



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



MARCELO VANZELLI MENDES

**ETANOL CELULÓSICO: PROCESSO PRODUTIVO, CENÁRIO BRASILEIRO E
INOVAÇÕES**

UBERLÂNDIA

2024

MARCELO VANZELLI MENDES

**ETANOL CELULÓSICO: PROCESSO PRODUTIVO, CENÁRIO BRASILEIRO E
INOVAÇÕES**

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários para a
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso, do curso de
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro

UBERLÂNDIA

2024

MARCELO VANZELLI MENDES

**ETANOL CELULÓSICO: PROCESSO PRODUTIVO, CENÁRIO BRASILEIRO E
INOVAÇÕES**

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários para a
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso, do curso de
Engenharia Química.

Uberlândia, 01 de 04 de 2024.

Banca Examinadora:

Eloízio Júlio Ribeiro

Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros

Miriam Maria de Resende

RESUMO

O etanol celulósico ou etanol de segunda geração (E2G) é o etanol obtido através da biomassa lignocelulósica, proveniente de biomassa vegetal, com destaque para os resíduos agrícolas, e surge como uma alternativa para o aumento da produção de etanol sem necessidade de novas áreas destinadas ao plantio. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das principais etapas do processo de produção do etanol celulósico (E2G), do cenário brasileiro sobre este biocombustível e aspectos inovadores acerca do E2G. Esta revisão foi feita através de pesquisa de artigos científicos em *websites* renomados e livros que englobam a produção de etanol celulósico, e os principais aspectos abordados são a composição da biomassa lignocelulósica, as etapas de produção, o cenário brasileiro e as inovações no processo de obtenção do etanol celulósico. Concluiu-se que o etanol celulósico é um dos caminhos para a independência energética de combustíveis derivados do petróleo e obtenção de um desenvolvimento sustentável, porém as etapas do processo possuem dificuldades a serem superadas através de subsídios e políticas públicas adequadas.

Palavras-chave: etanol de segunda geração, pré-tratamento, hidrólise, fermentação.

ABSTRACT

Cellulosic ethanol or second-generation ethanol is the ethanol obtained through lignocellulosic biomass, originating from plant biomass, with emphasis on agricultural residues, and appears as an alternative for increasing ethanol production without the need for new areas dedicated to planting. The present work aims to carry out a bibliographical review of the main stages of the cellulosic ethanol production process, the Brazilian scenario regarding this biofuel and innovative aspects regarding second-generation ethanol. This review was carried out through research of scientific articles on renowned websites and books that cover the production of cellulosic ethanol, and the main aspects covered are the composition of lignocellulosic biomass, the production stages, the Brazilian scenario and innovations in the obtaining process of cellulosic ethanol. It was concluded that cellulosic ethanol is one of the paths towards energy independence from petroleum-derived fuels and achieving sustainable development, however the stages of the process have difficulties to be overcome through subsidies and appropriate public policies.

Keywords: second generation ethanol, pretreatment, hydrolysis, fermentation.

LISTA DE SIGLAS

E1G – Etanol de primeira geração

E2G – Etanol de segunda geração

PAISS – Programa de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

Finep – Financiadora de Estudos e Projetos

GEE – Gases do Efeito Estufa

P&D – Pesquisa & Desenvolvimento

AFEX – Expansão de fibra por amônia

SHF – Hidrólise separada da fermentação

SSF – Sacarificação e fermentação simultânea

SSCF – Sacarificação e co-fermentação simultânea

CBP – Processamento biológico consolidado

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 8 |
| 2 | Metodologia | 9 |
| 3 | Caracterização da biomassa e das etapas do processo de obtenção do etanol celulósico | 10 |
| 3.1 | Biomassa Lignocelulósica | 10 |
| 3.1.1 | Celulose | 11 |
| 3.1.2 | Hemicelulose | 13 |
| 3.1.3 | Lignina..... | 13 |
| 3.2 | Pré-Tratamento | 14 |
| 3.2.1 | Pré-tratamentos físico | 16 |
| 3.2.2 | Pré-tratamento químico e físico-químico | 17 |
| 3.2.3 | Pré-tratamentos biológico | 20 |
| 3.3 | Hidrólise | 21 |
| 3.3.1 | Hidrólise Ácida | 21 |
| 3.3.2 | Hidrólise Enzimática | 23 |
| 3.4 | Fermentação Alcoólica | 25 |
| 4 | O cenário brasileiro | 27 |
| 4.1 | Políticas públicas..... | 30 |
| 5 | Inovações e novas tecnologias..... | 32 |
| 5.1 | Utilização de subprodutos | 32 |
| 5.2 | Adição de surfactantes na hidrólise enzimática | 33 |
| 5.3 | Inovações na fermentação | 33 |
| 5.4 | Utilização de terras e novas matérias-primas | 36 |
| 6 | Considerações Finais | 37 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 38 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Estrutura da parede celular da biomassa lignocelulósica (Fonte: adaptado de LIU <i>et al.</i> , 2019)..... | 10 |
| Figura 2: Estrutura da celulose (Fonte: TIMAR-BALAZSY & EASTOP apud CARVALHO, 2011)..... | 12 |
| Figura 3: Organização da celulose (Fonte: adaptado de TIMAR-BALAZSY & EASTOP, 1998)..... | 12 |
| Figura 4: Estrutura da hemicelulose (Fonte: DONATE, 2014)..... | 13 |
| Figura 5: Estrutura da lignina (Fonte: DONATE, 2014)..... | 14 |
| Figura 6: Substâncias precursoras da lignina (Fonte: SALIBA <i>et al.</i> , 2001)..... | 14 |
| Figura 7: Efeitos do pré-tratamento na estrutura da biomassa lignocelulósica (Fonte: adaptado de BALAT, 2011)..... | 16 |
| Figura 8: Processo de pré-tratamento físico utilizando micro-ondas (Fonte: adaptado de AGUILAR-REYNOSA <i>et al.</i> , 2017). | 17 |
| Figura 9: Esquema do pré-tratamento por explosão a vapor (Fonte: adaptado de VITRONE <i>et al.</i> , 2021)..... | 19 |
| Figura 10: Fungo <i>Phanerochaete crysosporium</i> na madeira, um dos mais usados para o pré-tratamento biológico (Fonte: MALVIYA, 2012). | 21 |
| Figura 11: Esquema de hidrólise da biomassa lignocelulósica (Fonte: adaptado de MOHAN,2015). | 22 |
| Figura 12: Etapas da hidrólise enzimática da celulose (Fonte: adaptado de KUMAR, 2019)..... | 23 |
| Figura 13: Esquema de processos utilizados na fermentação alcoólica na produção do E2G (Fonte: adaptado de LIGUORI <i>et al.</i> , 2016)..... | 26 |
| Figura 14: Número de veículos versus Ano no Brasil (Fonte: IBGE, 2023). | 27 |
| Figura 15: Produção de biocombustíveis (em milhares de m ³) x Ano (Fonte: adaptado de Liquid Biofuel Atlas, 2021-2022)..... | 28 |
| Figura 16: Porcentagem da produção total de bioetanol dividida por países em 2021 (Fonte: adaptado de Liquid Biofuel Atlas, 2021-2022)..... | 28 |
| Figura 17: Diagrama esquemático de planta com integração entre a produção de etanol de primeira geração e segunda geração (Fonte: adaptado de DIAS <i>et al.</i> , 2012). | 35 |

1 Introdução

A produção de etanol atualmente é majoritariamente feita através da fermentação do amido ou de açúcares extraídos da cana de açúcar, conhecida como de primeira geração (E1G). Uma das opções para aumentar a produção deste composto é a obtenção do etanol através de biomassas lignocelulósicas, denominado etanol de segunda geração (E2G) ou etanol celulósico. Esta nova perspectiva surge do ponto de vista ecológico, através do interesse dos países em promover um desenvolvimento sustentável e sustentabilidade ambiental, e do ponto de vista econômico, com a possibilidade de obter independência energética (LIMA *et al.*, 2019).

A transição energética tem como foco os combustíveis renováveis, principalmente devido à mudança climática global e esgotamento das reservas de petróleo. Os resíduos da agricultura chegam a cinco bilhões de toneladas, sendo a Ásia, América e Europa os maiores produtores destes. Se considerássemos uma pequena parcela destes resíduos para a produção de etanol celulósico, ocasionaria em uma grande mudança na matriz energética de diversos países (CHERUBIN *et al.* apud BECERRA-PÉREZ *et al.*, 2022).

O novo olhar da sociedade sobre as mudanças climáticas aumentou a procura por fontes sustentáveis de energia. O etanol surgiu como um biocombustível capaz de atenuar os impactos ambientais dos combustíveis fósseis e melhorar o desempenho socioeconômico mundial (DIAS *et al.*, 2012). A partir disto, o etanol se tornou o biocombustível mais usado para transporte mundial e, a busca por menos impactos ambientais trouxe relevância para o uso de biomassa lignocelulósica para diminuir a poluição do meio ambiente e a dependência de combustíveis originados do petróleo (BALAT, 2011).

