração.

3. BIOCOMBUSTÍVEIS

3.1 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÃO

No Brasil, a produção de biocombustíveis, em particular o etanol e o biodiesel, tem assumido uma função estratégica tanto no âmbito energético quanto econômico. A experiência do Brasil com o Proálcool, que teve início nos anos 70, é comumente mencionada como um caso bem-sucedido de política pública focada na substituição de combustíveis fósseis (SOUZA; VIEIRA, 2014). Ademais, o uso de biocombustíveis favorece a valorização da agricultura, fomentando o crescimento regional e a criação de postos de trabalho (MACHADO, 2012).

No entanto, a utilização em larga escala de biocombustíveis também leva discussões significativas sobre a disputa por terras agrícolas, a segurança alimentar e os efeitos socioambientais. Portanto, é essencial realizar uma avaliação crítica dos benefícios e desafios ligados à produção e utilização desses combustíveis, levando em conta fatores técnicos, econômicos e ambientais.

Existem diversas classificações para os biocombustíveis, sendo as divisões por gerações as mais frequentes. Os biocombustíveis primários são produzidos a partir de alimentos como milho, cana-de-açúcar e soja. Por outro lado, os de segunda geração são fabricados com resíduos agrícolas, lignocelulose e outros materiais não alimentares, causando um impacto menor na cadeia alimentar. Mais recentemente, os biocombustíveis de terceira e quarta geração, como os produzidos a partir de algas e organismos geneticamente modificados, vêm sendo estudados por seu alto rendimento energético e menor impacto ambiental (CHAVES; LEITE, 2015).

A adoção de biocombustíveis como alternativa energética está intimamente relacionada à sustentabilidade ambiental e energética. No entanto, é preciso considerar todo o ciclo de vida do combustível, da produção à queima, para avaliar seus reais impactos ambientais e socioeconômicos (FARIA et al., 2020).

3.2 PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL

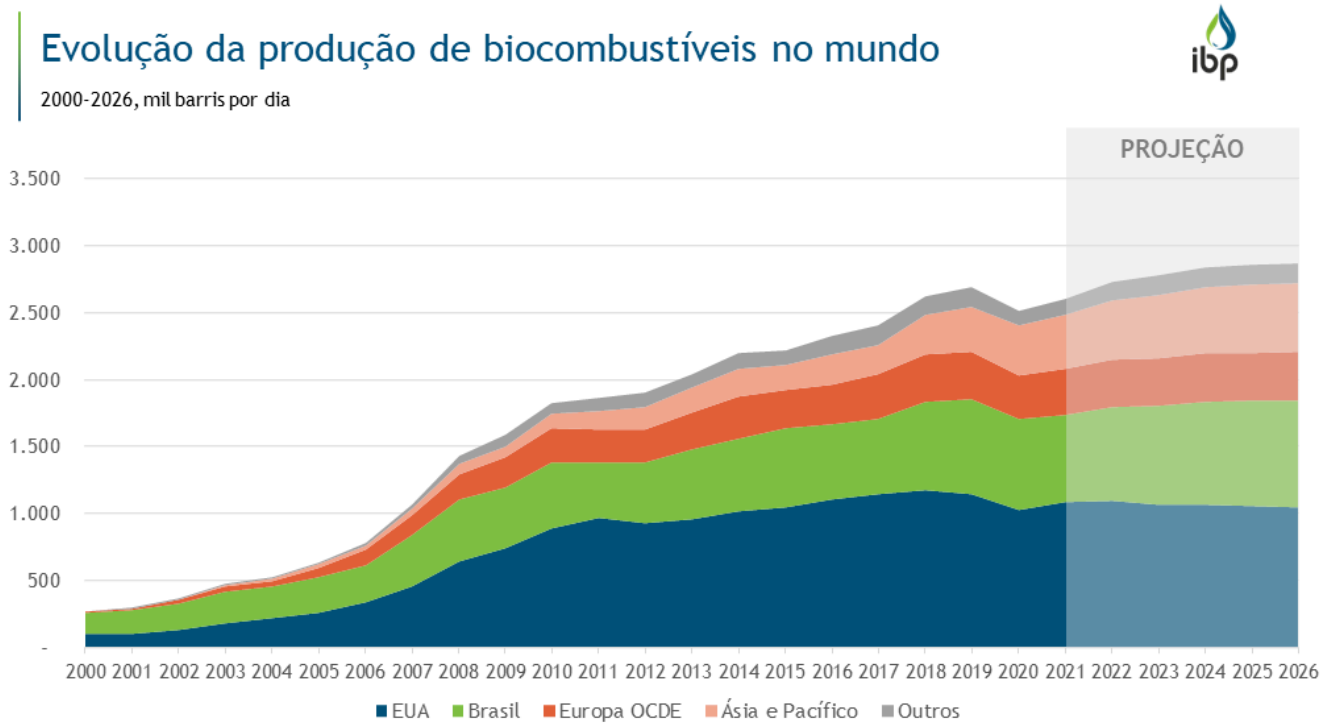
Atualmente, o Brasil ocupa uma posição de destaque na produção de biocombustíveis, sobretudo etanol e biodiesel, devido a sua vasta disponibilidade de recursos naturais e sua experiência adquirida no setor agroenergético ao longo dos anos. O país apresenta uma estrutura estabelecida para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, cuja eficácia energética e balanço de carbono superam os de outros biocombustíveis de primeira geração (UNICA, 2020).

O Brasil consolidou uma infraestrutura robusta de produção, distribuição e consumo de etanol combustível. Atualmente, o uso de veículos flex-fuel e a ampla rede de distribuição permitem ao consumidor escolher entre etanol e gasolina, promovendo competitividade e estabilidade no setor (SOUZA; VIEIRA, 2014).

Além do etanol, o Brasil também se destaca na produção de biodiesel, principalmente a partir de óleos vegetais como soja, mamona e gorduras de animais, contando ainda com o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), criado em 2005, cujo objetivo é conectar a produção desse biodiesel à agricultura familiar, fomentando a inclusão social e o progresso regional (MACHADO, 2012).

Apesar dos avanços, a produção de biocombustíveis no Brasil se depara com obstáculos significativos, tais como a expansão da fronteira agrícola, disputa por territórios destinados à agricultura e os efeitos ambientais ligados à monocultura. Essas questões requerem políticas públicas efetivas e aportes em pesquisa para fomentar um modelo de produção verdadeiramente ecológico.

Figura 1 - Evolução da produção de biocombustíveis no mundo



Atualização - Maio 2022
Fonte: Elaboração IBP com dados IEA

4. CANA DE AÇÚCAR

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) desempenha papel estratégico na matriz agroenergética e na economia brasileira, sendo também insumo fundamental para a produção de açúcar, etanol e bioenergia (SANTOS; PEREIRA, 2018). Originária da Nova Guiné e difundida mundialmente pelos portugueses a partir do século 16, a cana-de-açúcar no Brasil concentra-se sobretudo nas regiões Centro-Sul (São Paulo, Minas Gerais e Paraná) e Nordeste (Alagoas, Pernambuco e Paraíba), onde o clima tropical, a disponibilidade de terras e a infraestrutura logística favorecem altos rendimentos (IBGE, 2020; CONAB, 2021).

Do ponto de vista agrônômico, o cultivo requer solo com textura média a argilosa, pH entre 5,5 e 6,5 e manejo integrado de pragas e doenças para maximizar a produtividade, que pode variar de 80 a 120 t ha⁻¹ em sistemas de dupla colheita (RABELO et al., 2019). A mecanização da colheita e o uso de variedades de ciclo curto têm contribuído para ganhos de eficiência e redução de custos operacionais (EMBRAPA, 2013). Entretanto, desafios ambientais, como o uso intensivo de água, a emissão de gases de efeito estufa no processo de queima da palha e a degradação de solos, demandam práticas sustentáveis, como a moderna “cana verde”, colheita sem queima prévia, e a integração lavoura–pecuária–floresta (ILPF) (OLIVEIRA; ROCHA, 2021).

A sustentabilidade econômica da cadeia depende também da valorização de subprodutos, tais como o bagaço para geração de energia elétrica em usinas termoelétricas, a vinhaça e o chorume para biofertilizantes, bem como a exploração de novos bioprodutos (bioplásticos, proteínas microbianas) (FAO, 2022).

A colheita das últimas safras de cana-de-açúcar no Brasil tem se caracterizado por dois grandes vetores de transformação: a plena adoção da colheita mecanizada e o avanço do sistema “cana verde”. Segundo dados da CONAB (2022), o índice de mecanização elevou-se de cerca de 80 % em 2015/16 para mais de 95 % na safra 2021/22, reduzindo significativamente a exposição do trabalhador a condições insalubres e melhorando a uniformidade de corte e o aproveitamento do colmo. Paralelamente, o sistema de colheita sem queima, que em 2010 representava menos de 30 % da área colhida, já ultrapassou 85 % em 2022/23, refletindo o fortalecimento de políticas ambientais e as exigências de certificação sustentável (IBGE, 2023).

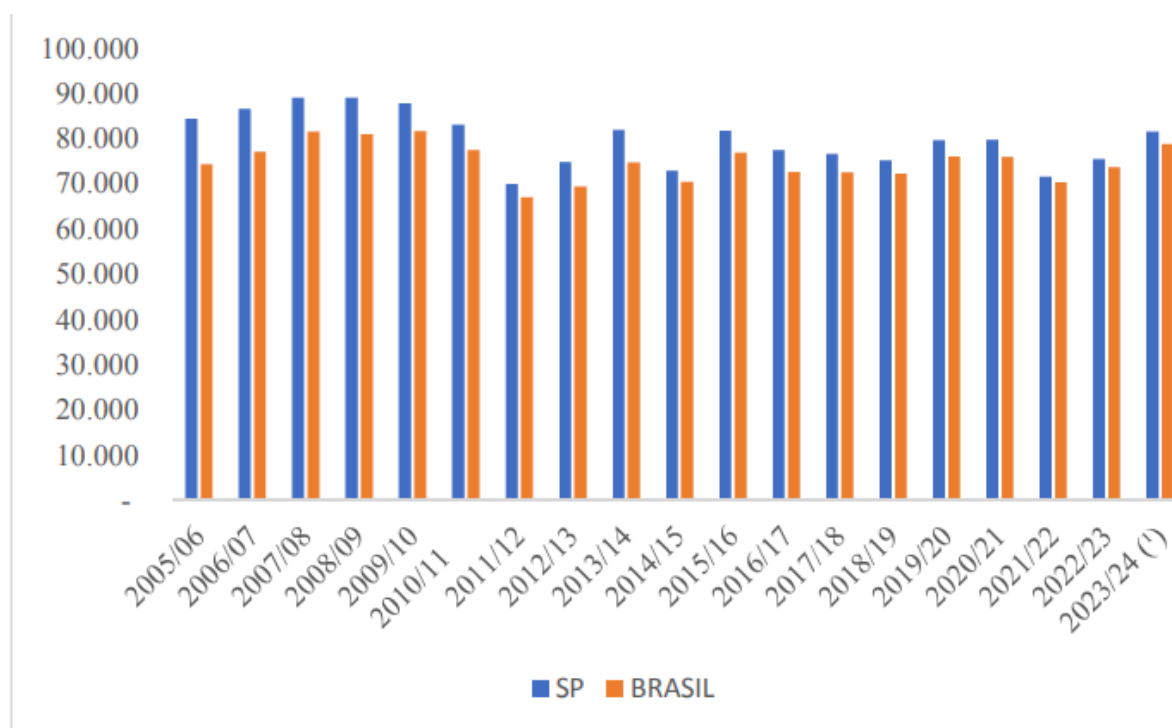
Essas mudanças tiveram impactos diretos na produtividade e nos custos operacionais. (Rabelo et al. 2019) observaram que, com a mecanização total e o manejo adequado dos resíduos (palha e folhas), a produtividade média passou de 70 t ha⁻¹ em 2015/16 para cerca de 85 t ha⁻¹ em 2021/22. Além disso, o fim da queima prévia reduziu as emissões de material particulado em até 90 % e preservou a cobertura do solo, contribuindo para a manutenção de matéria orgânica e controle de erosão (OLIVEIRA; ROCHA, 2021).

Entretanto, a expansão da mecanização exigiu investimentos elevados em máquinas, instalações e formação de mão de obra para operação e manutenção. Estima-se que cada colhedora autopropelida tenha custo médio de R\$ 1,2 milhão, acarretando uma curva de capital mais acentuada para pequenos e médios produtores (SILVA; MOTA, 2020). Nesse contexto, cooperativas e arranjos agroindustriais vêm se consolidando como modelos de compartilhamento de máquinas e serviços, viabilizando a adoção das tecnologias de forma mais equitativa e eficiente.

Ao longo de mais de 500 anos desde que a cana-de-açúcar chegou ao território brasileiro, o estado de São Paulo consolidou-se como a principal região produtora. Hoje, são aproximadamente 5,6 milhões de hectares destinados ao cultivo, de onde se obtêm cerca de 442,3 milhões de toneladas de matéria prima, resultando em um faturamento de R\$ 27,6 bilhões (INVESTSP, 2023). Essa área representa 55 % do total cultivado no país, segundo o levantamento da Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE.

Boa parte desse desempenho se deve à elevada fertilidade dos solos paulistas, ao regime pluviométrico estável e às temperaturas ideais, além dos avanços obtidos pelas pesquisas públicas e privadas. Um exemplo é a variedade SP81-3250, criada no Centro de Tecnologia Canavieira, em Piracicaba, e hoje a mais difundida em todo o Brasil. No que se refere à produtividade, a Figura 2 fornece índices do estado de São Paulo em comparação com a média nacional, no período de 2006 a 2024.

Figura 2 - Comparação entre a produtividade de São Paulo e a produtividade média do Brasil



Fonte: Conab (2013)

5. ETANOL

5.1 ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO (E1G)

Atualmente, a produção do etanol de cana-de-açúcar demanda menos de 1% das terras cultiváveis do país, podendo facilmente ser expandida sem representar competição com a produção de alimentos (UNICA, 2011). Ao longo do desenvolvimento do etanol de primeira geração, diversas frentes de pesquisa e inovação podem ser exploradas para aprimorar o processo, aumentar o rendimento e diminuir custos. Entre as principais estratégias, destacam-se: 1) aplicação de melhores práticas agrônômicas; 2) desenvolvimento de melhores variedades para novas áreas e de cultivares mais produtivas e resistentes; 3) seleção de linhagens e melhoria das características de micro-organismos que garantam alta eficiência fermentativa; 4) maior eficiência de conversão e resistência ao álcool (PACHECO, 2010). Essas linhas de ação, quando conduzidas de forma integrada, têm o potencial de incrementar significativamente a eficiência global da cadeia produtiva de etanol, fortalecendo sua competitividade frente aos combustíveis fósseis e contribuindo para a sustentabilidade energética.

O etanol pode ser produzido a partir de qualquer matéria-prima vegetal que apresenta concentrações relevantes de açúcares ou amido. Na indústria canavieira, o açúcar (sacarose) é extraído pelo processo de moagem mecânica ou por difusão, gerando um caldo rico em açúcares pronto para ser fermentado (MARINHO, 2017).