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de etanol, juntamente com os EUA, utilizando principalmente a cana de açúcar como matéria prima para obtenção do etanol. A produção de uma enorme quantidade de materiais lignocelulósicos, formados pelo bagaço da cana e resíduos agroindustriais, a proibição de queimadas, que causou um aumento na quantidade de resíduos e implementação destes em novas indústrias e processos, viabilizaram um novo pensamento para a utilização destes materiais (DIAS *et al.*, 2012).

Os biocombustíveis surgem como uma alternativa para as preocupações com um ambiente sustentável e emissão de gases que podem trazer alterações climáticas pois possuem vantagens como: são acessíveis através de biomassa, tem um potencial ecológico e são biodegradáveis, podendo contribuir para a sustentabilidade e diminuição da emissão de gases. O bioetanol mostra-se, portanto, como uma ótima opção para diminuir a utilização de combustíveis fósseis e reciclagem do dióxido de carbono (BALAT, 2011)

O objetivo geral do presente trabalho foi realizar uma revisão teórica em relação ao uso de biomassa lignocelulósica para a obtenção do etanol, apresentando os seguintes objetivos específicos;

- Descrever o processo de produção do etanol celulósico e suas etapas;
- Apresentar o cenário do E2G no Brasil e políticas públicas implementadas;
- Discutir sobre inovações e novas tecnologias utilizadas na produção de E2G.

2 Metodologia

Desenvolveu-se a metodologia do presente trabalho de conclusão de acordo com uma revisão da literatura sobre a produção de etanol celulósico em geral e as inovações feitas nos últimos anos neste ramo. Em adição, engloba-se nesta revisão os processos e etapas para obtenção deste composto, assim como o desenvolvimento de novas tecnologias e estudos sobre o etanol de segunda geração. Estes levantamentos foram baseados em artigos científicos, livros e websites, encontrados nas plataformas de busca CAPES Periódicos, Google Acadêmico, SciELO e ResearchGate e em bibliotecas e livrarias. Utilizou-se as palavras-chave “etanol celulósico”, “etanol de segunda geração”, “inovações etanol celulósico/etanol de segunda geração” e “cenários etanol celulósico/etanol de segunda geração”, dando ênfase para os artigos dos últimos 5 anos, mas também considerando artigos mais antigos com informações relevantes para os dias atuais.

3 Caracterização da biomassa e das etapas do processo de obtenção do etanol celulósico

3.1 Biomassa Lignocelulósica

A biomassa lignocelulósica é composta pelos materiais secos dos vegetais e possui grande disponibilidade ao redor do planeta. É constituída principalmente pela junção entre três macromoléculas, entre as quais estão dois polissacarídeos, denominados hemicelulose e celulose, e um polímero aromático, a lignina. Na Figura 1 ilustra-se a presença desses constituintes na estrutura da parede celular da biomassa lignocelulósica.

Esta biomassa é separada em biomassa virgem, resíduos de indústrias e culturas destinadas à produção de energia modificadas geneticamente, como a cana-energia e o capim-elefante. O Brasil dispõe de amplas variações de resíduos agrícolas e industriais, o que promove interesse em investimentos no setor de E2G (LIMA *et al.*, 2019).

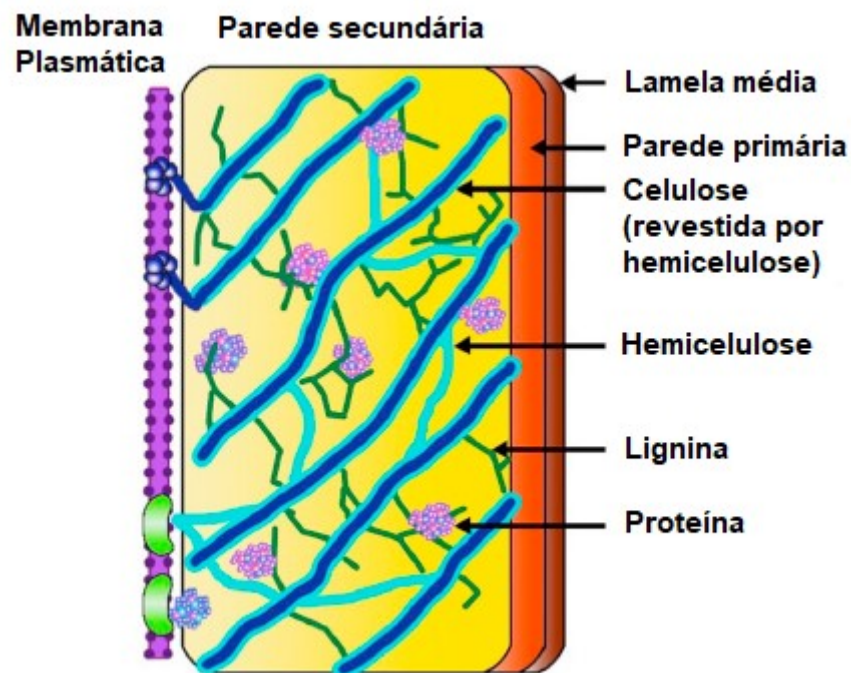


Figura 1: Estrutura da parede celular da biomassa lignocelulósica (Fonte: adaptado de LIU *et al.*, 2019).

A biomassa pode ser obtida de várias matérias primas, como por exemplo a cana-de-açúcar, milho, arroz, trigo, madeira, entre outros. O foco é nas fontes advindas de plantações por serem encontradas abundantemente dependendo da localização geográfica, sendo que a utilização é intrinsicamente ligada à composição química, práticas de cultivo, disponibilidade de terra para produção e panorama econômico da matéria prima (BALAT, 2011)

Na Tabela 1 encontra-se a composição da biomassa lignocelulósica para as matérias-primas com plantações mais abundantes no mundo.

Tabela 1: Composição da biomassa lignocelulósica para as matérias primas da cana, trigo, arroz e milho (Fonte: SANTOS *et al*, 2012).

| Matéria-prima | % Celulose | % Hemicelulose | % Lignina |
|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| Palha de cana | 40-44 | 30-32 | 22-25 |
| Bagaço de Cana | 32-48 | 19-24 | 32-32 |
| Palha de trigo | 30 | 50 | 15 |
| Palha de arroz | 43,3 | 26,4 | 16.3 |
| Talo de milho | 35 | 25 | 35 |
| Espiga de milho | 45 | 35 | 15 |

3.1.1 Celulose

A celulose é um polissacarídeo composto por moléculas de glicose localizadas na parede celular da biomassa, formada por ligações glicosídicas β -1,4, em uma estrutura linear. Entretanto, a celulose é uma macromolécula que possui diversas formas físicas, devido a diferentes origens e processos que o material celulósico é submetido, ou seja, sua estrutura será diretamente influenciada pelo tipo de substrato utilizado e características deste, como por exemplo tamanho e porosidade (Klemm *et al.* apud LIU *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2019). A celulose é um polímero formado por várias unidades de celobioses, que são os dissacarídeos repetitivos que constituem a estrutura do polissacarídeo, conforme ilustrado na Figura 2.

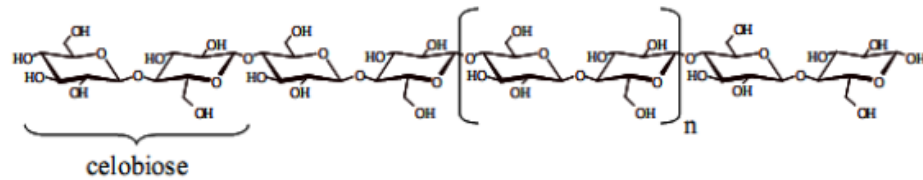


Figura 2: Estrutura da celulose (Fonte: TIMAR-BALAZSY & EASTOP apud CARVALHO, 2011)

Observa-se na Figura 3 a organização das estruturas da celulose. A unidade celular da celulose é formada pela parede primária, lamela média e a parede secundária, formada por polímeros que quando estruturados em corrente se tornam uma fibra elementar. A junção dessas fibras forma a microfibrila, que então se agregam para formar a macrofibrila (TIMAR-BALAZSY & EASTOP, 1998)

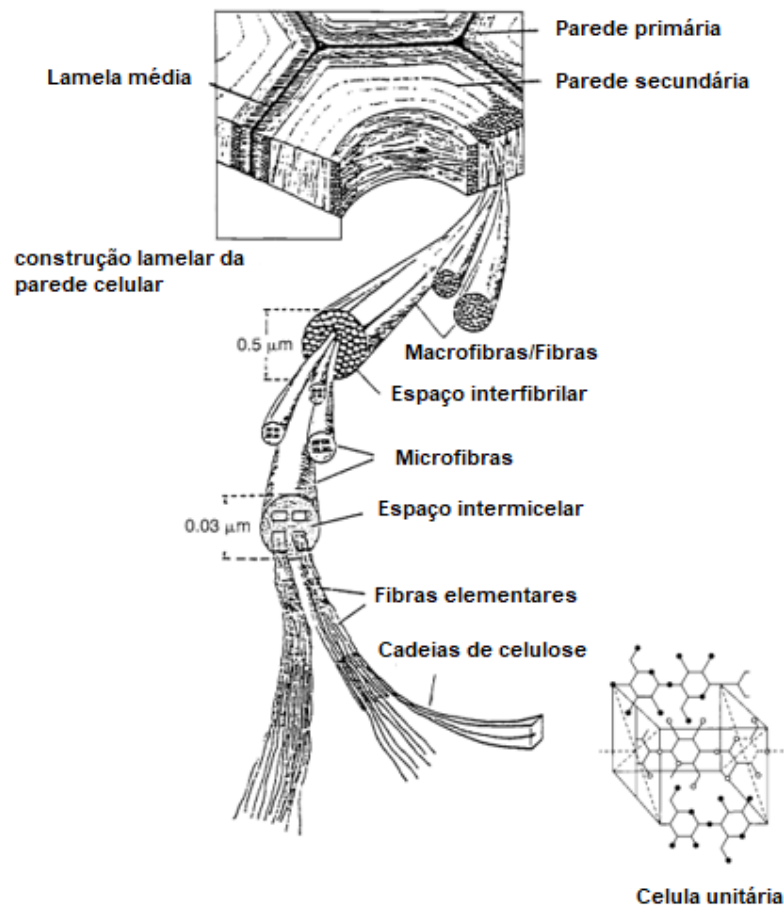


Figura 3: Organização da celulose (Fonte: adaptado de TIMAR-BALAZSY & EASTOP, 1998)