O álcool etílico propriamente dito resulta da fermentação desses açúcares ou, alternativamente, de síntese química em laboratório. No mercado de combustíveis, distingue-se o álcool hidratado, comercializado nos postos e composto por cerca de 96% de etanol e 4% de água, e o etanol anidro, utilizado como aditivo na gasolina, que apresenta pureza mínima de 99,6% (MONTEIRO; ROSA; REIS, 2016).

O álcool hidratado e o álcool anidro diferem, sobretudo, no teor de água e na aplicação final como combustível. A seguir, apresentam-se suas principais características, usos e impactos:

- Composição e pureza;

Álcool hidratado: contém cerca de 4% de água em volume, resultando em teor aproximado de 96% (v/v) de etanol. Essa pequena fração de água facilita o armazenamento e o manuseio, mas reduz ligeiramente o poder calorífico do combustível (MONTEIRO; ROSA; REIS, 2016).

Álcool anidro: possui pureza mínima de 99,6% (v/v) de etanol, com teor de água inferior a 0,4%. Essa elevada pureza assegura uma mistura homogênea com a gasolina, sem risco de separação faseada (MARINHO, 2017).

- Destinação e uso veicular;

Hidratado: fornecido diretamente aos consumidores em postos de combustível para uso em veículos leves com motores destinados ao álcool. Sua adoção não exige adaptações mecânicas adicionais, sendo largamente utilizado em frotas de automóveis e motocicletas (SILVA; MOTA, 2020).

Anidro: adicionado à gasolina em proporções regulamentadas (geralmente entre 20% e 27%), atendendo à especificação da mistura gasohol, melhora a octanagem do combustível e reduz a emissões de monóxido de carbono (IBAMA, 2021).

- Propriedades de desempenho

Poder calorífico: o anidro apresenta valor calorífico superior ao hidratado, em função do menor teor de água, assegurando melhor desempenho em rotações elevadas (FAO, 2022).

Corrosividade e estabilidade: a presença de água no hidratado exige tanques e sistemas com materiais mais resistentes à corrosão; já o anidro, com menos água, tende a reduzir riscos de micro-organismos e depósitos no sistema de combustível (OLIVEIRA; ROCHA, 2021).

- Impactos ambientais e regulatórios

Emissões veiculares: ambas as modalidades reduzem emissões de CO₂ em comparação à gasolina pura, mas o anidro intensifica a eficiência da mistura, diminuindo particulados e hidrocarbonetos não queimados (FAO, 2022).

Políticas públicas: a Resolução CONAMA nº 17/2006 e o Programa Brasileiro de Biocombustíveis (RenovaBio) estabelecem metas de blend e certificações de conteúdo renovável, garantindo o uso combinado de anidro e hidratado segundo padrões ambientais e de eficiência energética (MCTI, 2019).

5.2 PRODUÇÃO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO (E1G)

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar envolve várias etapas integradas, desde o recebimento da matéria-prima até a obtenção do etanol anidro ou hidratado. Conforme detalhado no PROPEQ (2020), tal processo articula-se em oito etapas principais, cada uma com objetivos claros, equipamentos dedicados e parâmetros de controle específicos. Apesar de existirem pequenas diferenças entre algumas produções, existem etapas fundamentais presentes em quase todas elas, das quais destacam-se:

1. Lavagem;

Com a chegada da cana na usina, é necessário realizar a sua lavagem para retirada de impurezas mais grosseiras, como areia, terra e poeira. Logo em seguida, podendo ou não, ser picada e passada também por um eletroímã, a fim de retirar possíveis resquícios metálicos.

2. Moagem;

Em seguida, a matéria-prima é conduzida ao setor de moagem, onde a cana-de-açúcar é processada em trituradores, originando um extrato líquido denominado caldo-de-moagem ou melado. Desse total, cerca de 70 % da massa inicial é incorporada ao caldo, enquanto os aproximadamente 30 % remanescentes, não extraídos pelo processo, constituem o bagaço. Este subproduto pode ser aproveitado como fonte de geração de energia na própria usina.

3. Peneiramento;

Uma vez concluída a moagem da cana-de-açúcar, procede-se ao peneiramento do caldo resultante, visto que este ainda contém impurezas originárias das etapas anteriores. Inicialmente, adotam-se métodos de separação mecânica para remoção das partículas sólidas residuais, valendo-se de peneiras vibratórias de malha adequada e de hidrociclones. Esses dispositivos promovem a clarificação preliminar do caldo, assegurando maior eficiência nas etapas subsequentes de tratamento e concentração.

4. Caleação;

Em seguida, o caldo é conduzido ao tanque de calagem, onde recebe adição de leite de cal (solução de hidróxido de cálcio) com o objetivo de promover a floculação e a decantação das impurezas suspensas. Esse procedimento eleva o pH do caldo, reduzindo sua acidez e, conseqüentemente, a corrosão dos equipamentos, bem como inibindo o crescimento de microrganismos indesejáveis.

Entretanto, o mesmo ajuste de pH pode ocasionar depleção de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das leveduras utilizadas na etapa fermentativa. Por essa razão, torna-se imprescindível o monitoramento contínuo do pH, mantendo-o preferencialmente na faixa de 5,6 a 5,8, conforme indicam estudos acerca do equilíbrio entre eficiência na clarificação e viabilidade da biomassa microbiana fermentadora.

5. Aquecimento;

Adiante, procede-se ao aquecimento do caldo a temperaturas entre 103 °C e 105 °C, com o propósito de eliminar microrganismos contaminantes sensíveis ao calor. Após o escaldamento, o caldo é encaminhado ao sistema de decantação, etapa na qual ocorre a sedimentação das partículas ainda em suspensão, resultando em um líquido clarificado e apto às fases subsequentes de concentração e fermentação.

6. Decantação e resfriamento;

Após a decantação, o caldo clarificado é submetido a resfriamento até aproximadamente 30 °C, condição ideal para sua alimentação nas dornas de fermentação. Em seguida, procede-se à formulação do mosto, que envolve:

- Ajuste da concentração de açúcares por meio de diluição controlada;
- Correção do pH para a faixa de 4,5 a 5,0;
- Eventual adição de antissépticos para prevenir contaminações.

Concluída essa etapa, realiza-se o preparo do fermento (pé-de-cuba), constituído pelo inóculo inicial de leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, responsável por iniciar o processo fermentativo. Esse procedimento assegura elevada viabilidade celular e repetibilidade nos ciclos de produção.

7. Fermentação;

Em seguida, realiza-se a alimentação das dornas de fermentação com o mosto previamente preparado e o fermento, ocasião em que ocorre a síntese de etanol e a liberação de dióxido de carbono (CO_2). A fermentação alcoólica é promovida pelas leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, responsáveis pela conversão dos açúcares em etanol. O processo, cuja duração varia conforme o volume da dorna, normalmente entre 6 e 10 horas, gera o vinho bruto ou vinho fermentado. Esse efluente contém cerca de 10 % (v/v) de etanol, além de células de levedura e resíduos de açúcar não fermentado.

8. Destilação;

Na sequência, torna-se indispensável a separação do etanol contido no vinho bruto, pois o álcool constitui o produto desejado. Industrialmente, essa etapa é realizada em duas operações de destilação sucessivas:

- Depuração do vinho

Nesta primeira coluna, o objetivo é remover impurezas voláteis, tais como aldeídos e ésteres. O vinho bruto é aquecido para que frações de menor e maior ponto de ebulição sejam separadas. Ao final do processo, obtêm-se:

- a. vinho depurado, adequado para etapas posteriores;
- b. álcool bruto, fração intermediária com teor alcoólico inferior ao desejado para o produto.

- Retificação

O vinho depurado segue para a segunda coluna, onde ocorre a fração de interesse (flegma) — mistura de água e etanol com concentração próxima ao especificado para o etanol hidratado ou à alimentação da desidratação e a fração pesada, denominada vinhaça. A vinhaça é um resíduo rico em matéria orgânica que, embora amplamente utilizado na fertirrigação das lavouras de cana-de-açúcar, exige cuidado quanto ao seu manejo, dado o elevado potencial de impacto ambiental.

Após a coleta da flegma, ainda é necessário retificá-lo, a fim de separar os álcoois superiores e levar sua concentração até o grau alcoólico do etanol hidratado (97%). Com isso, leva-se o álcool à condição de etanol anidro (99,9%) na qual ele pode ser adicionado à gasolina comercializada nos postos, elevando sua octanagem.

Além das etapas de extração e purificação do etanol, torna-se fundamental abordar o destino dos resíduos sólidos oriundos do processo de primeira geração. O bagaço e as palhas da cana-de-açúcar representam cerca de 25–30 % da massa da matéria-prima e podem assumir duas rotas principais de aproveitamento. Geração de energia elétrica: A combustão direta em caldeiras industriais converte o bagaço e as palhas em vapor de alta pressão, ou a produção de etanol de segunda geração (E2G): Após pré-tratamento (lítico ou sólido), a fração lignocelulósica é submetida a hidrólise enzimática ou ácida, liberando açúcares fermentescíveis para posterior conversão em etanol.

Essa integração entre etapas de produção e aproveitamento de subprodutos potencializa a sustentabilidade do processo, reduzindo a necessidade de insumos externos e mitigando impactos ambientais associados à destinação inadequada de resíduos.

5.3 ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (E2G)

5.3.1 ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO DO (E2G)

Um modo possível de se operar um processo de produção de etanol de segunda geração seria pelo denominado Bioprocessamento Consolidado (Consolidated Bioprocess – CBP) que integra, em um único reator, tanto a síntese das enzimas hidrolíticas quanto a fermentação dos açúcares provenientes da celulose e da hemicelulose, utilizando um mesmo microrganismo para todas as etapas (TAHERZADEH & KARIMI, 2007). Para o desenvolvimento de cepas aptas a essa abordagem, seguem-se duas rotas principais:

- Estratégia 1: engenharia de microrganismos naturalmente fermentadores de etanol, conferindo-lhes atividade de celulasas e/ou xilanasas, de modo a promover a hidrólise enzimática da fração lignocelulósica.
- Estratégia 2: aprimoramento de produtores enzimáticos (celulasas), dotando-os de capacidade fermentativa eficiente para geração de etanol.

Porém a desvantagem desse método é que embora diversos estudos reportem organismos que combinam ambos os perfis, ainda não existem cepas ou consórcios microbianos capazes de alcançar simultaneamente altos níveis de produção de enzimas e de etanol em concentrações comerciais (LYND, 2002; LYND et al., 2005)

A Sacarificação e Co-fermentação Simultâneas (Simultaneous Saccharification and Cofermentation – SSCF) consiste em um processo unificado no qual a ruptura enzimática da celulose (sacarificação) e a fermentação de pentoses e hexoses ocorrem simultaneamente em um único reator. Diferentemente do seguinte método a ser abordado SSF clássico, em que apenas as hexoses são fermentadas no reator principal e as pentoses requerem um segundo reator com microrganismo distinto, o SSCF demanda a utilização de cepas geneticamente modificadas capazes de fermentar ambos os tipos de açúcar em paralelo (LAWFORD & ROUSSEAU, 1998; HAMELINCK et al., 2005).

Neste esquema, a hidrólise da fração lignocelulósica da biomassa, pré-tratada previamente para solubilização da hemicelulose, recebe celulasas produzidas em etapa anterior, enquanto as leveduras ou bactérias co-fermentadoras convertem imediatamente os açúcares liberados em etanol (TEIXEIRA et al., 2000). Essa integração de reações reduz o tempo total de processo, minimiza inibições produzidas pelo acúmulo de açúcares e otimiza a produtividade de etanol.

Por fim, o método clássico e mais viável economicamente, visando maximizar a recuperação de açúcares tanto da hemicelulose quanto da celulose presentes em resíduos lignocelulósicos, o processo de produção de etanol de segunda geração denominado (Separated Hydrolysis and Fermentation – SHF), no qual, adota a estratégia de Hidrólise e Fermentação em etapas separadas.

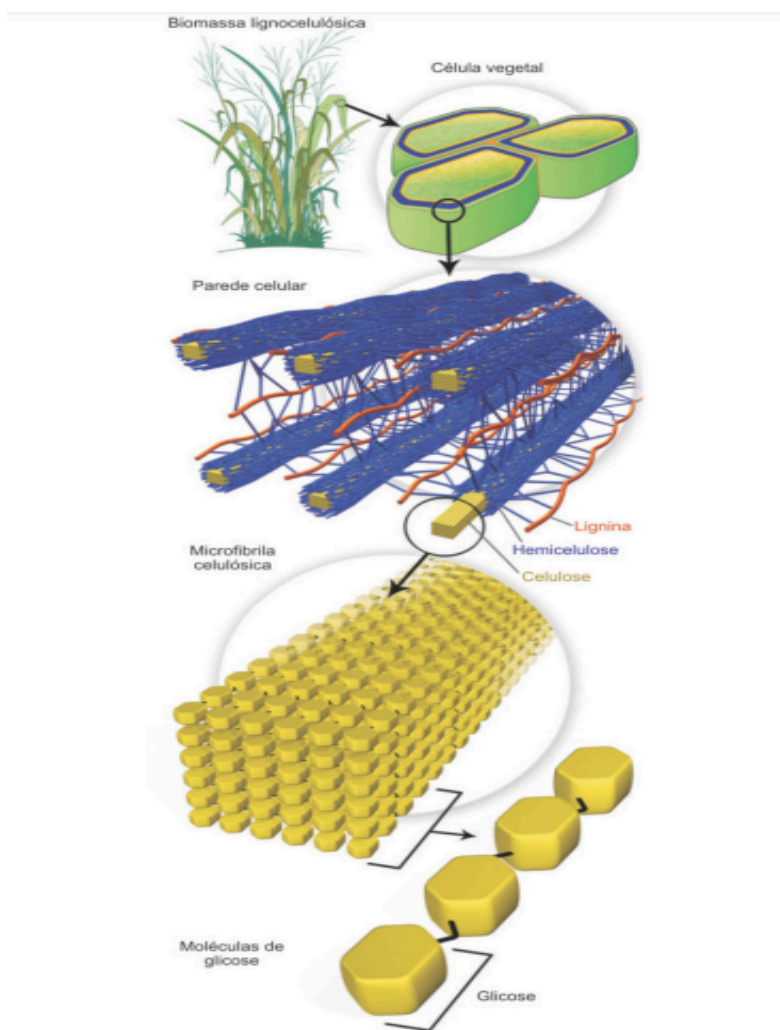
Nesse processo, após o pré-tratamento que solubiliza a hemicelulose, realiza-se primeiramente a hidrólise enzimática da fração celulósica, empregando celulasas produzidas em processos dedicados. Paralelamente, os oligossacarídeos liberados da hemicelulose são direcionados a um fermentador distinto, onde são convertidos em etanol. O resíduo sólido resultante dessa etapa de pré-hidrólise, denominado lignina, segue então para a etapa de hidrólise da celulose. Essa separação de fases permite otimizar as condições químicas e operacionais de cada reação, elevando o rendimento global de etanol (PEREIRA JR. et al., 2008). Sendo sua vantagem, permitir trabalhar em condições ótimas para as celulasas, em torno de 45 a 50°C, e a desvantagem, a possibilidade de inibição do complexo celulósico pelos açúcares liberados na hidrólise, principalmente celobiose e glicose que se acumulam no meio, conferindo uma hidrólise incompleta da celulose e rendimentos não muito elevados.