3.1.2 Hemicelulose

A hemicelulose, apresentada na Figura 4, é um polímero composto principalmente por pentoses (xiloses e arabinoses) e hexoses (galactose, glicose e manose), entre outros compostos. Ou seja, a hemicelulose é um polissacarídeo heterogêneo formando várias ramificações. A classificação destas é feita de acordo com os resíduos de açúcares na cadeia principal. Há uma forte ligação não-covalente entre a celulose e a hemicelulose, o que faz com que estas se entrelacem juntamente com a lignina, proporcionando resistência e recalcitrância às paredes celulares. A hemicelulose, entretanto, possui uma estrutura amorfa, diferentemente da estrutura linear observada na celulose, podendo ser facilmente hidrolisada resultando em açúcares monoméricos (LIU *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2019; BALAT, 2011).

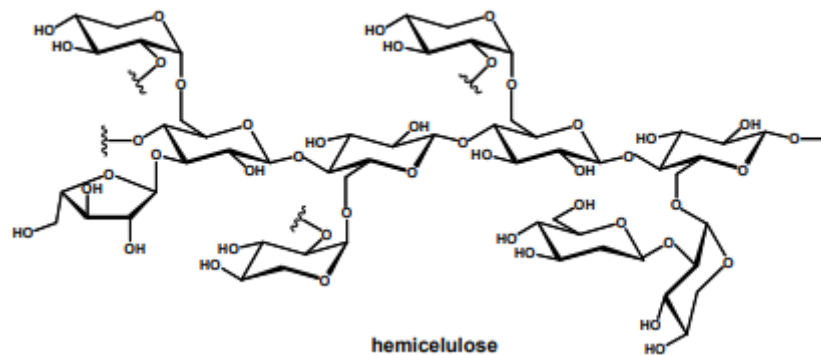


Figura 4: Estrutura da hemicelulose (Fonte: DONATE, 2014)

3.1.3 Lignina

A lignina, Figura 5, é a macromolécula definida como um polímero aromático que confere rigidez para a parede das células, gerando ligação entre estas e, conseqüentemente, resistência ao impacto e compressão de suas estruturas, devido a uma matriz composta por vários grupos funcionais, como hidroxilas e carbonilas, que concedem grande polaridade para a molécula. Além disso, a lignina faz o transporte de água e nutrientes. A lignina não pode ser utilizada como matéria-prima para a obtenção de etanol, porém a degradação desta pode afetar a produção de etanol, devido à formação de inibidores e sua capacidade de tornar a celulose inacessível, afetando a hidrólise enzimática (LIU *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2019; VASIĆ *et al.*, 2021; BALAT, 2011).

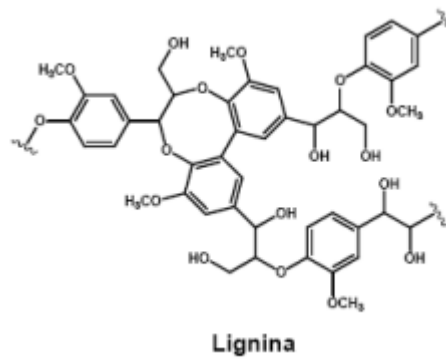


Figura 5: Estrutura da lignina (Fonte: DONATE, 2014)

A lignina representa grande parte do carbono orgânico não fóssil, sendo o segundo polímero natural mais encontrado na Terra. Representando até 25% da biomassa lignocelulósica, é derivada da polimerização desidrogenativa do álcool coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-cumarílico, estruturas fenilpropanodioicas, entendidas como precursoras da lignina (BES *et al*, 2019). Na Figura 6 são apresentados alguns precursores da lignina.

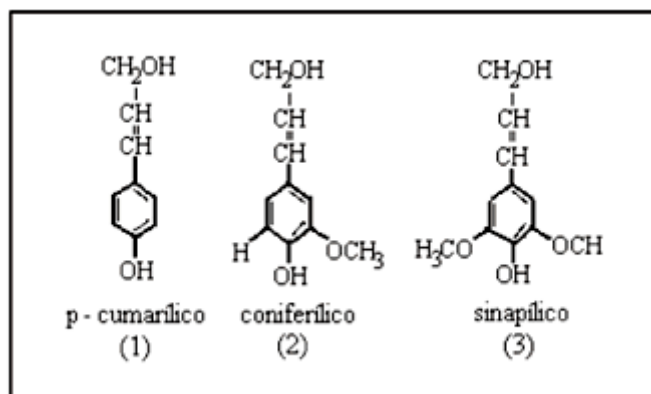


Figura 6: Substâncias precursoras da lignina (Fonte: SALIBA *et al*, 2001)

3.2 Pré-Tratamento

Para alcançar a celulose, rodeada pela hemicelulose e lignina, devem ser utilizados métodos adequados para aumentar a acessibilidade a esta e a eficiência da celulase, surgindo assim o pré-tratamento como uma alternativa (ZHU, 2021).

O processo de produção do E2G começa no pré-tratamento, que representa pelo menos 20% do total de custos da produção. É muito importante que esta etapa seja realizada corretamente, pois o custo das etapas subsequentes pode aumentar muito, uma vez que o pré-tratamento afeta diretamente a eficiência da etapa de hidrólise enzimática e geração de inibidores. O objetivo do pré-tratamento é solubilizar os principais componentes da biomassa lignocelulósica, de modo a proporcionar a recuperação das frações solubilizadas e facilitar a digestibilidade da biomassa durante a próxima etapa, de hidrólise enzimática (YANG & WYMAN apud LIMA *et al.*, 2019).

A lignina é o componente que mais afeta a recalcitrância da biomassa, por ser o principal mecanismo de defesa desta contra a hidrólise enzimática, afetando a eficiência das enzimas e da degradação da celulose. Para superar esse efeito recalcitrante, é utilizado o pré-tratamento. Um pré-tratamento eficiente é avaliado na produção mínima de inibidores, eficiência energética, produção de produtos de valor agregado, mitigação de perdas de açúcares e na facilitação do acesso para as enzimas (VASIĆ *et al.*, 2021).

Para escolher o tipo de pré-tratamento, várias características devem ser avaliadas, dentre elas (VASIĆ *et al.*, 2021; BALAT, 2011):

- a característica da biomassa, como por exemplo o teor de lignina
- custo moderado de reatores e de operação, pois as biomassas podem ser bem abrasivas
- formação mínima de inibidores
- minimização de energia necessária
- prevenção da destruição da celulose e hemicelulose

Cada tipo de pré-tratamento possui suas vantagens e desvantagens, sendo que a escolha deverá ser baseada no tipo de biomassa utilizada e produtos finais desejados. Os pré-tratamentos classificam-se em quatro grupos: físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, sendo que estes podem ser combinados, denominando-se pré-tratamento sequencial, buscando sempre a versatilidade da matéria prima, produção mínima de inibidores e rendimento máximo de carboidratos (LIMA *et al.*, 2019; PADELLA *et al.*, 2019). Ilustra-se na Figura 7 o efeito de um pré-tratamento adequado sobre a estrutura da biomassa lignocelulósica.