Vale ressaltar que, independentemente da rota tecnológica, é importante notar a relevância que o custo da biomassa tem sobre o custo final do etanol. Em geral, nas estimativas realizadas para os países do hemisfério norte, o custo da biomassa representa cerca de 40% do custo do etanol, e grande parte das reduções do custo do bioetanol para o futuro se baseia na redução do custo da biomassa. Evidentemente, isso cria grandes expectativas quando se considera algumas regiões do planeta, para as quais existem opções de biomassa com custos bem mais baixos, como por exemplo, a cana-de-açúcar no Brasil, ou de resíduos agroflorestais, como os da indústria de celulose (BNDES, 2008).

5.3.2 OBTENÇÃO DO E2G

Uma das principais diferenças entre o etanol tradicional e o E2G está na matéria-prima empregada. Enquanto o primeiro utiliza a cana-de-açúcar, o etanol de segunda geração aproveita o bagaço e a palha da cana, resíduos compostos por biomassa lignocelulósica. Compreender a estrutura e a composição dessa biomassa é essencial para entender o processo de produção do etanol de segunda geração. A Figura 3 ilustra em detalhes a arquitetura da biomassa.

Figura 3 - Estrutura da biomassa



Fonte: SANTOS, Fernando A.; QUEIRÓZ, José H. de; COLODETTE, Jorge L.; et al.

A biomassa lignocelulósica é constituída predominantemente por três frações: celulose (cerca de 40 %), hemicelulose (28 %) e lignina (17 %), além de componentes menores. No bagaço da cana-de-açúcar, as hemiceluloses representam entre 26 % e 30 % do material. Quando submetidas à hidrólise ácida, elas se quebram em xilose, arabinose e furfural (PATURAU, 1989). As hemiceluloses estão relacionadas com as fibras de celulose e apresentam cadeias ramificadas formadas por diferentes monossacarídeos (FENGEL & WEGENER, 1989). Essas cadeias incluem hexoses (glicose, manose e galactose), pentoses (xilose e arabinose) e, em quantidades variáveis, ácidos urônicos e desoxi-hexoses (CANETTIERE, 2004). No bagaço de cana, a xilose é o açúcar presente em maior proporção nas hemiceluloses. Após hidrólise, as concentrações típicas dessas pentoses e hexoses alcançam aproximadamente 20 g/L de xilose, 4 g/L de glicose e 1 g/L de arabinose (MORAES, 2008).

A fim de tornar viável o uso da biomassa como insumo na rota de produção de etanol de segunda geração, é necessário submeter o material a um pré-tratamento capaz de romper a estrutura altamente resistente do complexo lignocelulósico. Nesse contexto, vale ressaltar a presença da lignina, que se faz presente como o principal obstáculo, uma vez que a sua remoção requer condições severas de processo, além de gerar compostos fenólicos que atuam como inibidores na etapa fermentativa.

Em um panorama global, o Brasil dispõe de condições especialmente favoráveis para a produção de etanol de segunda geração, sobretudo em razão de três fatores principais: Custo reduzido da matéria-prima, disponibilidade em larga escala de resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) e integração direta com a infraestrutura já existente nas usinas. Essas características permitem não apenas reduzir o investimento inicial de implantação da tecnologia de E2G, mas também diminuir os custos operacionais ao aproveitar equipamentos e fluxos logísticos já estabelecidos (PACHECO, 2011).

No estudo realizado por Lorenzi e Andrade (2019), é pontuado que a matéria-prima é um dos principais fatores no que se refere à viabilidade do E2G, pois em relação a produtividade, a cana de-açúcar é muito mais vantajosa do que outros materiais utilizados em outros países, como o milho, além do fato de que, na produção de açúcar, existe a energia (etanol, energia elétrica) como subproduto, ou seja, existe o desenvolvimento de variedades de cana visando à maximização da energia primária e o processamento desta matéria-prima de forma otimizada para produção de energias secundárias úteis.

5.3.3 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA

A produção de açúcar e álcool gera inúmeros subprodutos de valor econômico, entre eles o bagaço e a ponta de cana-de-açúcar, os quais têm sido objetivo de grande interesse como fonte de alimento para os ruminantes. Além disso, o corte da cana coincide com o período de escassez das pastagens e os subprodutos ficam disponíveis na época fria e seca do ano (Gesualdi et al., 2001).

O bagaço da cana como os demais subprodutos fibrosos, é constituído basicamente de celulose, hemicelulose e lignina. A celulose e a hemicelulose estão aglutinadas em um arranjo sistemático incrustado por lignina. Embora as enzimas presentes no rúmen tenham a capacidade de hidrolisar a celulose, há, entretanto, grandes dificuldades de acesso das mesmas aos pontos em que é possível a ruptura do polímero celulósico (Rodrigues et al., 1993). Com isso, o principal problema do bagaço de cana, que limita seu uso na alimentação animal, é o alto teor de fibra e, ao mesmo tempo, a natureza dessa fibra que o torna um alimento de baixo valor energético (Carvalho et al., 2005).

5.3.4 CELULOSE

A celulose apresenta-se na forma de microfibras envolvidas por uma mistura de carboidratos complexos poliméricos, incluindo principalmente tipos de xilana e glucomanana, que se encontram em extensões ligadas a outra estrutura polimérica, a lignina. A celulose, principal componente da parede celular da fibra, é um polissacarídeo linear, constituído por um único tipo de açúcar, ou seja, unidades de glicose unidas por ligações α 1-4. A celulose está localizada nas paredes das fibras, sendo que uma parte apresenta-se na forma amorfa e a outra, a maior parte, na forma cristalina. Sua fórmula molecular bruta é $(C_6H_{10}O_5)_n$, onde n representa o número de moléculas de glicose que compõem a cadeia e pode assumir um valor de até 15.000 unidades. O valor de n tem uma relação direta com o grau de polimerização da celulose e este, por sua vez, com a resistência física da mesma, influenciando a eficiência do processo de quebra enzimática (RODRIGUES & FERRAZ, 2012).

Durante o processamento do bagaço para fins de produção de etanol de segunda geração, a cristalinidade da celulose é um fator crítico, pois afeta a acessibilidade enzimática e, conseqüentemente, o rendimento da hidrólise enzimática (LIU et al., 2013). De modo geral, quanto maior o grau de cristalinidade, menor a digestibilidade, exigindo pré-tratamentos mais severos para “abrir” a estrutura e permitir a ação das celulasas.

Em síntese, entender a natureza e os parâmetros da celulose no bagaço de cana-de-açúcar é essencial para o desenvolvimento de condicionamentos pré-tratamento eficientes. Essa compreensão sustenta a otimização de custos operacionais e o aumento do rendimento de açúcares fermentáveis, fundamentais para a competitividade do etanol de segunda geração.

5.3.5 HEMICELULOSE

A hemicelulose constitui a segunda fração mais abundante no bagaço da cana-de-açúcar, correspondendo a cerca de 25 % a 27 % da massa seca (PATURAU, 1989). Diferentemente da celulose, trata-se de um polímero ramificado e heterogêneo, formado por pentoses (xilose, arabinose) e hexoses (glicose, manose, galactose), além de quantidades variáveis de ácidos urônicos e desoxi-hexoses (FENGEL & WEGENER, 1989). Ao longo do pré-tratamento, a hemicelulose é geralmente a fração mais suscetível à hidrólise ácida ou enzimática, pois sua estrutura amorfa e ramificada facilita o ataque químico e enzimático. Diferente da celulose, a hemicelulose apresenta baixa massa molecular (100-200 unidades glicosídicas) e não contém regiões cristalinas, sendo, portanto, mais suscetível à hidrólise química sob condições mais brandas. Porém, a fermentação dos açúcares de cinco carbonos (pentoses) ainda não é tão desenvolvida quanto os processos envolvendo a fermentação de hexoses, como a glicose (SUN & CHENG, 2005).

A hemicelulose é um componente importante da biomassa vegetal e tem diversas aplicações industriais e científicas. O estudo e a utilização da hemicelulose são importantes para o desenvolvimento de processos sustentáveis e a produção de produtos de baixo impacto ambiental.

5.3.6 LIGNINA

A lignina é um polímero amorfo, de composição química complexa, que confere firmeza e rigidez ao conjunto de celulose. Apresenta natureza aromática predominante, é insolúvel em água e muito resistente à reação química, devido ao seu elevado peso molecular. A lignina é o componente mais resistente da matriz lignocelulósica do bagaço de cana-de-açúcar, correspondendo a aproximadamente 20 %–30 % da massa seca (DEN HAAN et al., 2007). Estruturalmente, trata-se de um polímero tridimensional formado por unidades fenilpropano (p-hidroxifenila, guaiacila e siringila) interligadas por ligações éter e carbono-carbono. Essa arquitetura fornece rigidez e impermeabilidade às paredes celulares, mas também cria barreiras significativas à ação enzimática e à penetração de reagentes químicos no pré-tratamento.

A lignina representa o maior depósito de estruturas químicas aromáticas, constituindo-se em uma fonte potencial de valiosos insumos para a indústria química. Apesar de ser possível produzir diversos produtos com base na lignina, atualmente o foco dos estudos tem sido voltado para o uso desse material como fonte de energia, o que garantiria a autossuficiência e, eventualmente, até a possibilidade de exportar alguma energia elétrica excedente (D' ALMEIDA, 1988).

5.4 ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO E2G

Pitarelo et al. (2012) observa-se que, ao passo que os processos de primeira geração se apoiam na fermentação de polissacarídeos simples, as tecnologias de segunda geração envolvem a obtenção de etanol a partir de material celulósico. Nesse caso, polímeros complexos presentes na parede celular de resíduos lignocelulósicos são submetidos inicialmente a pré-tratamentos e à hidrólise da celulose, antes de se passar à etapa fermentativa. Vale destacar que o bagaço de cana-de-açúcar contém elevada fração de celulose, o que o torna um insumo especialmente adequado para essa rota de produção.

Figura 4 - Modelo de esquema das etapas da produção do etanol de 2 geração.



Fonte: Elevagro

5.4.1 PRÉ-TRATAMENTO

O pré-tratamento da biomassa lignocelulósica constitui-se na etapa crucial para a produção de etanol de segunda geração (E2G), uma vez que visa desagregar a matriz vegetal resistente, aumentando a disponibilidade dos polímeros de celulose e hemicelulose para a ação de enzimas hidrolíticas. Inicialmente, o pré-tratamento busca reduzir o grau de polimerização e a cristalinidade da celulose, bem como solubilizar frações de hemicelulose e modificar ou remover a lignina que recobre as fibras. Essas modificações estruturais ampliam a área de superfície acessível e tornam o complexo lignocelulósico menos recalcitrante, minimizando ainda a formação de compostos inibidores que possam prejudicar as etapas subsequentes de hidrólise e fermentação (ALVIRA; TOMÁS-PEJÓ; BALLESTEROS; NEGRO, 2010; SUN; CHENG, 2002).

Diversas técnicas de pré-tratamento são empregadas, podendo ser agrupadas em categorias físico-químicas, químicas, biológicas e combinadas. Um exemplo de processo que é empregado no pré-tratamento físico é a moagem, tornando o material que inicialmente é volumoso em partículas menores que são mais bem aproveitadas nos processos seguintes.

(ANDRADE et al, 2018). Os métodos aplicados neste tipo de tratamento são considerados menos agressivos ao meio ambiente.

Inicialmente, o método proposto por Andrade et al. (2018) defendem que a secagem do bagaço a 65 °C até constatação de massa estável garante a remoção completa da umidade, o que facilita o corte mecânico subsequente. Em seguida, o bagaço seco é processado em moinho de facas dotado de peneiras de 1 mm, otimizando a homogeneização do material e melhorando a precisão nas fases de quantificação de celulose e lignina, bem como a eficiência na separação dos subprodutos.

Por outro lado, Santo (2020) argumenta que a etapa de desidratação não foi necessária. Segundo o estudo, o bagaço fresco passa diretamente pelo moinho de facas, seguido de classificação por peneira de 20 mesh (abertura nominal de 0,84 mm). Apesar da ausência de secagem, o procedimento mantém níveis satisfatórios de granulometria e pureza, reduzindo o consumo energético e o tempo de processamento.

Complementando essas abordagens, Oliveira, Nunes e Souza (2020) adotaram um método alternativo de trituração, empregando liquidificador para fragmentar o BCA ainda úmido. Posteriormente, realizam a separação granulométrica em duas frações: 40 mesh (0,42 mm) e 60 mesh (0,25 mm). Essa variação de malhas possibilita comparar diretamente o efeito do tamanho de partícula sobre as análises de fibra e de compostos fenólicos.

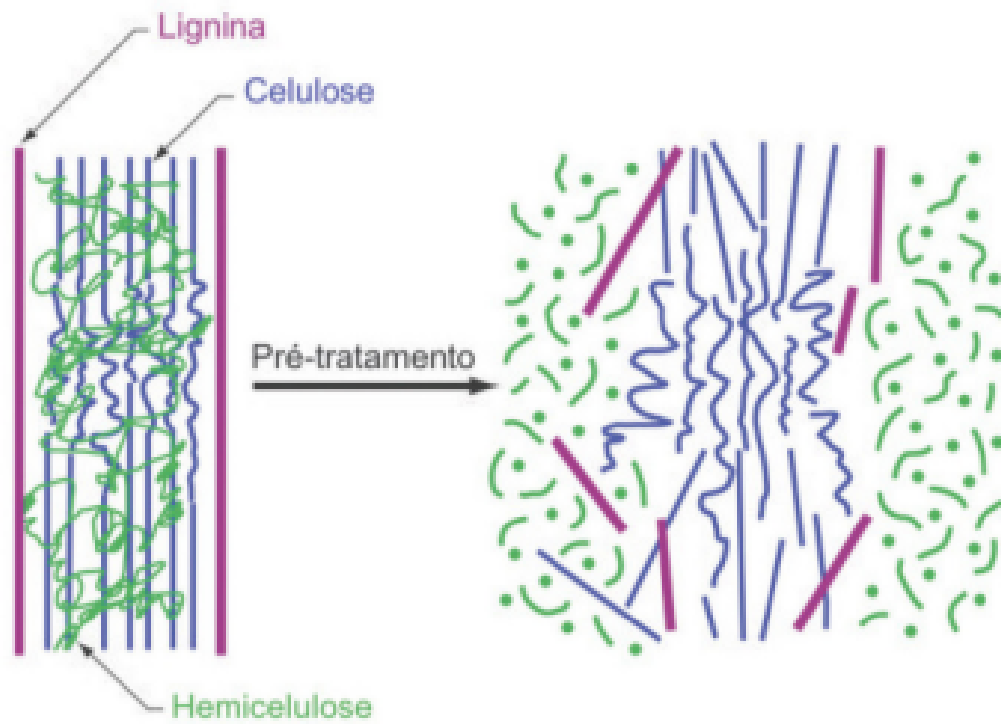
Entre os métodos físico-químicos, destacam-se a explosão a vapor e o tratamento ácido hidrotérmico. Na explosão a vapor, a biomassa é submetida a alta pressão e temperatura por alguns minutos, seguido de liberação brusca de pressão, promovendo ruptura das ligações lignina-hemicelulose e aumentando a porosidade. Apesar de rápido e não demandar reagentes caros, pode gerar inibidores como furfural e 5-HMF quando operado em condições extremas (MOISER et al., 2005). Já o tratamento hidrotérmico com adição de ácido sulfúrico diluído solubiliza eficientemente a hemicelulose, porém requer materiais resistentes à corrosão e etapas adicionais de neutralização (TAHERZADEH; KARIMI, 2008).

Nos pré-tratamentos químicos, o uso de álcalis como hidróxido de sódio ou de cálcio apresenta excelente capacidade de remoção de lignina, reduzindo significativamente o conteúdo fenólico na fração sólida. Entretanto, há necessidade de lavagem intensiva para recuperação do reagente e neutralização do material tratado, o que implica em maior consumo de água e geração de efluentes (ALVIRA et al., 2010). O método organossolv, que utiliza solventes orgânicos para extração seletiva da lignina, produz frações de lignina de alto valor agregado, mas enfrenta desafios em termos de recuperação de solventes e custo energético elevado (RAGAUSKAS et al., 2006). Processos oxidativos com peróxido de hidrogênio ou ozônio têm demonstrado degradação eficiente da lignina aromática, embora exijam controle rigoroso de pH e tempo de reação para evitar perdas de hemicelulose (BINOD et al., 2010).

As abordagens biológicas de pré-tratamento empregam fungos ligninolíticos, como espécies de basidiomicetos do tipo white-rot, para degradação seletiva da lignina à temperatura ambiente e em condições relativamente leves. Apesar de ambientalmente amigáveis e de baixo consumo energético, esses processos são lentos e de difícil controle em escala industrial (MOSIER et al., 2005). Em resposta a essas limitações, desenvolvem-se estratégias combinadas que integram etapas físico-químicas e enzimáticas em linha contínua, visando otimizar o balanço energético e reduzir a formação de inibidores, além de empregar enzimas ligninolíticas logo após o pré-tratamento para remover compostos tóxicos antes da hidrólise (JÖNSSON; MARTÍN, 2016).

A escolha do método de pré-tratamento impacta diretamente o rendimento da hidrólise enzimática, geralmente expresso pela eficiência η_{cel} , definida como a razão entre a massa de glicose liberada e a massa de celulose inicial, multiplicada por 100% (HARRIS; PAMMENT, 2008). Em condições ótimas, rendimentos de até 90 % podem ser alcançados; entretanto, variáveis como temperatura, pH, concentração de reagentes e tempo de reação devem ser cuidadosamente ajustadas para maximizar a liberação de açúcares e minimizar subprodutos inibidores.

Figura 5 – Estrutura da biomassa após processo de pré-tratamento.



Fonte: (MOSIER et al., 2005)

A seguir a Tabela 6 apresenta de forma simplificada os tipos de pré-tratamentos conhecidos e suas características.

Figura 6 – Processos de pré-tratamento da biomassa.

Processo	Descrição	Tempo de Reação.	Rendimento de Xilose.	Custo *
Físicos				
Explosão a vapor	A biomassa triturada é tratada com vapor (saturado, 160 - 260° C) seguido de uma rápida descompressão.	1 - 10 min.	45% - 65%	-
Termo-hidrólise	Utiliza água quente a alta pressão (pressões acima do ponto de saturação) para hidrolisar a hemicelulose.	30 min.	88% - 98%	-
Químicos				
Hidrólise ácida	Por meio do uso de ácidos sulfúrico, clorídrico, ou nítrico, concentrados ou diluídos.	2 - 10 min.	75% - 90%	+
Hidrólise alcalina	Pelo uso de bases, como hidróxidos de sódio ou cálcio.	2 min.	60% - 75%	++
Organosolv	Uma mistura de um solvente orgânico (metanol, bioetanol e acetona, por exemplo) com um catalisador ácido (H ₂ SO ₄ , HCl) é usada para quebrar as ligações internas da lignina e da hemicelulose.	40-60 min.	70% - 80%	
Biológicos				
	Utilização de fungos para solubilizar a lignina. Geralmente, é utilizado em combinação com outros processos.			
Combinados				
Explosão a vapor catalisada	Adição de H ₂ SO ₄ (ou SO ₄) ou CO ₂ na explosão a vapor pode aumentar a eficiência da hidrólise enzimática, diminuir a produção de compostos inibidores e promover uma remoção mais completa da hemicelulose.	1 - 4 min.	88%	-
Afex (ammonia fiber/freeze explosion)	Exposição à amônia líquida a alta temperatura e pressão por um certo período de tempo, seguida de uma rápida descompressão.		50% - 90%	
Explosão de CO₂	Similar à explosão de vapor.		75%	

Fonte: FERREIRA, 2011. Adaptação de HAMELINCK et al., 2005.

A etapa de pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos apresenta desafios técnicos e econômicos que impactam diretamente a viabilidade do etanol de segunda geração (E2G).

Primeiramente, a composição heterogênea da biomassa dificulta a padronização das condições operacionais: variações no teor de lignina, hemicelulose e cinzas afetam o grau de despolimerização e a formação de subprodutos indesejados (ALVIRA; TOMÁS-PEJÓ; BALLESTEROS; NEGRO, 2010). Em seguida, métodos que usam calor e ácido ou álcalis concentram altos custos energéticos e de materiais resistentes à corrosão, elevando o investimento em reatores e sistemas de recuperação de reagentes (MOISER et al., 2005). Além disso, a geração de inibidores como furfural, 5-hidroximetilfurfural (5-HMF) e ácidos orgânicos requer etapas extras de detoxificação ou lavagem intensiva, aumentando o consumo de água e gerando efluentes que demandam tratamento (SANTOS; DA SILVA; RODRIGUES, 2013).

Outro ponto crítico é o balanço de massa e energia em escala industrial: processos contínuos oferecem melhor rendimento, mas exigem controles precisos de temperatura, pressão e tempo de residência, bem como a integração de trocadores de calor para reaproveitamento da energia térmica (MOSIER et al., 2005; JÖNSSON; MARTÍN, 2016).

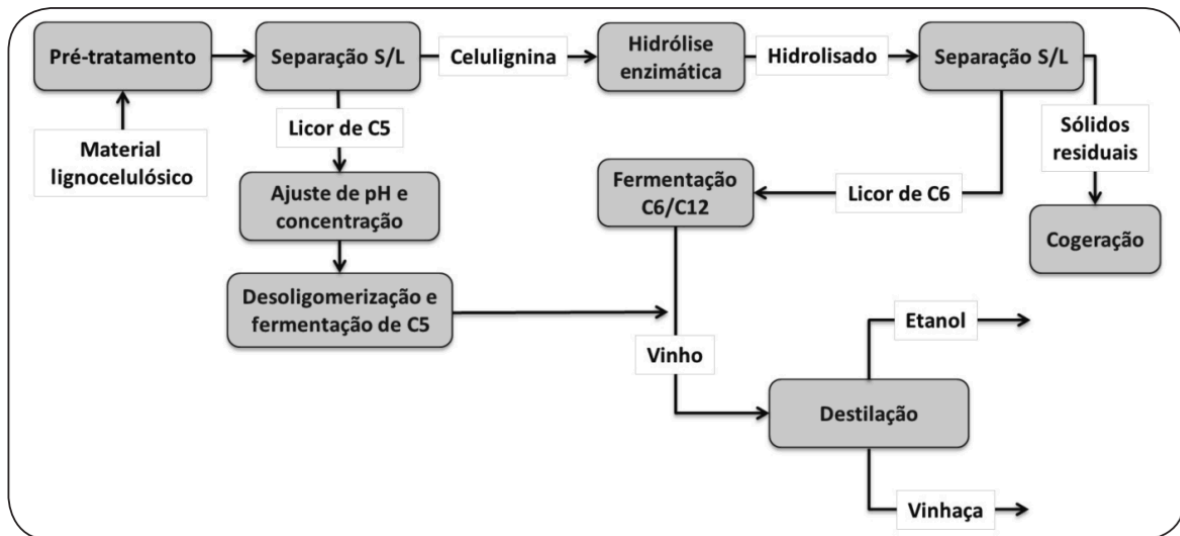
Na etapa de pré-tratamento, os equipamentos requerem manutenção e/ou reposição de peças em curto espaço de tempo, pois o bagaço e a palha da cana apresentam elevados teores de sílica e alumina, o que causa efeitos abrasivos em equipamentos do processo, tais como, tubulações, válvulas e acessórios. Efeitos que são acentuados, devido à alta temperatura e pressão do processo de tratamento do bagaço por explosão a vapor (CTC, 2016). Vale ressaltar que a Raízen está na vanguarda para a resolução desse problema, através de uma pré-lavagem da biomassa. E por fim, a recuperação e reutilização de solventes em rotas organossolv ou a disposição da lignina solubilizada ainda carecem de soluções integradas que agreguem valor e reduzam o passivo ambiental (RAGAUSKAS et al., 2006).

5.4.2 SEPARAÇÃO C5/C6

É denominado separação C5-C6 a separação da xilose (pentose – 5 carbonos) obtida no pré tratamento, da glicana, substrato celulósico a ser reagido no processo de hidrólise enzimática, na próxima etapa do processo e que originará a glicose (hexose – 6 carbonos). Essa polpa rica em xilose vai para centrífugas e onde é lavada várias vezes para a retirada da maior quantidade possível de xilose, visto que essa é prejudicial para a fase de hidrólise enzimática. Então essa polpa “lavada” é re-diluída e adiciona-se o coquetel enzimático que irá converter a glicana em glicose.

Para a obtenção de E2G, foram avaliadas duas rotas tecnológicas: a fermentação individual de pentoses (xilose), sendo necessária a separação, e a cofermentação simultânea de pentoses e hexoses (glicose). Na primeira rota (Figura 7), o material lignocelulósico misto passa inicialmente por um pré-tratamento de explosão a vapor, com o intuito de tornar a celulose mais acessível e, assim, favorecer a ação de enzimas específicas na etapa subsequente.

Figura 7 – Fluxograma da rota produção de etanol 2G (fermentação separada)



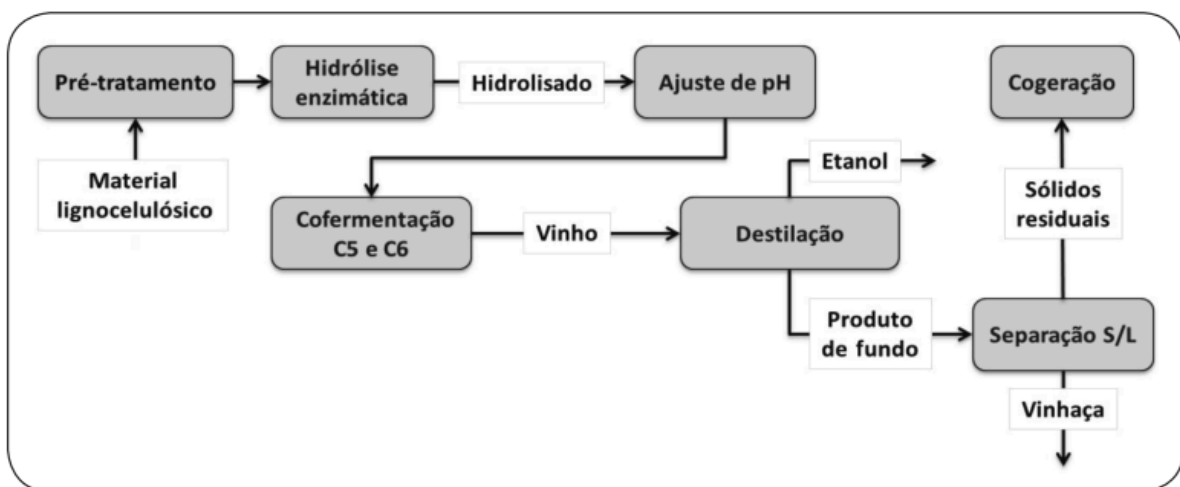
Fonte: E2G_BNDES

Após a etapa de separação, formam-se duas correntes distintas: a fração celulignina e o licor de C5. A celulignina é submetida à hidrólise enzimática para liberar os açúcares, gerando um hidrolisado que, por sua vez, é dividido em sólidos residuais (compostos majoritariamente por lignina) e no licor de C6. Os sólidos residuais seguem para a unidade de cogeração, onde são queimados, enquanto o licor de C6 é encaminhado aos tanques de fermentação do E1G.

Paralelamente, o licor de C5 do pré-tratamento tem seu pH ajustado, é concentrado e direcionado para a fermentação de pentoses, processo em que também ocorre a conversão de oligossacarídeos em açúcares fermentáveis (xilose e glicose). Por fim, o vinho resultante desse estágio é misturado ao produto da fermentação do licor de C6 e ao caldo de cana-de-açúcar e sofre destilação nas colunas apropriadas.

Na segunda rota para produção de E2G é apresentado na Figura 8. Nesse processo, os licores de C5 e C6 são fermentados conjuntamente (co-fermentação), sem o processo de separação C5/C6. Toda biomassa é pré-tratada como na rota anterior, mas sem a separação do licor de C5. A polpa tratada é diretamente enviada para a hidrólise enzimática. O hidrolisado resultante sofre um ajuste de pH e é fermentado. O vinho resultante é enviado à primeira coluna de destilação e o produto do fundo é separado em vinhaça e sólidos residuais que são enviados à central de cogeração para queima.

Figura 8 – Fluxograma da rota para produção de etanol 2G (co-fermentação)



Fonte: E2G_BNDES

O processo de separação de C5/C6 no qual a parte líquida (C5 - Xilose) é encaminhada para um processo de evaporação, enquanto a fração sólida (C6 - Polpa) irá para um processo de repolpagem onde será corrigido o pH e posteriormente enviado para etapas subsequentes. Tal processo de separação é vantajoso se realizado principalmente em dois estágios, em que, no primeiro estágio, o caldo é enviado direto para a próxima etapa, enquanto a fração sólida, denominada polpa, é destinada a um tanque para ser lavada com água fria. Já no segundo estágio acontece a separação das correntes sólido-líquido, sendo o líquido destinado a uma etapa de evaporação e o sólido destinado para a próxima etapa de hidrólise enzimática.

Dentre os equipamentos mais utilizados nesse processo, destacam-se o filtro rotativo e o filtro prensa. A escolha adequada entre eles impacta diretamente no rendimento, nos custos operacionais e na sustentabilidade do processo. Como características do filtro rotativo tem-se sua possibilidade de modo de operação, contínua ou semi-contínua, com cilindro giratório parcialmente imerso em polpa, sua formação e descarga da torta filtrante ocorre de forma simultânea, em sistemas automáticos de raspadores e apresenta uma capacidade de filtração elevada, com superfícies de filtração que podem ultrapassar dezenas de metros quadrados. Apresenta uma baixa de mão de obra, devido ao alto grau de automação e necessita uma menor área ocupada em planta, comparada a sistemas descontínuos de mesma capacidade. Como desvantagens desse tipo de filtro, tem-se a dificuldades em filtrar polpas de alta viscosidade ou com sólidos finos em excesso, que podem entupir as telas e por fim, seu custo de investimento inicial é elevado para modelos de grande porte e sua complexidade mecânica é pouco recomendada em ambientes com elevado teor de abrasão.