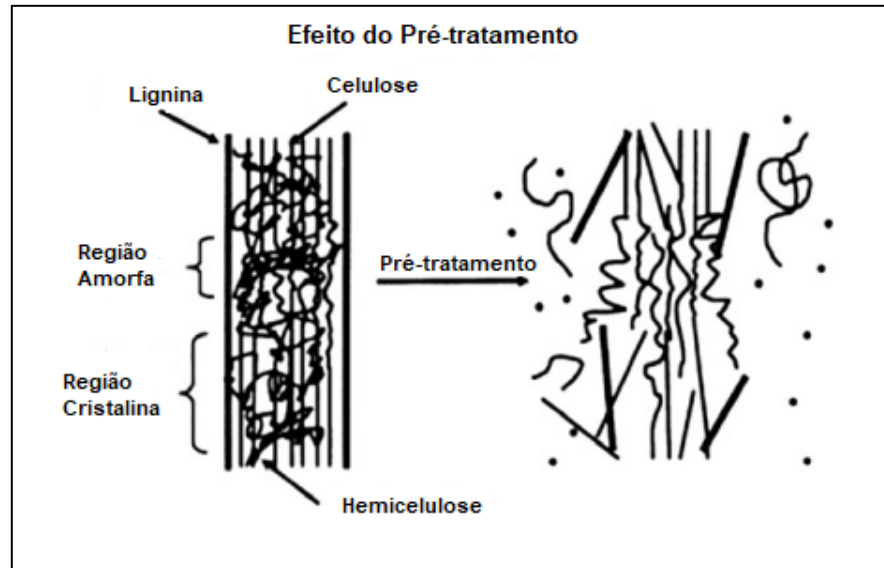


Figura 7: Efeitos do pré-tratamento na estrutura da biomassa lignocelulósica (Fonte: adaptado de BALAT, 2011)

Portanto, o pré-tratamento é baseado em proporcionar um aumento da área de superfície interna por um inchaço da parede celular da biomassa, ocorrendo a diminuição do grau de polimerização, da cristalinidade e destruição de ligações da celulose, hemicelulose e lignina (VITRONE *et al.*, 2021).

3.2.1 Pré-tratamentos físico

O pré-tratamento físico proporciona o aumento da área superficial da biomassa através da redução do tamanho da partícula ou de um distúrbio na regularidade estrutural desta, não havendo alteração na composição química do material. Com estas alterações, os pré-tratamentos físicos buscam sempre um aumento na acessibilidade da celulose, redução da cristalinidade da estrutura da biomassa e eficiência de subsequentes pré-tratamentos (LIMA *et al.*, 2019; ZHU, 2021; BALAT, 2011).

Os principais exemplos deste processo são: a trituração ou moagem, a radiação (raios γ e micro-ondas), baseada na fricção e colisão das moléculas para fragmentar a estrutura da biomassa, a extrusão e o pré-tratamento ultrassônico. Apresenta-se na Figura 8 o processo de pré-tratamento físico utilizando micro-ondas com maior detalhe (LIMA *et al.*, 2019; ZHU, 2021).

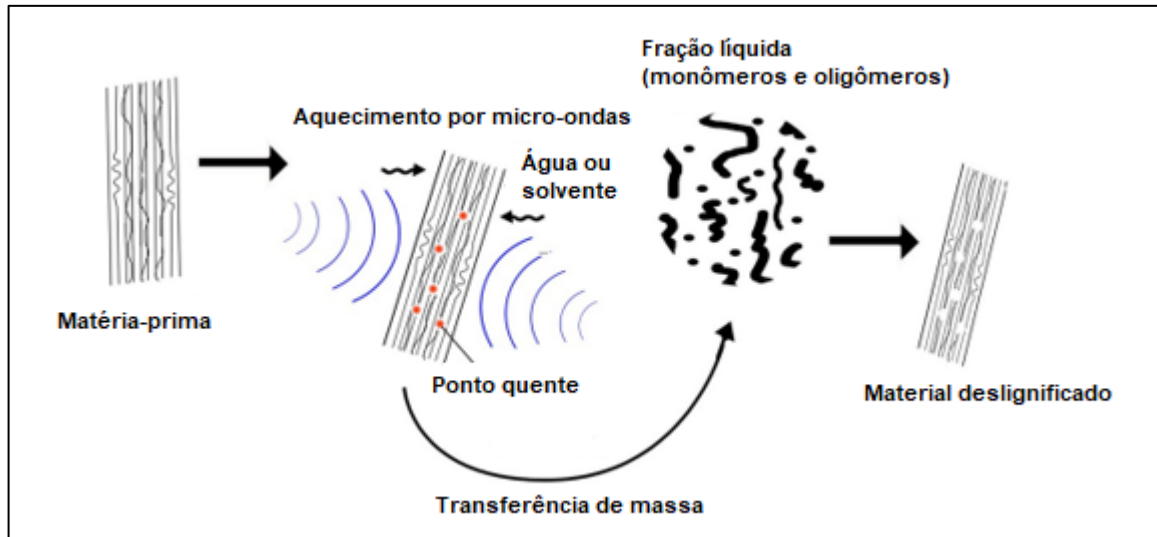


Figura 8: Processo de pré-tratamento físico utilizando micro-ondas (Fonte: adaptado de AGUILAR-REYNOSA *et al*, 2017).

Estes métodos requerem um alto consumo energético, proporcional ao tamanho almejado e características da biomassa. Além disso, o custo de manutenção é elevado, devido à abrasividade da biomassa, que promove desgaste físico. Somando-se ao custo alto de instalação, estes processos se tornam pouco viáveis economicamente para a produção de biocombustíveis (LIMA *et al.*, 2019)

3.2.2 Pré-tratamento químico e físico-químico

Os pré-tratamentos químicos e físico-químicos baseiam-se no uso de reagentes químicos para remover parte da lignina ou da hemicelulose, diminuindo a cristalinidade geral e facilitando o acesso à camada interior da biomassa. Dependendo do processo escolhido, promovem uma alta solubilização das frações de hemicelulose e lignina, aumentando a área superficial da biomassa (LIMA *et al.*, 2019; ZHU, 2021).

A solubilização das hemiceluloses pode ser feita de maneira parcial ou quase total, e os principais tipos utilizados são os pré-tratamentos com ácidos diluídos, hidrotérmico e explosão a vapor.

O pré-tratamento com ácidos diluídos se aplica a uma ampla variedade de biomassas lignocelulósicas e produz um licor rico em açúcares monoméricos. A hidrólise da hemicelulose no pré-tratamento ácido é baseada na vulnerabilidade da ligação glicosídica dela. Entretanto, deve-se ter uma concentração de ácido

estipulada, para não ocorrer formação de inibidores ou a corrosão dos reatores. Este pré-tratamento remove uma grande quantidade de hemicelulose e resulta em um produto rico em xilo-oligômeros. Porém, existem algumas desvantagens, como poluição ambiental, corrosão de equipamentos e formação de resíduos tóxicos (LIMA *et al.*, 2019; ZHU, 2021). Os tratamentos com alto pH (alcalinos) removem grande parte da lignina e uma pequena fração da hemicelulose, enquanto os com baixo pH (ácidos) removem a maioria das hemiceluloses e pouca quantidade de lignina. Os ácidos mais utilizados para catalisar a hidrólise são os ácidos sulfúrico e clorídrico, estes irão quebrar as ligações covalente e de hidrogênio que unem a biomassa lignocelulósica (VITRONE *et al.*, 2021).

O tratamento hidrotérmico, realizado com auxílio de água em altas temperaturas, vêm recebendo importância pois não requer reagentes adicionais, aumentando o interesse no quesito ambiental e, além disso, possui alta recuperação de hemiceluloses e pouco risco de corrosão. Entretanto, a produção de açúcares monoméricos é baixa, sendo necessária uma etapa de hidrólise dos oligossacarídeos e aumentando a necessidade de enzima (LIMA *et al.*, 2019; ZHU, 2021).

O pré-tratamento por explosão a vapor, esquematizado na Figura 9, é um dos mais utilizados para uso em escala industrial, através de altas temperaturas e pressões de vapor saturado, realizando uma ruptura mecânica neste processo através de um vapor de alta pressão e uma rápida descompressão. Neste processo, a maior parte da hemicelulose é hidrolisada em pentoses, com pequena perda de celulosas e não-solubilização da lignina. O dispositivo de explosão a vapor é composto principalmente pela caldeira a vapor, o reator e o tanque de explosão. Neste caso, a operação é feita em batelada normalmente, pois uma operação contínua acarreta em maiores custos e complexidade, podendo ser usado vários tanques ao mesmo tempo. Uma das vantagens é o aumento da área superficial, que provoca aumento da conversão de biomassa no processo subsequente, de hidrólise enzimática, além da elevada solubilização das hemiceluloses e menor impacto ambiental. Porém, ocorre formação de inibidores devido a degradação dos açúcares e lignina (LIMA *et al.*, 2019; ZHU, 2021; LIU *et al.*, 2019; DIAS *et al.*, 2012; VITRONE *et al.*, 2021).