Figura 9 – Imagem representativa de um filtro rotativo



Fonte: Bertazzo

Para o filtro tipo prensa, sua característica de operação é o regime descontínuo e sua estrutura é composta por um conjunto de placas e quadros intercalados montados sobre carril. Apresenta um ciclo de trabalho definido por: Alimentação, descarga de filtrado, abertura do conjunto, extração da torta e fechamento e permite uma variação de materiais de placas (PE, aço inox, polipropileno) para adequar-se a diferentes propriedades de polpa. Dentre suas vantagens, tem-se a alta eficiência de retenção de finos, gerando tortas com teor de sólidos superiores a 30 %, versatilidade na escolha de meios filtrantes e na limpeza por lavagem reversa e um custo unitário menor por metro quadrado de área de filtração, em equipamentos de pequeno e médio porte. Porém, é operado em processo intermitente, exigindo tanques de equalização e acumuladores para manter o fluxo no processo global, além de precisar de maior necessidade de mão de obra no manuseio de placas e torta e necessitar de um tempo de ciclo relativamente longo (5 a 20 minutos), reduzindo produtividade por hora em comparação ao filtro rotativo.

Figura 10 – Imagem representativa de um filtro tipo prensa



Fonte: <https://tratamentodeagua.com.br/>

Conclui-se que, o filtro rotativo destaca-se pela operação contínua e baixa exigência de operadores, ainda que com alto custo inicial e sensibilidade a sólidos finos. O filtro prensa oferece alta retenção e flexibilidade de meios filtrantes, ao custo de operação descontínua e maior demanda de mão de obra.

Para o E2G, em plantas de grande porte e produção ininterrupta, o filtro rotativo tende a ser mais indicado, em unidades menores ou quando se prioriza tortas de alto teor de sólidos, o filtro prensa apresenta melhor custo-benefício.

5.4.3 HIDRÓLISE

A obtenção de monossacarídeos a partir de materiais lignocelulósicos pode ser promovida tanto pela hidrólise ácida quanto pela enzimática. Em ambas as rotas, é imprescindível realizar um pré-tratamento para eliminar a lignina e, em diversas situações, também fracionar a hemicelulose (MACEDO; NOGUEIRA, 2005). Rodrigues (2007) relata que a hidrólise ácida atinge uma recuperação de até 90 % dos açúcares fermentáveis, porém costuma gerar subprodutos inibidores, como compostos fenólicos, ácido acético, furfural e hidroximetilfurfural, e pode provocar degradação dos próprios açúcares. Por sua vez, Bastos (2007) destaca que a hidrólise enzimática apresenta alta seletividade, não produz reações colaterais nem compostos inibidores da fermentação alcoólica, e opera sob condições moderadas de temperatura e pressão, sem requerer meios corrosivos. Contudo, conforme Canetti (2004), a alta cristalinidade da celulose, a barreira imposta pela lignina e a associação complexa entre celulose, hemicelulose e lignina tornam esse processo lento, de custo elevado e eficiência reduzida.

Na hidrólise desprendem-se dois grupos de monossacarídeos: as pentoses, oriundas principalmente da hidrólise da fração hemicelulósica, e as hexoses, liberadas tanto da hemicelulose quanto da celulose. O mosto açucarado resultante é fermentado pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, que converte hexoses em etanol (RABELO, 2007). Dentre as principais enzimas que se destacam nesse processo e são mais utilizadas comercialmente para hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicos são as celulasas, hemicelulasas (xilanase) e ligninases (ZABED et al., 2016).

Na etapa inicial do processamento enzimático, a biomassa lignocelulósica é submetida a um pré-tratamento cujo propósito é romper a estrutura compacta do material, tornando-o mais vulnerável à ação das enzimas. Nesse momento, ocorre a hidrólise parcial da fração hemicelulósica. Em seguida, dá-se a fase de hidrólise propriamente dita, em que as celulasas atacam as cadeias de celulose. Graças à especificidade e à eficiência dessas enzimas, todo esse processo transcorre sob condições muito mais suaves em comparação à hidrólise ácida, o que reduz drasticamente a formação de subprodutos indesejáveis e preserva a integridade dos monossacarídeos liberados. Entretanto, para alcançar níveis elevados de conversão da celulose, faz-se necessário empregar doses consideráveis de enzimas, o que acaba elevando significativamente o custo operacional (RABELO, 2010).

Na etapa de hidrólise enzimática, a reação é conduzida sob condições ideais de pH e temperatura específicas para as celulasas. Contudo, a liberação constante de glicose e de oligossacarídeos causa inibição competitiva das enzimas, resultando em uma conversão parcial da celulose. Ao término da reação, separa-se o resíduo sólido por filtração ou centrifugação, e o licor enriquecido em açúcares é encaminhado para a fermentação alcoólica (SILVA, 2014). O aproveitamento integral das frações lignocelulósicas remanescentes, hemicelulose, celulose e lignina, insere-se no conceito de biorrefinaria, no qual resíduos agroindustriais são transformados em múltiplos produtos de valor agregado, ampliando a sustentabilidade econômica e ambiental do processo (VÁSQUEZ, 2007).

As enzimas responsáveis pela degradação da celulose podem ser agrupadas em três classes distintas, cada uma atuando de maneira complementar ao longo do processo de hidrólise. As endoglucanases realizam quebras internas aleatórias das ligações β -1,4 ao longo das cadeias de celulose, fragmentando o polímero em cadeias menores. Em seguida, as exoglucanases removem sequencialmente unidades de celobiose a partir das extremidades dessas cadeias encurtadas. Por fim, a β -glicosidase converte a celobiose em duas moléculas de glicose, concluindo a liberação dos monossacarídeos fermentescíveis (SUN & CHENG, 2002; LIMA et al., 2005).

A eficiência dessa etapa enzimática depende fortemente de características físicas e químicas da biomassa lignocelulósica. O grau de porosidade e a área de superfície disponível determinam o acesso das enzimas às microfibrilas de celulose; quanto maior a porosidade, melhor a penetração enzimática. A alta cristalinidade, típica de fibras bem ordenadas, dificulta o ataque enzimático, reduzindo as taxas de conversão. Além disso, a presença de hemicelulose e lignina atua como barreira física e pode causar inibição estérica ou química, limitando ainda mais o rendimento da reação. Por isso, pré-tratamentos que removem ou modificam hemiceluloses e lignina, ao mesmo tempo que reduzem a cristalinidade e aumentam a porosidade, são fundamentais para otimizar a hidrólise e elevar o rendimento global de açúcares (McMILLAN et al., 1999).

É fundamental destacar que, enquanto a conversão enzimática da celulose em hexoses já está bem estabelecida e difundida há décadas, a fermentação das pentoses liberadas pela hemicelulose ainda exige microrganismos especializados e representa um desafio técnico e econômico, sobretudo em escala industrial (ROSA; GARCIA, 2009). Para superar essa barreira, investe-se tanto na redução de custos de produção das enzimas celulolíticas quanto na seleção e no aprimoramento de cepas nacionais de microrganismos capazes de assimilar e fermentar açúcares de cinco carbonos (LORENZI, 2018).

Por fim, tem-se a hidrólise ácida, que é considerada a técnica mais desenvolvida atualmente, enquanto a hidrólise enzimática é apontada como a alternativa mais promissora para viabilizar a produção de etanol de segunda geração. O aproveitamento mais eficiente dos carboidratos presentes em materiais lignocelulósicos ocorre quando a hidrólise é dividida em duas fases. Inicialmente, as condições do processo favorecem a quebra da hemicelulose; posteriormente, a celulose é convertida em glicose em uma segunda etapa (MUSSATTO et al., 2010).

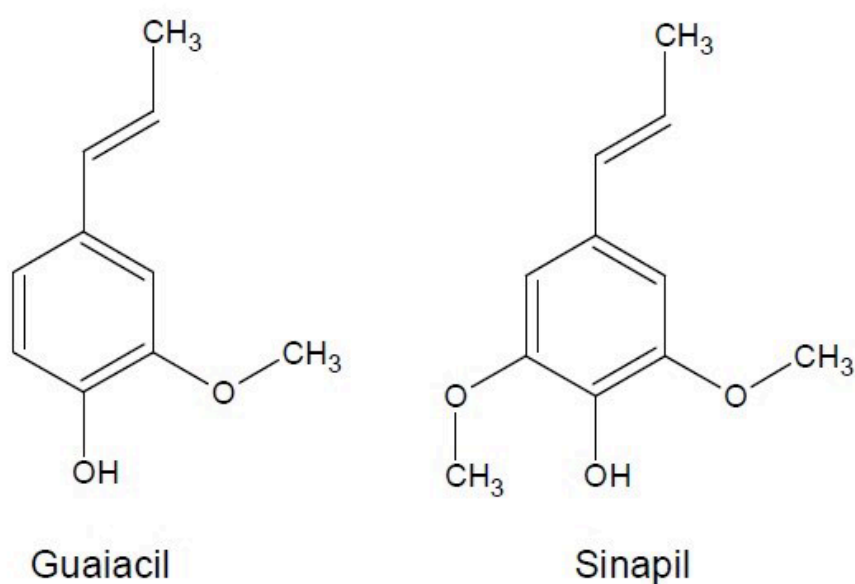
No método de hidrólise utilizando ácido concentrado, tanto a hemicelulose quanto a celulose da biomassa são degradadas em temperaturas baixas (inferiores a 100°C), empregando soluções aquosas de ácidos fortes como H₂SO₄, HCl e H₃PO₄. O principal ponto negativo desse método é a exigência de equipamentos com alta resistência à corrosão, o que eleva o custo final do processo. Em geral, a hemicelulose é hidrolisada mais rapidamente do que a celulose, e os monossacarídeos liberados permanecem no meio reacional por períodos prolongados, o que pode resultar em sua degradação e consequente perda. Na hidrólise ácida diluída, utiliza-se ácido sulfúrico em baixa concentração misturado à biomassa para promover a conversão da hemicelulose em xilose e outros açúcares, a mistura é mantida a temperaturas entre 120°C e 220°C por um curto intervalo de tempo, o que permite a despolimerização da fração hemicelulósica da parede celular vegetal, aumentando assim a digestibilidade da celulose nos resíduos sólidos (CHANDEL et al., 2007).

Segundo Rabelo (2010), às altas temperaturas empregadas na hidrólise ácida diluída resultam na degradação significativa de açúcares e lignina solúvel, o que pode causar a formação de compostos que inibem o processo de fermentação. Essa característica representa uma das principais limitações desse método. Quando se utilizam temperaturas ainda mais elevadas ou se prolonga o tempo de residência, os monossacarídeos provenientes da hemicelulose tendem a se decompor, originando substâncias como furano, ácidos carboxílicos e fenóis, que são reconhecidos como inibidores da fermentação (CHANDEL et al., 2007). Por outro lado, a hidrólise alcalina atua promovendo a saponificação das ligações éster presentes entre as xilanas e entre a xilana e a lignina. Esse processo facilita a desestruturação e a extração de uma dessas frações, lignina ou hemicelulose, e, ao mesmo tempo, reduz a cristalinidade das fibras de celulose (VÁSQUEZ, 2007). No entanto, essa abordagem geralmente apresenta baixos rendimentos na liberação de açúcares e gera grandes volumes de efluentes. Apesar dessas limitações, a hidrólise alcalina pode ser ajustada em termos de temperatura e tempo de reação, dependendo do tipo de biomassa utilizada (GUILHERME, 2014).

5.4.4 SEPARAÇÃO DA LIGNINA

A lignina é um dos principais componentes da parede celular das plantas, apresentando uma composição química semelhante entre diferentes espécies vegetais, embora sua estrutura varia de acordo com o tipo de planta. Por ser formada por unidades aromáticas, sua remoção sem causar degradação é um grande desafio. Quimicamente, a lignina é composta principalmente por dois tipos de monômeros: guaiacil e sinapil. A lignina do tipo guaiacil predomina em madeiras de coníferas, enquanto a combinação de guaiacil e sinapil é característica das madeiras de árvores folhosas. Já nas gramíneas, como a cana-de-açúcar, a lignina apresenta um menor grau de polimerização e uma reatividade distinta em comparação à lignina encontrada em madeiras (HERNANDEZ, 2008).

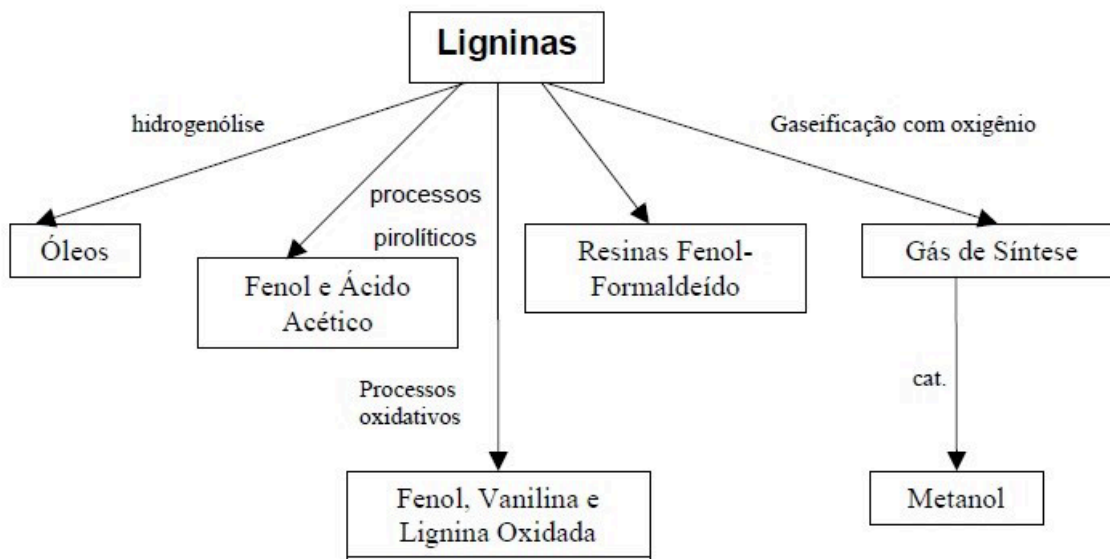
Figura 11 – Estrutura química dos compostos básicos da lignina



A lignina pode ser extraída através de diversos métodos de pré-tratamento mencionados anteriormente. Durante esse processo de extração, outros compostos são também solubilizados, formando uma mistura conhecida como licor negro. A composição deste licor varia conforme a origem geográfica e a espécie da madeira empregada, sendo que a concentração de sólidos solúveis influencia diretamente suas características físicas, incluindo propriedades reológicas como viscosidade e capacidade calorífica (HERNANDEZ, 2008).

A lignina de alta qualidade pode ser classificada em três categorias principais de aplicação: energética, como matéria-prima e para produção de compostos químicos (SAVAGE, 2009). Devido ao seu elevado valor energético, constitui um combustível eficiente, podendo também ser empregada na alimentação animal. Alguns de seus derivados apresentam características coloidais, sendo úteis como agentes dispersantes (KLOCK, 2005). De acordo com Fioravanti (2011), é possível obter 5,4 milhões de litros de etanol a partir de 30 mil toneladas de palha, representadas pelas frações de celulose e hemicelulose, gerando simultaneamente 13 mil toneladas de pellets de lignina como subproduto. Embora a extração enzimática da lignina seja um processo mais lento para aplicação industrial, demonstra alta eficiência na remoção sem causar degradação do material. Esse método permite a obtenção do licor negro, denominação dada ao resíduo contendo lignina e outras substâncias provenientes da deslignificação, resultando em lignina de qualidade superior, fundamental para a fabricação de produtos subsequentes (SCHUCHARDT et al., 2001).

Figura 12 – Fluxograma de produtos originados da lignina.



Fonte: SCHUCHARDT et al. 2001.

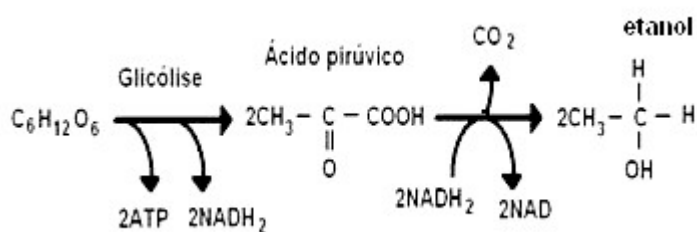
Por fim, cabe ressaltar que além dos métodos mencionados destacam-se alguns equipamentos utilizados nessa operação para a separar a lignina do bagaço ou do caldo já concentrado, como é o caso da peneira rotativa, centrífugas e os filtros prensa, sendo os dois últimos mais comuns.

5.4.5 FERMENTAÇÃO

A fermentação alcoólica, um tipo de catabolismo em condições anaeróbicas, consiste em um processo bioquímico no qual os açúcares do substrato são transformados em etanol, dióxido de carbono e diversos subprodutos, graças à ação de microrganismos ou enzimas (Ascendino; Bosch Neto; Torres, 2018; Gomez, 2011). Para que essa fermentação ocorra a partir da biomassa, primeiro é preciso romper as cadeias de celulose e hemicelulose, convertendo-as em seus respectivos monômeros; somente depois esses açúcares são efetivamente fermentados.

Conforme ilustrado na Figura 13, o processo começa com a glicólise gerando piruvato. Esse piruvato é então convertido em outro composto: se o destino for álcool etílico, temos a fermentação alcoólica; se for lactato, trata-se de fermentação láctica. Na rota alcoólica, o piruvato passa primeiro por uma descarboxilação irreversível catalisada pela enzima piruvato-descarboxilase. Em seguida, o acetaldeído formado é reduzido a etanol pela ação da álcool-desidrogenase, utilizando NADH como doador de elétrons solúvel em água. Assim, as leveduras convertem glicose em etanol e dióxido de carbono, e não em lactato (Tura, 2013).

Figura 13 – Fermentação alcoólica



Fonte: (DE OLIVEIRA, 2008)

A fermentação alcoólica é a rota principal para obtenção de etanol, seja na produção de etanol de primeira geração (1G) ou de segunda geração (2G). O microrganismo mais utilizado nesse processo é a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, reconhecida pela facilidade com que metabolizam glicose. Essa levedura transforma glicose em etanol e dióxido de carbono com elevada eficiência e suporta concentrações relativamente altas de etanol. Contudo, seu metabolismo se restringe às hexoses derivadas da celulose, como glicose e manose; já as pentoses oriundas da hemicelulose, por exemplo xilose e arabinose, não são aproveitadas por ela (Tura, 2013).

A xilose é a pentose mais comum em biomassa lignocelulósica e figura como o segundo carboidrato mais abundante encontrado na natureza (Matsushika et al., 2009). Por isso, para aumentar o rendimento do etanol de segunda geração torna-se fundamental empregar microrganismos que efetivamente fermentem esse açúcar. Diversas leveduras já foram apontadas como capazes de metabolizar xilose gerando etanol, entre elas: *Candida succiphila*, *C. jeffriesii*, *C. intermedia*, *Pichia stipitis*, *Pichia tannophilus* dentre outras (Jeffries et al., 2007). Mais recentemente, a levedura *Pichia kudriavzevii*, anteriormente denominada *Issatchenkia orientalis* ou *Candida krusei*, tem se destacado por conseguir fermentar tanto pentoses quanto hexoses, mostrando-se uma candidata promissora para processos de biorrefinaria (Pagnocca, 2015 apud Freita, 2017).

O bagaço contém diversas substâncias químicas, entre elas terpenos, terpenoides, gorduras e ceras, diferentes fenólicos, além de proteínas e cinzas, que podem ser removidas por extração com solventes tanto polares quanto apolares. Esses constituintes, cuja proporção costuma variar de 5 % a 20 % dependendo da biomassa, podem prejudicar a fermentação, pois muitos são tóxicos às leveduras (Fengel & Wegener, 1989). Durante os pré-tratamentos térmicos e químicos, formam-se ainda compostos capazes de inibir a hidrólise enzimática e a própria fermentação. O perfil e a quantidade desses inibidores estão ligados tanto à matéria-prima quanto às condições operacionais aplicadas. Entre os produtos de degradação que costumam comprometer o desempenho fermentativo destacam-se três grupos principais (Palmqvist e Hahn-Hägerdal, 2000): Derivados furânicos, como furfural e 5-hidroximetilfurfural (HMF), ácidos orgânicos fracos, por exemplo o ácido acético e compostos fenólicos variados.

Chandel et al. (2007) enfatizam que, ao se analisar os custos associados à etapa de hidrólise, é fundamental considerar os compostos gerados nesse tratamento que prejudicam o crescimento microbiano. Durante a hidrólise ácida forma-se uma série de subprodutos capazes de comprometer a fermentação: o ácido acético, liberado pela clivagem do grupo acetila presente na hemicelulose; os ácidos fórmico e levulínico, resultantes da degradação de açúcares; diversos compostos fenólicos oriundos da ruptura parcial da lignina, além dos furaldeídos, especialmente o furfural, e o 5-hidroximetilfurfural (HMF), provenientes da degradação de pentoses e hexoses, respectivamente (MARTÍN et al., 2007).

Segundo MARTIN e JONSSON (2003), a maioria das leveduras, inclusive cepas de uso industrial, mostra-se sensível a esses inibidores, sendo que a presença simultânea de vários deles intensifica o efeito tóxico. NARENANATH et al. (2001) observaram que ácidos orgânicos no meio fermentativo elevam o consumo de ATP pelas leveduras, pois parte da energia que normalmente seria destinada ao crescimento ou à fermentação é desviada para a manutenção do pH intracelular. Compostos fenólicos, por sua vez, podem inibir a bioconversão ao interferirem na atividade enzimática, destruir a integridade da membrana celular e alterar suas propriedades como barreira seletiva (HEIPIEPER et al., 1994). Em relação aos furanos, furfural e HMF reduzem a atividade enzimática e biológica dos microrganismos, promovem desintegração do DNA e inibem a síntese de RNA e proteínas, afetando diretamente sua viabilidade (MODING et al., 2002).

Chandel e colaboradores (2007) ao realizar a hidrólise do bagaço a 140°C por 30 min com diferentes concentrações do ácido clorídrico (0,5; 1,5; 2,5 e 3,5%), verificaram que na concentração de 2,5% foi quantificada a maior produção de açúcares totais (30,2g/L), xilose (21,5g/L), arabinose (2,9g/L), e glicose (5,8g/L). No entanto, foi com esta concentração de ácido que ocorreu a maior produção de compostos inibidores da fermentação como furanos (1,8g/L), compostos fenólicos (2,7g/L) e ácido acético (5,4g/L).

Concluída a fermentação, o caldo passa por uma ou várias etapas de destilação em colunas apropriadas. O etanol obtido pode, em seguida, ser desidratado, por meio de peneiras moleculares, entre outras tecnologias, para remover a água residual e gerar etanol anidro, que atinge aproximadamente 99,6 % v/v. Caso não seja desidratado, o produto pode ser comercializado em sua forma azeotrópica, contendo cerca de 95 % v/v de etanol (Cinelli, 2012).

Tabela 1 – Comparativo entre fermentações de 1ª e 2ª gerações

	Fermentação 1G	Fermentação 2G
Matéria-prima	Caldo da cana	Bagaço e palha
Açúcares fermentados	Hexoses	Hexoses e pentoses
Tecnologias	Convencional	Avançada
Inibição	Baixa	Média
Tempo de reação	Baixo	Médio
Enzimas	Ausentes	Presentes
Consumo de energia	Baixo (autossuficiente)	Alto

Fonte: (NICHOLAS ROCHA MELO, 2020)

6. IMPLEMENTAÇÃO DO ETANOL DE 2ª GERAÇÃO

Para que a celulose possa ser empregada na produção de etanol em larga escala de forma economicamente viável, é necessário superar diversos entraves técnicos e intensificar os esforços de pesquisa. Entre as prioridades, destaca-se o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para o processamento da biomassa lignocelulósica, especialmente no estágio de pré-tratamento, incluindo a aplicação de sistemas inovadores de engenharia enzimática voltados à hidrólise da celulose. Além disso, torna-se imprescindível criar e produzir microrganismos capazes de metabolizar, simultaneamente, pentoses e hexoses, resistindo ao estresse gerado por inibidores formados durante o processo. Também se faz necessário assegurar que organismos geneticamente modificados mantenham estabilidade operacional em fermentações conduzidas em escala industrial. Por fim, todas essas soluções devem ser implementadas de modo a garantir viabilidade econômica (Margeot et al., 2009). Os desafios atuais concentram-se, portanto, em promover a recuperação eficiente dos açúcares provenientes das frações de celulose e hemicelulose da biomassa, bem como aprimorar a fermentação destes açúcares (Macedo, 2005). Na rota tecnológica do etanol de segunda geração, baseada no uso de biomassa lignocelulósica, incluem-se as etapas de pré-tratamento do material, hidrólise, fermentação dos açúcares celulósicos e hexosídicos, separação e tratamento de efluentes e, dependendo da matéria-prima empregada, procedimentos adicionais de coleta que podem elevar os custos operacionais (Ojeda; Kafarov, 2009).

Entre as fases descritas para a produção de etanol de segunda geração, o pré-tratamento desponta como o obstáculo mais crítico para a comunidade científica. Conforme McMillan (1994), esse estágio tem por objetivo remover lignina e hemicelulose, diminuir a cristalinidade da celulose e ampliar a porosidade da parede celular, facilitando o acesso enzimático. Para ser considerado adequado, o pré-tratamento deve, simultaneamente, elevar o rendimento em açúcares, preservar carboidratos sem promovê-los à degradação, evitar a formação de compostos que inibam etapas posteriores de hidrólise e fermentação e, por fim, apresentar viabilidade econômica. Diversas estratégias físicas, físico-químicas, químicas e biológicas têm sido avaliadas para esse fim. No Brasil, equipes de pesquisa investigam rotas como organossolve, auto-hidrólise, explosão a vapor, hidrólise ácida e extração alcalina com peróxido de hidrogênio. A lavagem alcalina do bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, tem conseguido remover grande parte da lignina da matriz, deixando celulose e hemicelulose mais acessíveis à ação enzimática (Pandey et al., 2000).

Desde o início do programa nacional de etanol, os esforços vêm se concentrando, sobretudo, em aperfeiçoar o pré-tratamento. Entre as técnicas disponíveis, a explosão a vapor figura como uma das mais empregadas para desagregar, de forma conjunta, os três principais componentes da biomassa (Klinke, 2004). Nessa operação, o material lignocelulósico é submetido a vapor em alta pressão dentro de um reator, seguido de expansão adiabática rápida, o que provoca a ruptura estrutural (Lee, 1997). Uma vez concluído o pré-tratamento, a hidrólise enzimática pode ocorrer em arranjo simultâneo com a sacarificação e a fermentação, reduzindo etapas e, conseqüentemente, os custos de produção. À medida que a cana-de-açúcar passa a ser valorizada não apenas pelos açúcares, mas também pelas fibras, como matéria-prima para uma ampla gama de produtos em processos integrados, as usinas de açúcar e etanol tendem a evoluir para verdadeiras biorrefinarias. Essas unidades se inspiram na lógica das refinarias de petróleo, porém baseadas em recursos renováveis e em premissas ambientais mais sustentáveis (BNDES, 2008).

Projeções indicam que, ao longo da próxima década, o avanço dos biocombustíveis de segunda geração transformará o panorama energético baseado em biomassa. Nesse novo cenário, o etanol passará a ser obtido predominantemente a partir de bagaço, celulose e outros resíduos orgânicos, o que deverá elevar a produtividade em torno de 40 a 50 %. Tal expansão ocorreu sob premissas de sustentabilidade, respeitando os limites ambientais e inaugurando aquilo que Sachs (2005) descreve como “uma civilização moderna da biomassa”, isto é, uma matriz energética ancorada em recursos renováveis e em cadeias produtivas de baixo impacto ambiental.

7. INVESTIMENTO INDUSTRIAL

A estimativa do investimento necessário para implantar unidades industriais pode ser calculada por diversas metodologias descritas na literatura, como as propostas por Peters et al. (2002) e Turton et al. (2009). Todavia, quando se trata do setor sucroenergético, a aplicação direta desses modelos encontra limitações, sobretudo pela escassez de dados públicos específicos. No estudo BNDES Setorial (2016), as estimativas foram construídas a partir do banco de dados de investimentos disponível na BVC (Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar). Esse acervo reúne cotações de equipamentos, custos de áreas de processo fornecidos por empresas de engenharia, informações técnico-econômicas de especialistas da cadeia produtiva, referências bibliográficas e outras fontes de domínio público. Vale salientar que, por se encontrarem em fase de desenvolvimento, as tecnologias de segunda geração (2G) acarretam maior grau de incerteza nos valores projetados para investimento. Para estimar os investimentos nos cenários analisados, adotou-se a estratégia de partir dos valores de aquisição dos principais equipamentos de cada área de processo; em seguida, aplicaram-se fatores e porcentagens que permitiram calcular o investimento total correspondente. Considerando as diferenças de época e de tecnologia, assumiu-se que todas as unidades seriam implantadas como projetos greenfield, isto é, construídas em locais sem infraestrutura prévia. Tal premissa permitiu padronizar a comparação entre cenários, sobretudo nos casos integrados, evitando ajustes em plantas já existentes que caracterizariam projetos brownfield. A metodologia de avaliação de custos foi concebida de modo modular e flexível, de forma a captar as particularidades tecnológicas de cada configuração industrial. A planta foi dividida em dois grandes blocos: 1G + interface e 2G. O primeiro abrange as operações convencionais das usinas de cana-de-açúcar, como recepção da matéria-prima, extração, tratamento e concentração do caldo, fermentação, destilação e geração de vapor e eletricidade. Nesse bloco também se alocaram investimentos em biodigestão, além de despesas com seguro, engenharia, urbanização e obras civis auxiliares, reconhecendo que parte dessa infraestrutura pode ser compartilhada entre diferentes rotas de processo.

O segundo bloco, dedicado à produção 2G, compreende as etapas específicas de processamento do bagaço, incluindo pré-tratamento, separação dos licores C5 e C6, propagação de microrganismos geneticamente modificados e fermentação (ou cofermentação) dos açúcares de segunda geração. As capacidades de cada área foram dimensionadas para atender às demandas da usina durante safra e entressafra, levando em conta o perfil de biomassa processada em cada cenário industrial. Para refletir a evolução tecnológica esperada nas rotas de segunda geração e nos sistemas de biodigestão, adotou-se a aplicação de um abatimento no investimento dessas áreas: 10 % para os cenários de médio prazo e 20 % para os de longo prazo. Esse ajuste busca incorporar os ganhos associados à curva de aprendizagem, à consolidação de um mercado fornecedor especializado e ao surgimento de soluções de engenharia mais eficientes. Optou-se por não estender essa redução às operações 1G e de interface, uma vez que tais etapas já se encontram em estágio de maturidade tecnológica consolidado.