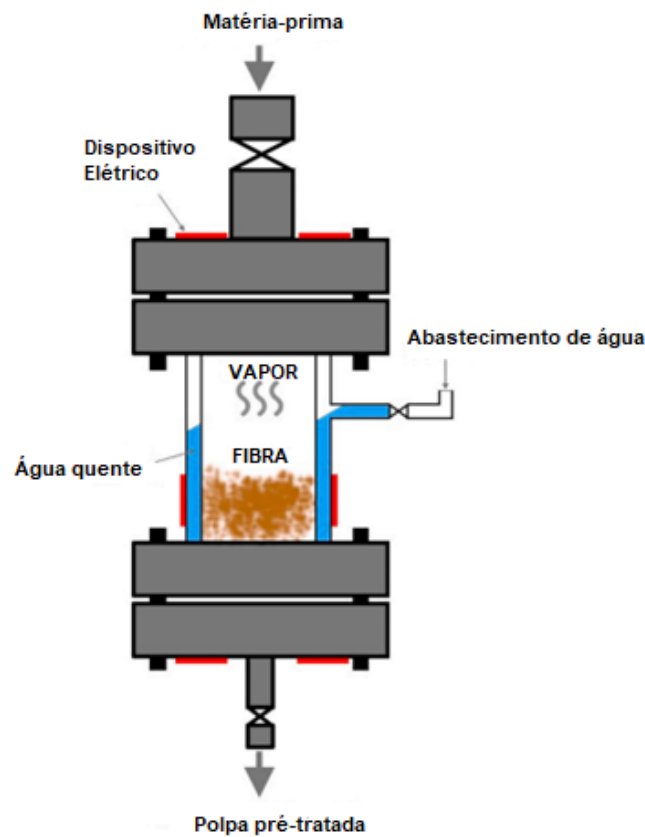


Figura 9: Esquema do pré-tratamento por explosão a vapor (Fonte: adaptado de VITRONE *et al.*, 2021)

A solubilização das ligninas também pode ser feita parcialmente ou quase total, para facilitar o acesso das enzimas. É favorável solubilizar a lignina pois ela proporciona a adsorção inespecífica das enzimas em sua superfície, diminuindo a conversão da biomassa. É feita através da clivagem de ligações ou introdução de grupos hidrofóbicos e os principais pré-tratamentos baseados na solubilização da lignina são a deslignificação alcalina, o pré-tratamento organossolve e a expansão de fibra por amônia (AFEX).

Na deslignificação alcalina, as ligações ésteres intermoleculares entre as hemiceluloses e lignina são decompostas, promovendo a solubilização parcial destas e o inchamento da celulose, expondo-a ao ataque enzimático. Os reagentes mais comuns utilizados são o hidróxido de sódio e de cálcio e carbonato de sódio. Como desvantagens deste processo podemos citar o custo destes reagentes e o fato de ser um processo demorado devido à necessidade de baixas temperaturas. Já na oxidativa, os reagentes de oxidação liberam enormes quantidades de radicais livres, resultando em uma alta fragmentação e remoção da lignina. Os principais reagentes

utilizados são o ozônio, oxigênio e peróxido de hidrogênio. Como desvantagens, pode-se citar o alto custo frente a outros processos (LIMA *et al.*, 2019).

O pré-tratamento organossolve é feito através da solubilização de lignina por solventes orgânicos como o etanol, metanol e acetona, sendo que o mais utilizado é o etanol por sua baixa toxicidade e facilidade de recuperação. Como vantagens deste processo pode-se citar o baixo impacto ambiental e recuperação de lignina de alta qualidade como subproduto. Entretanto, este possui um custo elevado e há riscos em lidar com grandes volumes de solventes orgânicos, o que limita a sua utilização (LIMA *et al.*, 2019).

A expansão de fibra por amônia (AFEX) é um processo de pré-tratamento físico-químico alcalino, no qual a biomassa entra em contato com amônia no estado líquido em alta pressão e temperatura e sujeita subsequentemente a uma rápida descompressão, que causa a sacarificação da biomassa lignocelulósica, aumentando a eficiência da posterior hidrólise do material. O uso da AFEX não é recomendado para matérias primas com alta porcentagem de lignina e recomenda-se a reciclagem da amônia para redução de custo e proteção do meio ambiente (BALAT, 2011)

3.2.3 Pré-tratamentos biológico

O pré-tratamento biológico baseia-se em microrganismos e enzimas que promovem a degradação seletiva das hemiceluloses e lignina. Os fungos causadores da podridão branca, como o *Phanerochaete chrysosporium*, Figura 10, são os mais utilizados. Estes fungos metabolizam a lignina e hemicelulose, deixando grande parte da celulose, o que aumenta o número de grupos de hidroxila e cristalinidade (BALAT,2011).

Este processo apresenta vantagens como baixo consumo de energia e não necessidade de reagentes químicos, o que faz com que seja um processo que não causa muitos danos ambientais, porém possui baixa eficiência e demanda longo tempo de reação e reatores com grandes volumes, além de um ambiente ideal para proliferação, limitando sua aplicação industrial (LIMA *et al.*, 2019).



Figura 10: Fungo *Phanerochaete chrysosporium* na madeira, um dos mais usados para o pré-tratamento biológico (Fonte: MALVIYA, 2012).

3.3 Hidrólise

A escolha de qual hidrólise será usada no processo depende de vários fatores, dentre estes o tipo de biomassa lignocelulósica, as condições do processo, o tipo de pré-tratamento anterior, a cepa da levedura que será utilizada na fermentação e o orçamento do projeto. A hidrólise da hemicelulose e celulose resulta em moléculas de arabinose, xilose e glicose, que serão fermentadas em etanol.

Ter conhecimento sobre a estrutura dos componentes da biomassa lignocelulósica e os produtos e subprodutos que se formam na hidrólise desta é primordial para o aumento da produção de etanol (LIU *et al.*, 2019.),

3.3.1 Hidrólise Ácida

A hidrólise ácida, esquematizada na Figura 11, é baseada na exposição da biomassa lignocelulósica em uma solução química com ácido durante um período estipulado a uma certa temperatura, resultado em monômeros advindos da celulose e hemicelulose (BALAT,2011).

A utilização de ácidos concentrados como ácido sulfúrico (H_2SO_4) e clorídrico (HCl) para realizar o tratamento da biomassa lignocelulósica é bem conhecida. Apesar de esses agentes desempenharem essa função de maneira competente, estes ácidos são tóxicos e podem causar danos às estruturas dos reatores devido à corrosão,

sendo necessário a compra de reatores que resistam ao efeito destes compostos. Além disso, o processo é economicamente viável quando há reaproveitamento do ácido (SUN & CHENG, 2002).

Quando são usados ácidos concentrados, a operação é feita em baixa temperatura (em torno de 40 °C), com um alto consumo de ácido, acarretando em maior corrosão do reator, e menores taxas de reação, o que causa em um aumento do tempo do processo. Estes ácidos na sua forma diluída possuem menor consumo e maiores taxas de reação, o que aumenta o efeito da hidrólise na celulose, e também criam um sistema com condições mais amenas, sendo feito em condições de temperatura alta (maior que 160 °C), quando o teor de sólidos é baixo, e em temperatura menores, quando o teor de sólidos é alto (SUN & CHENG, 2002).

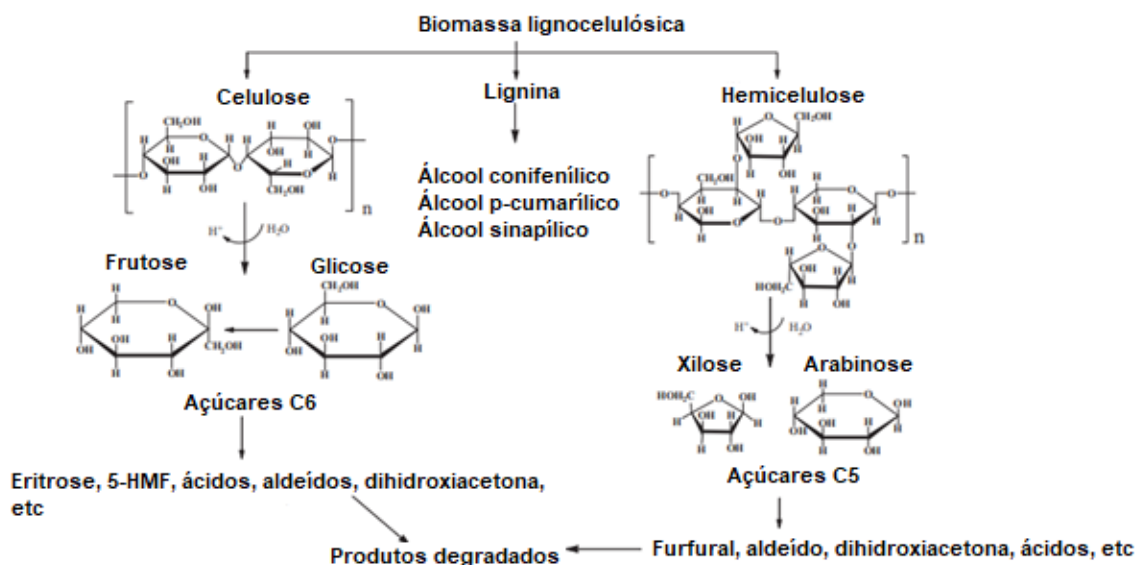


Figura 11: Esquema de hidrólise da biomassa lignocelulósica (Fonte: adaptado de MOHAN, 2015).

Para obter rendimentos altos de glicose da celulose, a utilização de ácidos concentrados é mais efetiva, porém acarreta na formação de inibidores que podem atrapalhar o processo de fermentação. Para diminuir esta degradação que forma estes subprodutos indesejados, a hidrólise com ácidos diluídos é feita em duas etapas, com a solubilização da hemicelulose em condições mais amenas e em condições mais severas na sequência para obtenção de maior rendimento de glicose através da celulose (BRETHAUER & WYMAN, 2010)

3.3.2 Hidrólise Enzimática

A hidrólise enzimática, esquematizada na Figura 12, é um importante processo na conversão de etanol a partir da biomassa lignocelulósica. A conversão de celulose para glicose é feita por enzimas denominadas celulasas, em condições de temperatura na faixa de 40 a 50 °C e pH de 4,5 a 5 (VASIĆ *et al.*, 2021).

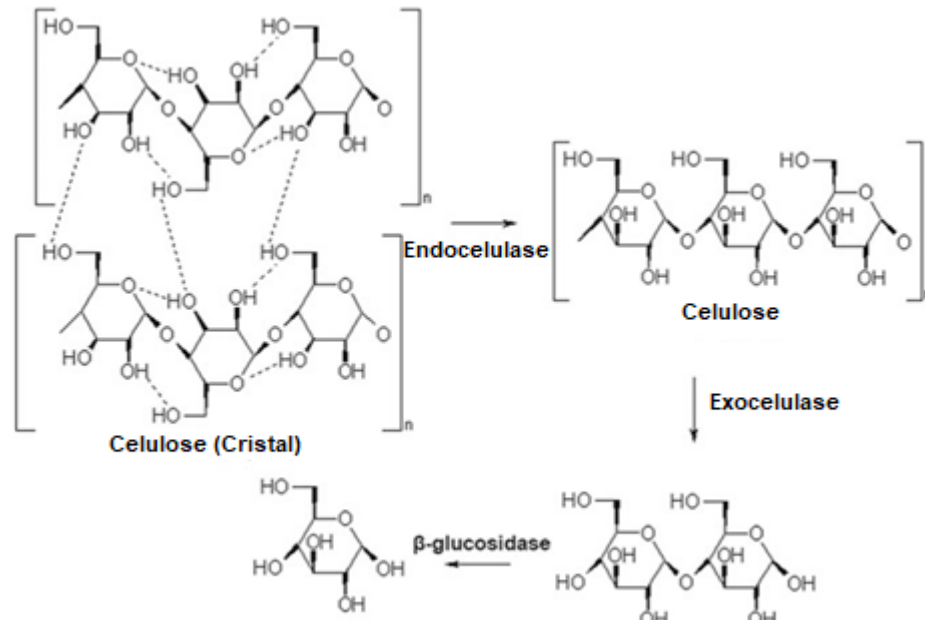


Figura 12: Etapas da hidrólise enzimática da celulose (Fonte: adaptado de KUMAR, 2019)

A hidrólise enzimática é totalmente influenciada pelo pré-tratamento, sendo que a taxa de hidrólise é afetada pela estrutura cristalina da celulose, devido as ligações entre a lignina, hemicelulose e celulose. O pré-tratamento interfere nestas ligações e propicia uma melhor taxa de hidrólise, de acordo com a biomassa utilizada e o produto final requisitado (VASIĆ *et al.*, 2021).

Os fatores que influenciam a hidrólise enzimática são listados abaixo (VASIĆ *et al.*, 2021):

- Cristalinidade da celulose
- Tamanho da partícula de biomassa lignocelulósica
- Área de superfície acessível e volume dos poros da biomassa

As enzimas possuem vantagem por serem catalisadores de alta especificidade, porém o processo é mais lento em relação a hidrólise ácida, além de ser necessária uma tecnologia mais complexa para produção, acarretando em um alto custo de compra, porém não são encontrados tantos inibidores como na hidrólise ácida, devido a seletividade das enzimas. Em adição, a própria lignina pode ser um inibidor durante a hidrólise ao se depositar na celulose da biomassa, impossibilitando o acesso das enzimas, ou ao adsorver as enzimas em si, diminuindo a conversão da celulose. Porém, apesar da lignina se comportar como uma barreira física e poder limitar a acessibilidade aos polissacarídeos, esta vem ganhando olhares pelo efeito de diluição quando combinada com sólidos no pré-tratamento, o que afeta a hidrólise positivamente (BON *et al.* apud LUCARINI *et al.*, 2017; PADELLA *et al.*, 2019).

3.4 Fermentação Alcoólica

A fermentação alcoólica no processo de produção do E2G pode ser realizada por diversos microrganismos, como por exemplo *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis* e *Escherichia coli*. É um processo bioquímico que utiliza estes microrganismos para produzir enzimas decompositoras de biomassa em um ambiente sem a presença de oxigênio. Após a etapa de hidrólise, utiliza-se as leveduras para digerir os açúcares monoméricos resultantes, obtendo o etanol como produto (AUI *et al.*, 2021)

É necessário a utilização de leveduras que metabolizem sacarose, frutose e glicose em etanol, como a *Saccharomyces cerevisiae*, porém ainda são necessários microrganismos fermentadores de pentoses para trabalhar em conjunto com estas leveduras. O desenvolvimento de organismos geneticamente modificados para fermentar pentoses e hexoses simultaneamente vem sendo estudado, sendo que estes devem ser tolerantes aos inibidores formados no processo (VASIĆ *et al.*, 2021)

Hidrólise separada da fermentação (SHF): Reatores diferentes realizam a hidrólise da celulose e fermentação, considerando também as pentoses. A celulose é hidrolisada em glicose pelas celulasas, com temperaturas na faixa de 35 °C até 50 °C dependendo do organismo fermentador. A vantagem é que cada um dos processos é feito em condições ideais, porém a hidrólise da celulose não ocorre completamente e o rendimento é baixo (ROSA & GARCIA, 2009; AUI *et al.*, 2021; NUNES *et al.*, 2014).

Sacarificação e fermentação simultânea (SSF): A fermentação da glicose e hidrólise da celulose ocorrem no mesmo reator, porém a fermentação das pentoses é realizada separadamente. A faixa de temperatura varia entre 30 e 55 °C e as vantagens constituem-se na redução da capacidade inibitória dos produtos da hidrólise nas celulasas, maior rendimento de produto e menor custo e tempo em relação ao SHF. Entretanto, a faixa de temperatura estabelecida atrapalha a cinética enzimática do processo (ROSA & GARCIA, 2009; AUI *et al.*, 2021; NUNES *et al.*, 2014; VASIĆ *et al.*, 2021).

Sacarificação e co-fermentação simultânea (SSCF): é diferente da SSF pois a fermentação das pentoses e hexoses acontece em um só reator, utilizando

organismos geneticamente modificados fermentadores destes diferentes tipos de açúcares. Este processo reduz o custo se comparado ao SSF, porém há um menor rendimento (AUI *et al.*, 2021; NUNES *et al.*, 2014)

Processamento biológico consolidado (CBP): O processo é realizado em uma operação unitária única, em que ocorre a integração de todos os processos biológicos, considerando também a produção de enzimas, com tecnologia e engenharia genética. Há menor gasto de energia e diminuição de custos, entretanto o custo pode aumentar exponencialmente de acordo com a fonte de biomassa e pré-tratamento utilizado, assim como do preço das enzimas, que pode ser elevado. Este processo ainda não é utilizado, devido a sua alta complexidade e ao alto investimento inicial (ROSA & GARCIA, 2009; AUI *et al.*, 2021; NUNES *et al.*, 2014).

Na Figura 13, são esquematizados os processos fermentativos para a produção de E2G.

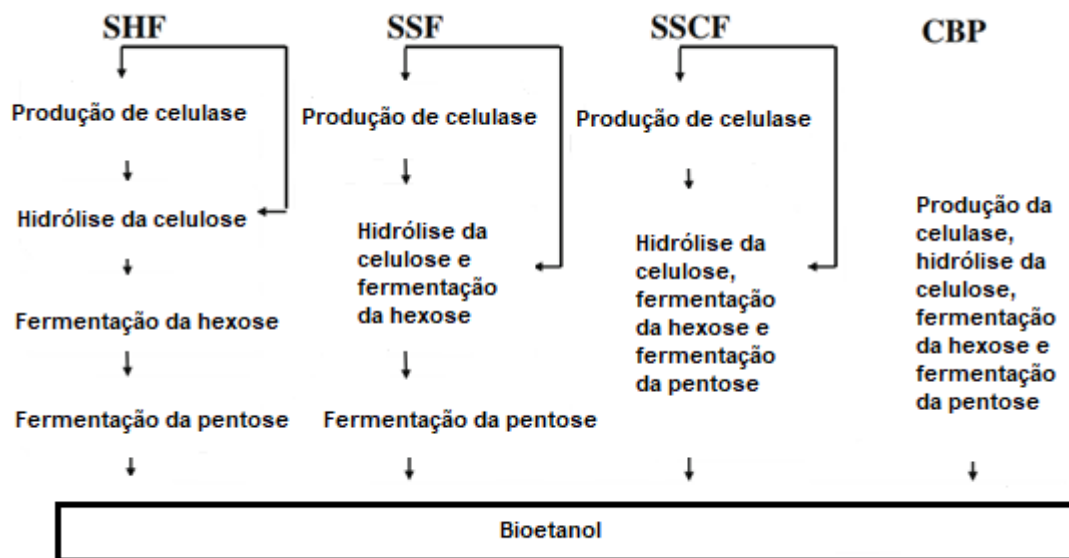


Figura 13: Esquema de processos utilizados na fermentação alcoólica na produção do E2G (Fonte: adaptado de LIGUORI *et al.*, 2016).