A avaliação financeira fundamentou-se nas premissas econômicas resumidas na Tabela 2. Para os horizontes de curto, médio e longo prazos, adotaram-se preços médios calculados a partir de séries históricas de dez anos para etanol anidro e açúcar, enquanto, no caso da eletricidade gerada a partir da biomassa, recorreu-se aos resultados de leilões realizados entre 2005 e 2013. Todos os valores foram atualizados pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), tomando-se julho de 2014 como data-base. A análise considerou cenários verticalizados de produção, de modo que os custos totais obtidos com o modelo CanaSoft para cada biomassa representassem diretamente o preço de aquisição dessa matéria-prima pelo processo industrial.

Tabela 2 – Premissas econômicas utilizadas na avaliação financeira

Preços	Valor	Referência
Etanol anidro (R\$/l)	1,34	Cepea, média móvel (2004-2014)
Eletricidade (R\$/MWh)	132,43	MME, média de leilões (2005-2013)
Açúcar (R\$/kg)	1,00	Cepea, média móvel (2004-2014)
Principais parâmetros		Valor
Taxa mínima de atratividade (% a.a.)		12
Horizonte de tempo do projeto (anos)		25
Taxa de depreciação contábil (% a.a.)		10
Manutenção anual (% Capex ^a)		3
Custo da enzima – curto prazo (US\$/l etanol 2G)		0,13
Custo da enzima – médio prazo (US\$/l etanol 2G)		0,08
Custo da enzima – longo prazo (US\$/l etanol 2G)		0,06
Impostos sobre a renda (IRPJ+CSLL) ^b (%)		34
Data de referência (preços)		Julho de 2014
Taxa de câmbio (R\$/US\$)		2,30

Fonte: (BNDES Setorial (2016)

O custo do etanol foi determinado somando-se, de um lado, as despesas operacionais e, de outro, a remuneração do capital investido. As despesas operacionais abarcam o pagamento da biomassa, os serviços de manutenção, a mão de obra, as enzimas e demais insumos (produtos químicos, leveduras etc.) empregados no processo produtivo. A parcela referente ao capital foi calculada como o desembolso anual necessário para remunerar o investimento a uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12 % ao ano, ao longo de 25 anos. Para isolar o custo do etanol de segunda geração (E2G), adotou-se um critério de alocação em três etapas. Na primeira, os custos totais da planta convencional (1G) foram distribuídos entre eletricidade e etanol de primeira geração (E1G) proporcionalmente à participação de cada produto nas receitas. Assim, se a venda de eletricidade representar 20 % da receita, apenas 80 % dos custos operacionais são atribuídos ao E1G; o custo por litro resulta da divisão desse montante pelo volume anual de etanol produzido. Na segunda etapa, repetiu-se o procedimento para a planta integrada (1G + 2G), obtido-se o custo combinado (Custo 1G2G). Finalmente, na terceira etapa, esse custo combinado foi repartido entre E1G e E2G com base na participação de cada tipo de etanol no volume total. Supondo, por exemplo, que 30 % da produção anual de etanol provenha da rota de segunda geração, atribuem-se 30 % dos custos de 1G2G ao E2G. Como o custo do E1G já foi fixado desde a primeira etapa, esse valor é fixado para que seja possível a obtenção do custo somente do etanol 2G, de acordo com a equação a seguir:

$$P_{1G} * C_{1G} + P_{2G} * C_{2G} = C_{1G2G}$$

Em que:

P_{1G} = participação do etanol 1G na produção total de etanol (%);

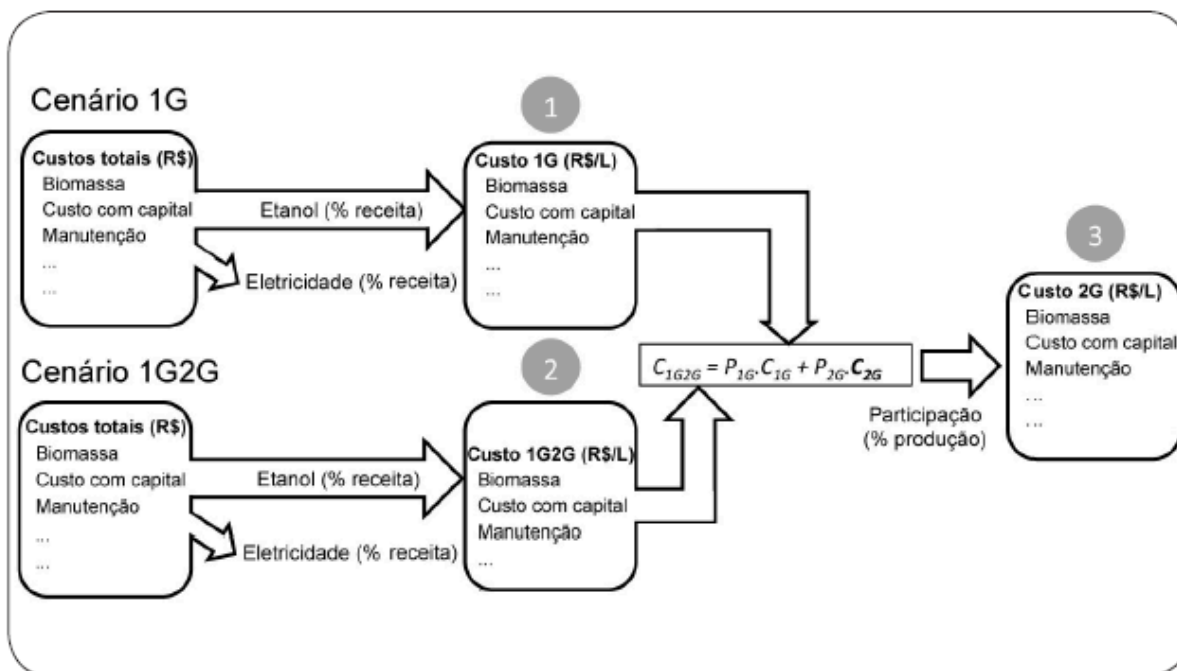
C_{1G} = custo de produção do etanol 1G (R\$/l);

P_{2G} = participação do etanol 2G na produção total de etanol (%);

C_{2G} = custo de produção do etanol 2G (R\$/l); e

C_{1G2G} = custo de produção do etanol 1G2G (R\$/l).

Figura 14 – Método de alocação para cálculo do custo do etanol



Fonte: (BNDES Setorial (2016).

As estimativas de investimento para a implantação de cada um dos diversos cenários são mostradas na Tabela 3, bem como a relação do investimento com a produção total de etanol. Cenários esse no qual foi estudado diferentes tipos de biomassas e quantidades de MLC (Material lignocelulósico) seco enviado ao pré-tratamento.

Figura 15 – Estimativas de investimentos dos cenários (valores em R\$ milhões)

Cenários	Investimento (R\$ milhões)			Produção de etanol (milhões de l/ano)			Investimento (R\$/l)
	1G + interface	2G	Total	1G	2G	Total	
0	366	-	366	107	-	107	- ^a
1	1.004	-	1.004	340	-	340	2,96
2	1.088	-	1.088	438	-	438	2,48
3	1.443	-	1.443	562	-	562	2,57
4	944	425	1.369	340	94	434	3,16
5A	1.048	376	1.424	438	229	667	2,13
5B	1.032	436	1.468	438	260	698	2,10
6A	1.349	437	1.786	562	427	989	1,81
6B	1.313	459	1.772	562	456	1.017	1,74
7	169	281	450	-	92	92	4,91
8A	633	289	922	221	190	411	2,24
8B	612	303	915	221	218	439	2,08
9A	899	299	1.198	343	329	672	1,78
9B	886	338	1.224	343	352	695	1,76

Fonte: (BNDES Setorial (2016).

Observa-se ainda que a maior relação investimento-produção de etanol é da planta 2G independente no curto prazo, pois não há compartilhamento da infraestrutura e tem menor escala de produção de etanol. O investimento (em R\$/l) diminui ao longo do tempo em razão de maiores rendimentos e produtividades em etanol, operação durante o ano todo, aumento da escala das plantas e redução no investimento resultante da curva de aprendizado.

8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Com a implementação do processo de segunda geração (2G), projeta-se um aumento significativo na quantidade de vinhaça produzida. Este efluente, caracterizado por sua elevada carga orgânica, pode apresentar limitações para o uso direto em práticas de fertirrigação, especialmente diante da possibilidade de futuras mudanças nas normas que regulam sua aplicação no solo. Nesse contexto, a biodigestão da vinhaça surge como uma estratégia viável para mitigar odores e transformar a matéria orgânica presente em biogás.

Esse produto pode ser aproveitado na geração de energia elétrica ou como alternativa parcial ao uso de diesel em equipamentos agrícolas e veículos de transporte, considerando que já existem soluções disponíveis para a adaptação de motores. Contudo, a literatura técnica ainda apresenta escassez de estudos específicos sobre a biodigestão da vinhaça oriunda do processo 2G, cuja composição orgânica é bastante variável, dependendo da tecnologia empregada. Por essa razão, adotou-se, de forma simplificada, a premissa de que os rendimentos da vinhaça 2G seriam equivalentes aos observados na digestão da vinhaça de primeira geração (1G). Na prática, espera-se que a vinhaça 2G apresente maior carga orgânica, embora com desempenho inferior na conversão para biogás, em razão da presença mais acentuada de compostos com potencial inibidor.

A análise de sensibilidade considerando variações nos custos associados à biomassa e às enzimas demonstrou que a diferença nos custos de produção entre o etanol de primeira geração (E1G) e o de segunda geração (E2G) pode aumentar ou diminuir, sem, contudo, alterar a tendência geral observada para os horizontes de curto e longo prazos. Em outras palavras, no curto prazo, o E1G tende a apresentar custos inferiores aos do E2G; já no longo prazo, esse cenário tende a se reverter. No que se refere aos custos de capital, além da evolução tecnológica do processo 2G, que envolve, por exemplo, o aumento da concentração de sólidos e a redução do tempo de reação, o que permite a utilização de equipamentos com menor capacidade, prevê-se uma redução progressiva nos investimentos necessários. Essa queda nos custos está relacionada à maior oferta de fornecedores e ao desenvolvimento de soluções de engenharia mais eficientes, especialmente em médio e longo prazos.

Ademais, o próprio aprimoramento dos rendimentos e das taxas de produtividade do processo de segunda geração contribui para a expansão da produção de E2G e, conseqüentemente, para a diminuição dos custos de capital por unidade produzida.

Quanto às enzimas, estas podem ser produzidas na própria planta de produção de etanol, utilizando fontes de açúcar e carbono disponíveis, bem como vapor e eletricidade. Alternativamente, podem ser compradas de fornecedores, os quais se beneficiam do aumento de escala, da tecnologia de produção e da mão de obra especializada.

No que diz respeito às premissas econômicas, observou-se que o aumento do valor da energia elétrica reduz a parcela de custos atribuída ao etanol de primeira geração (E1G) e, em menor intensidade, ao processo integrado E1G2G. Como efeito compensatório, há um acréscimo proporcional nos custos destinados ao etanol de segunda geração (E2G), de forma a equilibrar a diminuição verificada nas demais rotas. Dessa maneira, ao combinar parâmetros de maior variabilidade com outros mais conservadores, conclui-se que as premissas adotadas configuram um cenário coerente e balanceado. A principal conclusão resultante dessa análise é que, mesmo em um horizonte de médio prazo, existe um potencial expressivo para que o E2G se torne economicamente mais atrativo do que o etanol convencional.

Entretanto, essa trajetória de aprimoramento não se concretizará de forma espontânea, uma vez que grande parte dos avanços em eficiência mencionados depende diretamente da implantação de novas unidades industriais voltadas à produção de etanol de segunda geração (E2G). Esse movimento proporciona ganhos de escala e, por consequência, a redução dos custos associados ao processo, além de impulsionar investimentos em pesquisa e desenvolvimento nas áreas de biomassa, enzimas e equipamentos específicos para o E2G. Dessa forma, para viabilizar esse cenário, torna-se essencial a implementação de políticas públicas que incentivem e sustentem financeiramente os investimentos necessários à consolidação da cadeia produtiva do E2G.

9. SUGESTÕES DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O ETANOL 2G NO BRASIL

O etanol de segunda geração (E2G) vem sendo objeto da atenção de diversos mecanismos públicos de incentivos, voltados tanto ao avanço tecnológico e à ampliação de sua capacidade produtiva quanto ao estímulo de seu consumo e integração mais ampla nas matrizes energéticas de diversos países. No contexto brasileiro, os incentivos concentram-se majoritariamente na disponibilização de recursos voltados à pesquisa e desenvolvimento (P&D). Em contrapartida, observa-se uma menor ênfase em políticas que promovam diretamente o consumo do E2G, o que difere da abordagem adotada por outras nações, especialmente os Estados Unidos. A avaliação do potencial de crescimento do E2G evidencia que a tecnologia ainda se encontra nos estágios iniciais de sua curva de aprendizado, apresentando amplas possibilidades de aprimoramento, principalmente nas etapas relacionadas à produção de biomassa, ao desenvolvimento de enzimas e ao aperfeiçoamento de equipamentos industriais.

O estímulo à implantação de novas unidades produtivas de etanol de segunda geração (E2G) tende a promover o fortalecimento de toda a cadeia produtiva associada, favorecendo, por exemplo, a instalação de fabricantes de enzimas e equipamentos no território brasileiro. Tal cenário contribuiria para ganhos de escala, redução dos custos operacionais e incremento no desenvolvimento tecnológico nacional. Nesse contexto, cabe-se o investimento em propostas de políticas públicas capazes de impulsionar simultaneamente a produção e o consumo de E2G, com vistas a acelerar os avanços em produtividade e, assim, ampliar sua representatividade tanto no mercado interno quanto nas exportações brasileiras.

De forma a complementar as políticas públicas, seria importante estabelecer medidas temporárias que facilitassem o investimento na produção do E2G, tais como:

- 1) Isenção de tributos federais sobre a aquisição e importação de maquinário e equipamentos destinados à instalação de plantas industriais para o processamento de açúcares provenientes de biomassa lignocelulósica, incluindo unidades voltadas à produção de E2G e compostos químicos renováveis. Essa proposta seguiria modelos já estabelecidos, como o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (Repene) e o Regime Tributário para Incentivo à Modernização e à Ampliação da Estrutura Portuária (Reporto).

- 2) Isenção de tributos federais nas operações de importação e compra interna de insumos biológicos, como enzimas e leveduras, com ênfase em sistemas de produção "on-site", os quais poderiam ser enquadrados sob a categoria de ativos biológicos, conforme precedentes dos regimes Repenec e Reporto.
- 3) Suspensão da incidência de PIS/Cofins sobre a aquisição de biomassa celulósica, a exemplo do que já ocorre no setor sucroenergético com a cana-de-açúcar, reduzindo os encargos nas etapas iniciais da cadeia produtiva do E2G.
- 4) Ampliação do período de vigência do crédito presumido de PIS/Cofins especificamente para a produção de E2G, em comparação ao tempo atualmente concedido para o etanol de primeira geração (E1G), como forma de incentivar a competitividade da tecnologia emergente.
- 5) Autorização para depreciação acelerada dos ativos fixos utilizados na produção de E2G, viabilizando uma recuperação mais rápida dos investimentos em equipamentos e infraestrutura industrial.
- 6) Redução das alíquotas da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) aplicáveis às empresas envolvidas na produção de E2G, com o objetivo de melhorar a atratividade econômica dos empreendimentos e fomentar novos investimentos no setor.