4 O cenário brasileiro

O setor de transporte é responsável por grande parte da emissão global de monóxido e dióxido de carbono e o etanol surge como uma alternativa, pois a quantidade emitida é menor se comparada com outros combustíveis. No Brasil, a área de combustíveis líquidos segue sendo um dos principais mercados para investimentos. O aumento da frota de veículos na última década, Figura 14, de 51% e o predominante fornecimento desta pela produção interna de etanol ainda atrai a atenção de investidores para o território brasileiro (IBGE, 2023). Entretanto, o etanol vem perdendo a competitividade para outros combustíveis, devido à estagnação de investimentos, tecnologias e processos nas usinas produtoras (MILANEZ *et al*, 2015).

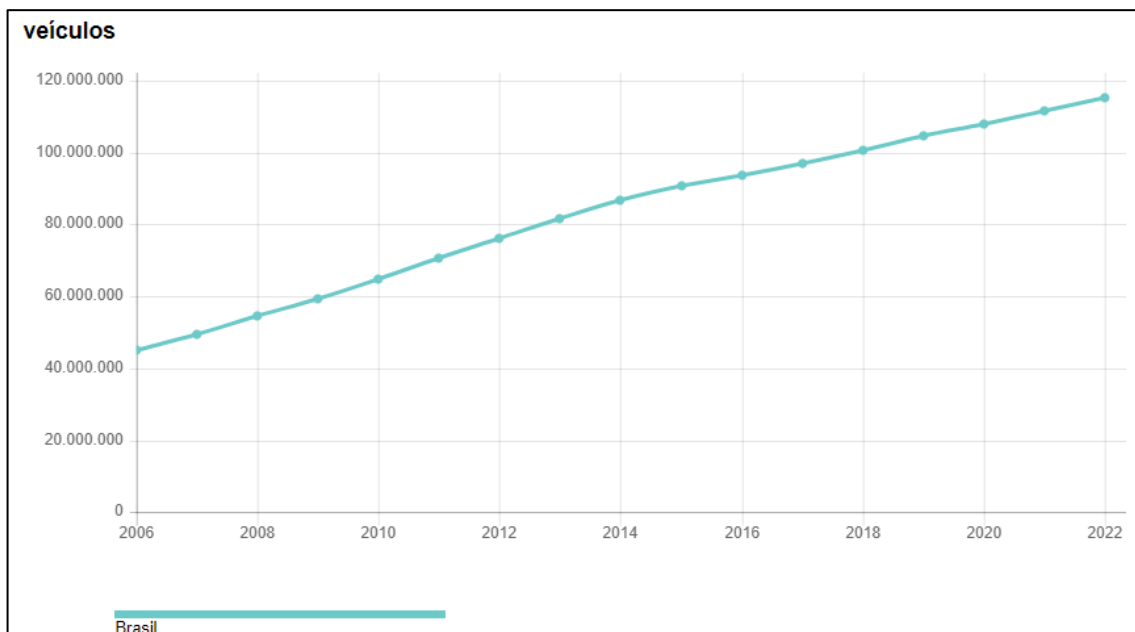


Figura 14: Número de veículos versus Ano no Brasil (Fonte: IBGE, 2023).

Devido ao fácil acesso a terras e processos agropecuários, além de um clima propenso para a produção, o Brasil é um dos pioneiros na obtenção do etanol celulósico. Entretanto, para manter esta posição favorável, investimentos em novas tecnologias devem ser feitos anualmente para manter a competitividade perante o mercado (BUCKERIDGE *et al.*, 2014)

Observa-se na Figura 15 o crescimento da produção mundial de bioetanol ao longo dos últimos anos. Percebe-se que no ano de 2020 houve uma queda de produção, devido à pandemia do Coronavírus. O Brasil demonstrou grande parcela

na produção mundial de bioetanol, visto que em 2021 foi responsável por 29% da desta, conforme Figura 16.

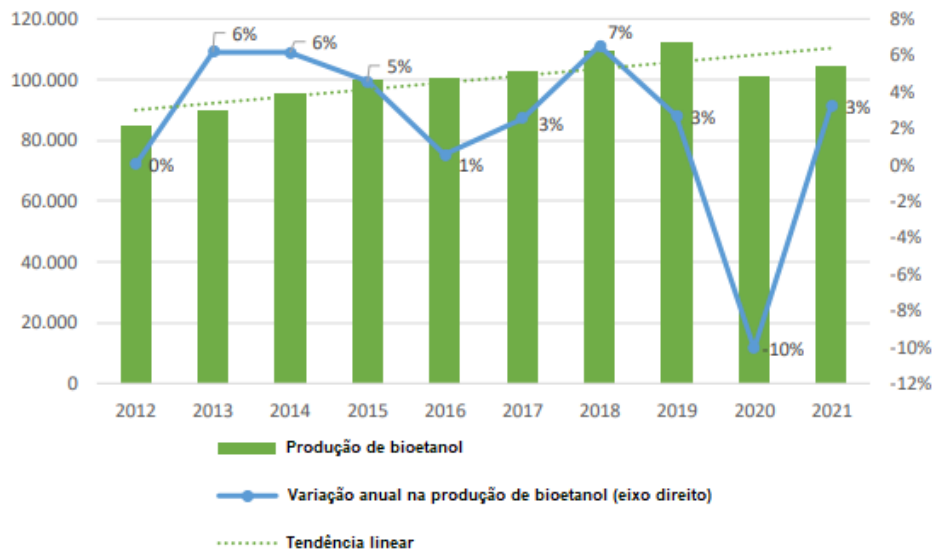


Figura 15: Produção de biocombustíveis (em milhares de m³) x Ano (Fonte: adaptado de Liquid Biofuel Atlas, 2021-2022)

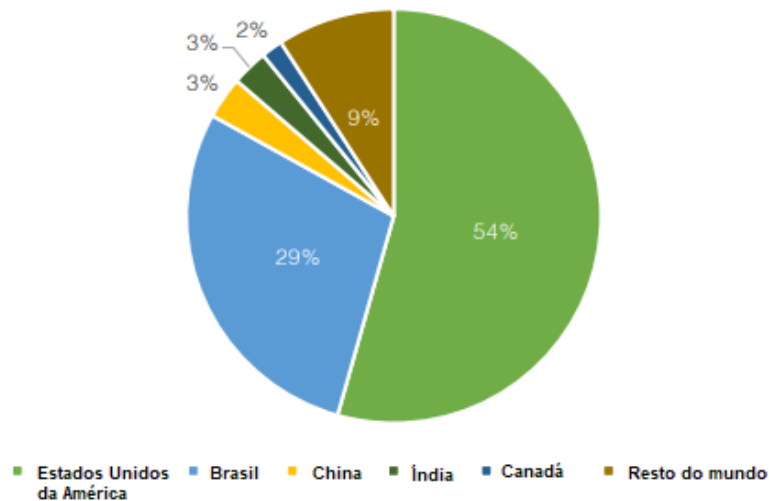


Figura 16: Porcentagem da produção total de bioetanol dividida por países em 2021 (Fonte: adaptado de Liquid Biofuel Atlas, 2021-2022).

No terreno brasileiro, obtém-se o E2G pelo processamento do bagaço da cana de açúcar, através da hidrólise do bagaço ou da palha. A primeira planta de etanol de segunda geração do Brasil, a Bioflex 1 (GranBio), localizada em São Miguel dos

Campos (AL), veio através de uma ação conjunta de investimento do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e da Finep (Financiadora de Estudos e Projetos), através da iniciativa PAISS (Programa de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico). O mercado almejava que o E2G viria a se tornar essencial para a produção energética do país. Porém, as metas estabelecidas não foram alcançadas, devido a problemas operacionais decorridos pelo processo de obtenção do etanol, causando produção baixa (LORENZI & ANDRADE, 2019).

A Raízen também recebeu investimentos do PAISS e se destaca como uma das maiores neste setor. A empresa possui uma planta ativa em Piracicaba (SP) desde 2014, outra em produção no Parque de Bioenergia Bonfim, em Guariba (SP), e recentemente anunciou a construção de mais duas plantas de etanol celulósico próximas aos parques de bioenergia localizados em Valparaíso (SP) e Barra Bonita (SP), sendo que a capacidade de produção considerando todas unidades pode alcançar 164 milhões de litros/ano.

Na Tabela 2 abaixo são apresentadas as duas principais iniciativas da produção de etanol celulósico no Brasil e suas características.

Tabela 2: Principais iniciativas de produção de E2G no Brasil (Fonte: LORENZI & ANDRADE, 2019; Raízen, 2022; Raízen, 2023; GranBio, 2023).

| Empresa | GranBio | Raízen |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Capacidade de produção | 30 milhões de litros/ano | 164 milhões de litros/ano |
| Produção última safra (22-23) | - | 30 milhões de litros |
| Custo da planta | R\$350 milhões | R\$231 milhões |
| Financiamento (BNDES) | R\$1,225 bilhão | R\$207 milhões |
| Pré-tratamento utilizado | Hidrotérmico | Explosão a vapor |
| Fornecedor de enzimas | Novozymes | Novozymes |
| Matéria-prima | Bagaço (cana-energia) e palha | Bagaço |

A utilização dos resíduos da cana de açúcar para produção de etanol celulósico ainda encontra dificuldades a serem superadas. A palha possui uma quantidade pertinente da energia da cana e pode ser usada tanto para a produção de E2G como eletricidade em caldeiras. Porém, essa cogeração muitas vezes não é viável economicamente e tecnologias de recolhimento desta ainda são muito limitadas. O etanol celulósico e a cogeração de bioeletricidade utilizam o bagaço e a palha das usinas, criando uma concorrência entre estes e uma disputa entre qual uso dos resíduos é mais viável economicamente, criando barreiras para a entrada do E2G como propulsor da produção. Além disso, as pentoses dos hidrolisados lignocelulósicos possuem difícil fermentação, feita apenas com organismos específicos que possuem alto custo, aumentando ainda mais o investimento a ser feito (LORENZI & ANDRADE, 2019).