Além das medidas de natureza tributária, torna-se relevante considerar a criação de um programa federal de crédito agrícola voltado especificamente para a agricultura com finalidades energéticas e químicas. Tal iniciativa poderia incentivar o cultivo de espécies como a cana-energia, o sorgo biomassa, entre outras culturas com elevado potencial para a produção de etanol de segunda geração (E2G) e derivados renováveis. No que se refere ao financiamento da produção industrial, recomenda-se que o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) avalie a viabilidade de estabelecer mecanismos específicos de apoio financeiro para investimentos em unidades industriais voltadas ao processamento de açúcares obtidos a partir de biomassa lignocelulósica, abrangendo tanto a produção de E2G quanto de compostos químicos renováveis, bem como para a implantação de plantas destinadas à fabricação de enzimas, insumo estratégico para o setor.

10. CONCLUSÃO

A produção de etanol desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico global e na sustentabilidade ambiental, servindo como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis. O Brasil está bem posicionado para permanecer líder neste setor — não apenas como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, mas também devido às suas vastas terras aráveis adequadas para a expansão do cultivo de culturas energéticas. Nesse contexto, o etanol de segunda geração (E2G) surge como uma estratégia promissora para aumentar a oferta de biocombustíveis. Ao utilizar biomassa lignocelulósica — um recurso natural abundante — o processo se torna economicamente viável e promove o reaproveitamento de resíduos agroindustriais que, de outra forma, seriam descartados.

O investimento contínuo em pesquisas para aumentar a eficiência da conversão do bagaço de cana-de-açúcar em açúcares fermentáveis para a produção de etanol é essencial. Alcançar esse objetivo requer o desenvolvimento de novos estudos focados em abordagens inovadoras — como o uso de enzimas avançadas ou microrganismos geneticamente modificados com capacidades aprimoradas para decompor materiais lignocelulósicos em açúcares simples e, por fim, em etanol.

A utilização de resíduos lignocelulósicos, especialmente aqueles provenientes do setor agroindustrial, representa uma rota promissora para ampliar a produção de etanol e atender à crescente demanda global por esse biocombustível. Essa perspectiva se torna ainda mais relevante diante da tendência de muitos países em adotarem o etanol como alternativa aos combustíveis fósseis, motivada principalmente pelas questões ambientais, como o aquecimento global, decorrente da queima de derivados de petróleo e carvão.

Este estudo mostrou que a biomassa residual de materiais lignocelulósicos oferece uma matéria-prima valiosa para a produção de etanol, ajudando a evitar a competição com terras agrícolas utilizadas para o etanol de primeira geração. Dada a abundante disponibilidade de bagaço e palha de cana-de-açúcar no Brasil, a consolidação das tecnologias de hidrólise poderia permitir um aumento substancial na produtividade nacional do etanol. No entanto, é importante observar que, embora o bioetanol de segunda geração seja técnica e economicamente viável, a substituição completa e sustentável de combustíveis fósseis — preservando níveis essenciais de biodiversidade — continua sendo um desafio significativo.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que os conceitos aprendidos no curso de engenharia química ao longo dos anos desempenham um papel essencial para o entendimento de todas as etapas desse processo de produção, utilizando conhecimentos integrados de termodinâmica, cinética química, balanço de massa e energia, além de operações unitárias.

O processo inicia com a pré-tratamento da biomassa, uma operação crucial para romper a estrutura rígida da lignina e permitir o acesso à celulose e à hemicelulose. Esse pré-tratamento pode envolver processos físico-químicos (como explosão a vapor, hidrólise ácida ou alcalina), onde princípios de fenômenos de transporte (transferência de calor e massa) são fundamentais para otimizar a eficiência da etapa, minimizando a degradação dos açúcares fermentáveis.

Em seguida, ocorre a hidrólise enzimática ou ácida, etapa em que as longas cadeias de carboidratos (celulose e hemicelulose) são quebradas em açúcares simples, como glicose e xilose. Aqui, os conceitos de cinética de reações químicas são aplicados para modelar e otimizar a taxa de conversão dos polissacarídeos, considerando variáveis como temperatura, pH, concentração de enzimas e tempo de reação.

A etapa seguinte é a fermentação, na qual micro-organismos convertem os açúcares em etanol. O desafio da engenharia química está em adaptar cepas de leveduras ou bactérias que possam fermentar eficientemente não apenas a glicose, mas também pentoses como a xilose. Aqui, além da bioquímica, entram os balanços de massa e energia para projetar biorreatores eficientes, com controle adequado de temperatura, aeração e remoção de subprodutos.

Por fim, o etanol produzido é separado da mistura por meio de operações unitárias de separação, como destilação e retificação — processos nos quais a engenharia química é essencial para otimizar o consumo energético, utilizando conceitos de termodinâmica de fases e projeto de colunas de separação. Além disso, a integração energética e o aproveitamento dos subprodutos (como lignina residual para geração de calor e eletricidade) demonstram a aplicação de ferramentas como análise de pinch e simulações de processos para aumentar a eficiência global da planta, reduzindo custos e emissões.

Assim, a produção de etanol 2G é um exemplo claro da aplicação integrada da engenharia química na conversão sustentável de resíduos em energia, contribuindo para a transição energética e a economia circular.

REFERÊNCIAS

- GOLDEMBERG, J. et al. **The sustainability of ethanol production from sugarcane.** *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.
- MORAES, B. S. et al. **Socioeconomic and environmental assessment of second-generation bioethanol production in Brazil.** *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 20, p. 137–150, 2018.
- REIS, C. E. R. et al. **Second-generation ethanol from sugarcane bagasse in Brazil: Economic and environmental assessment.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, p. 331–345, 2016.
- SOUZA, A. P. et al. **Bioenergy from sugarcane bagasse: status and perspectives.** *BioEnergy Research*, v. 13, n. 3, p. 928–944, 2020.
- MENDEZ, J. A. et al. **Advances in enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for bioethanol production: challenges and perspectives.** *Bioresource Technology Reports*, v. 19, 2022.
- UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Etanol de Segunda Geração.** Disponível em: <https://unica.com.br/>. Acesso em: abr. 2025.
- CHUM, H. et al. **Bioenergy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.** Cambridge University Press, 2011.
- FOLEY, J. A. et al. **Solutions for a cultivated planet.** *Nature*, v. 478, p. 337–342, 2011.
- MACEDO, I. C. et al. **Greenhouse gas emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020.** *Biomass and Bioenergy*, v. 32, p. 582–595, 2008.
- SOUZA, G. M. et al. **Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps.** SCOPE Report 72. Paris: Scientific Committee on Problems of the Environment, 2014.
- CHANDEL, A. K. et al. **Advances in bioconversion of lignocellulosic biomass to bioethanol.** *Biofuel Research Journal*, v. 6, n. 2, p. 587–599, 2019.
- GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A. **Ethanol fuel from biomass: A review of technical and economic assessments.** *Bioresource Technology*, v. 101, p. 8030–8040, 2010.
- SILVA, M. J. da et al. **Produção de etanol de segunda geração: panorama atual e desafios tecnológicos.** *Revista Brasileira de Energia Renovável*, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 36–53, jan./mar. 2020.
- ZABED, H. et al. **Second-generation bioethanol production from lignocellulosic biomass: An overview.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, p. 331–353, 2017.
- UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Relatório Anual 2020.** São Paulo: UNICA, 2020.

ALTIERI, Miguel A.; PENGUE, Walter A. **Los agrocombustibles: una solución falsa al cambio climático**. Revista Biodiversidad, sustento y culturas, n. 53, 2006.

CHAVES, Márcia S.; LEITE, Maurício C. **Biocombustíveis: fundamentos técnicos e impactos socioambientais**. Curitiba: CRV, 2015.

DEMIRBAS, Ayhan. **Biofuels: securing the planet's future energy needs**. Energy Conversion and Management, v. 50, n. 9, p. 2239–2249, 2009.

FAO (Food and Agriculture Organization). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems at Risk. Rome, 2022.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). Guia de especificações para biocombustíveis. Brasília, 2021.

MARINHO, P. R. Processo e tecnologias na produção de etanol de cana-de-açúcar. Revista Biotecnologia Brasil, v. 10, n. 2, p. 45-53, 2017.

MONTEIRO, L. F.; ROSA, A. C.; REIS, M. D. Caracterização e aplicação de etanol anidro e hidratado. Revista Química Nova, v. 39, n. 8, p. 915-922, 2016.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). RenovaBio: panorama e perspectivas. Brasília, 2019.

OLIVEIRA, F. A.; ROCHA, L. Sustentabilidade na cultura da cana-de-açúcar: práticas de manejo e inovação. Revista Brasileira de Agricultura Sustentável, v. 8, n. 2, p. 45-62, 2021.

TAHERZADEH, M.J.; KARIMI, K. Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. Bioresources, v. 2, n. 4, p. 707-738, 2007.

LYND, L.R. Tomorrow's biomass refineries. Apresentado no "XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals", Golden Colorado, 2005. Disponível em: . Acesso em: 4 mar. 2002.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Bioetanol de cana-de-açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, p. 316, 2008.

LAWFORD, H.G. ROUSSEAU, J.D. Improving fermentation performance of recombinant Zymomonas in acetic acid-containing media. Applied Biochemistry and Biotechnology, v. 70-72, n. 1, p. 161-172, 1998.

TEIXEIRA, L.C.; LINDEN, J.C.; SCHROEDER, H.A. Simultaneous Saccharification and Cofermentation of peracetic acid-pretreated biomass. Applied Biochemistry and Biotechnology, v. 84- 86, n. 1-9, p. 111-127, 2000.

VÁSQUEZ, M.P.; DA SILVA, J. N. C.; DE SOUZA Jr., M.B.; PEREIRA Jr., N. Enzymatic hydrolysis optimization to ethanol production by Simultaneous Saccharification and Fermentation. Applied Biochemistry and Biotechnology, v. 137-140, issues 12. 2007.

FENGEL, D., WEGENER, G. Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter, p.61, 1989.

GUTIERREZ, L.E.; AMORIM, H.V.; BASSO, L.C. Inibidores da fermentação alcoólica. STAB, Açúcar, álcool e subprodutos. Piracicaba, v. 9, n. 6, p.24-30, 1991.

PACHECO, T. F. Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RODRIGUES, G.S.S.C.; ROSS, J.L.S. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: Edufu, 2020

CARVALHO, L.C. et al. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. Enciclopédia Biosfera, v. 9, n. 16, p. 530, 2013.

FERRAZ, A.; MENDONÇA, R.; COTRIM, A.R.; SILVA, F.T. The use of white-rot decaying as a pretreatment for organosolv delignification of Eucalyptus grandis wood. Workshop on Applications of Biotechnology in Bioenergy Systems, Anais, 1994.

PATURAU, J.M. By-Products of Sugar Cane Industry, 3rd Edition, Elsevier, Amsterdam, p.27-33, 1989.

SUN, Y. CHENG, J.J. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production. Bioresource Technology, v. 96, p. 1599-1606, 2005.

D'ALMEIDA, M.L.O. Composição química dos materiais lignocelulósicos. In: Celulose e Papel, Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica, Brasil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT-, 2ª Edição, v. 1, Capítulo III, p. 45-106, 1988.

ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. Bioresource Technology, v. 101, p. 4851–4861, 2010.

BINOD, P. et al. Bioethanol production from rice straw: an overview. Bioresource Technology, v. 101, p. 4767–4774, 2010.

HARRIS, P.; PAMMENT, N. B. Effect of agitation and enzyme feeding strategy on enzymatic hydrolysis of pretreated barley straw and spruce. Enzyme and Microbial Technology, v. 42, n. 4, p. 272–282, 2008.

JÖNSSON, L. J.; MARTÍN, C. Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. Bioresource Technology, v. 199, p. 103–112, 2016.

MOISER, N. et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, v. 96, p. 673–686, 2005.

RAGAUSKAS, A. J. et al. The path forward for biofuels and biomaterials. Science, v. 311, n. 5760, p. 484–489, 2006.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresource Technology,

BINOD, P. et al. Bioethanol production from rice straw: an overview. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 4767–4774, 2010.

JÖNSSON, L. J.; MARTÍN, C. Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresource Technology*, v. 199, p. 103–112, 2016.

MOISER, N. et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, v. 96, p. 673–686, 2005.

RAGAUSKAS, A. J. et al. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*, v. 311, n. 5760, p. 484–489, 2006.

SANTOS, D. R.; DA SILVA, T. F.; RODRIGUES, M. C. Detoxification strategies for hydrolysates destined to second-generation ethanol production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 272–284, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6022: Artigo em publicação periódica científica impressa – Apresentação. Rio de Janeiro, 2018. SMITH, J.; DOE, A. Solid–liquid separation in bioethanol processes. *Journal of Separation Science*, v. 45, n. 3, p. 123–136, 2020. SILVA, R. L.; PEREIRA, M. C. Filtração industrial: tecnologias e aplicações. São Paulo: Editora Técnica, 2019.

MODING, T., LIDEN, G.; TAHERZADEH, M.J. Inhibition effects of furfural on alcohol dehydrogenase, aldehyde dehydrogenase and pyruvate dehydrogenase. *Biochemistry Journal*, v.363, p.769–776, 2002

HEIPIEPER, H.J.; WEBER, F.J.; SIKKEMA, J.; KEWEL, H.; DE BONT, J.A.M. Mechanism of resistance of whole cells to toxic organic solvents. *Trends in Biotechnology*, v. 12, p. 409-615, 1994..

NARENDRANATH, N.V.; THOMAS, K.C.; INGLEDEW, W.M. Effects of acetic acid ad lactic acid on the growth of *Saccharomyces cerevisiae* in a minimal medium. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v. 26, p.71-177, 2001.

MARTÍN, C.; JONSSON, L.J. Comparison of the resistance of industrial and laboratory strains of *Saccharomyces* and *Zygosaccharomyces* to lignocellulose-derived fermentation inhibitors. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 32, p.386–395, 2003.

TURA, Â. Fermentação de açúcares liberados de biomassas lignocelulósicas pré-tratadas com líquidos iônicos para produção de etanol. 2014. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia De Processos e Tecnologias) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

AMARASEKARA, A. S. Handbook of Cellulosic Ethanol. [S.I.]: Scrivener Publishing and John Wiley & Sons, Inc., 2013.

BASTOS, V. D. Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento. *Revista do BNDES*, n. 38, p. 85-138. BNDES, Rio de Janeiro, dez. 2012.

BRAUNBECK, O. Mecanização de baixo impacto na produção de cana-de-açúcar. *Jornal Biomassa BR*, v. 15, p. 6-10, 2014.

CARDOSO, T. F. Avaliação socioeconômica e ambiental de sistemas de recolhimento e uso da palha de cana-de-açúcar. 2014. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2014.