4.1 Políticas públicas

O etanol celulósico surgiu como uma das principais alternativas de reduzir os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis ou outros biocombustíveis. Para o E2G estabelecer-se no cenário nacional, a adoção de políticas públicas é indispensável.

Os EUA consolidaram-se como a principal potência na adoção de políticas públicas, devido a subsídios e investimentos para adequação de projetos do etanol de segunda geração, com por exemplo a mistura obrigatória adotada através do programa *Renewable Fuel Standard*, que determina um constante aumento anual no consumo de biocombustíveis, dentre estes os provenientes de materiais lignocelulósicos (MILANEZ *et al*, 2015).

No Brasil, a Lei 13.033 de 2014 estabeleceu um limite de elevação, pelo Poder Executivo, para a adição obrigatória de etanol anidro à gasolina de até 27,5%. Caso este aumento acontecesse, a produção de etanol anidro teria que ser aumentada em milhões de litros, criando oportunidade para o etanol anidro celulósico. Se determinada porcentagem desta produção fosse ofertada pelas plantas de E2G, já seria um grande incentivo para a implementação destas como unidades de investimento importantes para a cadeia produtiva brasileira de combustíveis permanecer competitiva. Entretanto, o Brasil apresenta problemas logísticos para uma

adição obrigatória do E2G, devido à sua vasta extensão, sendo necessária a implementação de acordo com o crescimento das usinas e disponibilidade de oferta seguindo uma logística adequada (MILANEZ et al, 2015).

O principal programa no Brasil para alavancar o a produção de E2G foi o Plano BNDES-Finep de Apoio à Inovação dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), chegando a um investimento de R\$ 3,3 bilhões (SOARES apud LORENZI & ANDRADE, 2019). O PAISS 2 recebeu R\$ 1,48 bilhão, dando incentivo principalmente à produtividade agrícola e melhorias de processo. Estes dois programas financiaram o crescimento das principais usinas que existem ainda hoje, da GranBio e Raizen, sendo fundamentais para os avanços com E2G no Brasil.

O RenovaBio foi instituído a partir da Lei nº 13.576/2017, com o intuito de contribuir para o cumprimento dos compromissos do Brasil com o Acordo de Paris, adequar os biocombustíveis na matriz energética do país e reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE), reconhecendo a importância de todos os biocombustíveis, como o etanol celulósico (RenovaBio, 2023). Em 2023, atingiu-se a marca de 100 milhões de créditos de descarbonização, evitando a emissão de 100 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera pelos produtores de biocombustíveis. Além disso, o investimento no programa pelo BNDES aumenta cada vez mais, alcançando um orçamento de R\$3,5 bilhões, tendo uma estimativa de diminuir as emissões 3,4 milhões de toneladas de carbono por ano (BNDES, 2023)

O sistema produtivo do E2G no Brasil ainda possui baixo investimento privado e em P&D, além de alta dependência dos fornecimentos de materiais, tecnologias e know-how de empresas estrangeiras, prejudicando a viabilidade econômica do etanol celulósico, e de problemas operacionais que ainda ocorrem nas usinas (LORENZI & ANDRADE, 2019).

Incentivos devem ser feitos por meio do subsídio ao consumo e isenção de tributos federais, principalmente para importação de máquinas e enzimas, que representam grande parte dos investimentos feitos pelas usinas. Em adição, programas sustentáveis e investimentos em P&D focados em pesquisa científica devem ser realizados, para financiar e incentivar a produção de culturas relacionadas ao E2G e melhorar os rendimentos destas culturas nos processos da obtenção do etanol celulósico.

5 Inovações e novas tecnologias

Muitos pensam que o etanol de segunda geração é um desperdício de investimento devido ao crescente avanço dos carros elétricos. Porém, esquecem que combustíveis ainda são fundamentais para o transporte em aviões, que utilizam produtos derivados do etanol, e navios, setores que não podem ser eletrificados (KRAMER, 2022).

5.1 Utilização de subprodutos

O desenvolvimento de combustíveis e químicos com valor agregado derivados do etanol de segunda geração ajuda na independência de um mercado de etanol saturado com combustíveis fósseis e no desenvolvimento de uma cadeia de fornecimento de etanol à medida que novas tecnologias forem sendo encontradas para melhor rendimento da biomassa lignocelulósica (PHILLIPS *et al.*, 2022).

Os subprodutos aparecem como uma das ramificações para inovação. Deve-se evitar subprodutos formados por reações inversas, derivatização química (como por exemplo a obtenção de furfural a partir de pentoses) ou mudanças físicas e focar em subprodutos de qualidade, como a utilização de lignina em produtos de valor agregado e de resíduos da fermentação que são ricos em nutrientes e podem ser reutilizados em outros processos, como por exemplo, na alimentação de animais (PADELLA *et al.*, 2019).

Subprodutos da celulose, hemicelulose e lignina, que apesar de serem muitas vezes considerados como inibidores, se integrados em correntes de produção para obtenção de compostos com valor agregado, podem melhorar a viabilidade econômica do processo de obtenção do E2G, uma vez que podem ser aplicados em indústrias farmacêuticas e químicas, entre outras indústrias (LIU *et al.*, 2020). Alguns subprodutos para cada macromolécula são apresentados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Possíveis subprodutos de acordo com macromoléculas (Fonte: ZHU,2021; DONATE, 2014)

| Macromolécula | Subprodutos |
|---------------|--|
| Celulose | Sorbitol, manitol, ácido levulínico, ácido málico, ácido láctico |
| Hemicelulose | Ácido levulínico e ácido fórmico |
| Lignina | Eugenol, vanilina, ácido sinapínico, ácido ferulíco |

5.2 Adição de surfactantes na hidrólise enzimática

Os surfactantes são substâncias que podem reduzir a tensão da superfície e modificar a estrutura molecular da biomassa. Os surfactantes causam vários efeitos, um deles é a redução da disponibilidade da lignina e aumento da celulose na superfície. Os surfactantes são adicionados no processo de hidrólise enzimática para serem utilizados como concorrência para a adsorção da celulose na lignina, o que torna o processo mais produtivo.

Portanto, o processo de hidrólise enzimática pode ser otimizado a partir da adição de surfactantes, normalmente não-iônicos, alterando as características da superfície da celulose, aumentando a conversão da biomassa e, conseqüentemente, a eficiência do processo (VASIĆ *et al.*, 2021). Um exemplo destes surfactantes é o Polisorbato 80 que ao ser utilizado aumentou o rendimento de glicose na hidrólise do bagaço da cana de açúcar que teve o pré-tatamento catalisado por sal metálico, alcançando um rendimento máximo de 88% (SÁNCHEZ *et al.*, 2022).

5.3 Inovações na fermentação

Com relação às inovações na fermentação, podemos citar o uso de transportadores de xilose através da engenharia genética, para realizar a co-fermentação de vários tipos de açúcares e uso de ácido acético sintético como fonte de carbono da levedura, para aumentar o rendimento de etanol (KO & LEE, 2018).

Vale ressaltar que a resistência da levedura ao ácido ainda deve ser melhorada, para ocorrer uma fermentação com alto rendimento, principalmente em hidrolisados com um número grande de inibidores. Para isto, a manipulação de fatores de transcrição vem sendo desenvolvida para se adequar a estes inibidores, como no

gene HAA1 presente na *S. cerevisiae*, em que o mutante do fator aumentou a tolerância do gene ao ácido acético (KO & LEE, 2018).

Além disso, a necessidade de adição de água devido a viscosidade e para diminuir ação dos inibidores causa custos adicionais e dependência de destilação. Xu et al (2016) descreveram que para o processo de destilação econômica, precisa-se de uma concentração de etanol mínima de 40 g/L e Xu et al (2017) encontraram em um design de planta não-integrado, mesmo com uma alta carga de sólidos, uma concentração abaixo desse valor, o que cria limites para a comercialização do etanol de segunda geração. A integração da produção entre etanol de primeira e segunda geração surge como uma opção para aumentar a concentração de etanol celulósico sem afetar o seu rendimento e melhorar a economia geral e sustentabilidade do processo. No estudo, a co-fermentação de hidrolisado com a farinha de milho funciona como uma ponte para conectar ambas produções e foram encontradas concentrações de etanol acima de 40 g/L (PADELLA *et al*, 2019; Xu *et al*. apud Xu *et al*, 2017).

Na Figura 17 é apresentado um diagrama de blocos de um cenário de produção em uma usina que utiliza o processo integrado de obtenção de etanol a partir do etanol primeira geração e segunda geração.

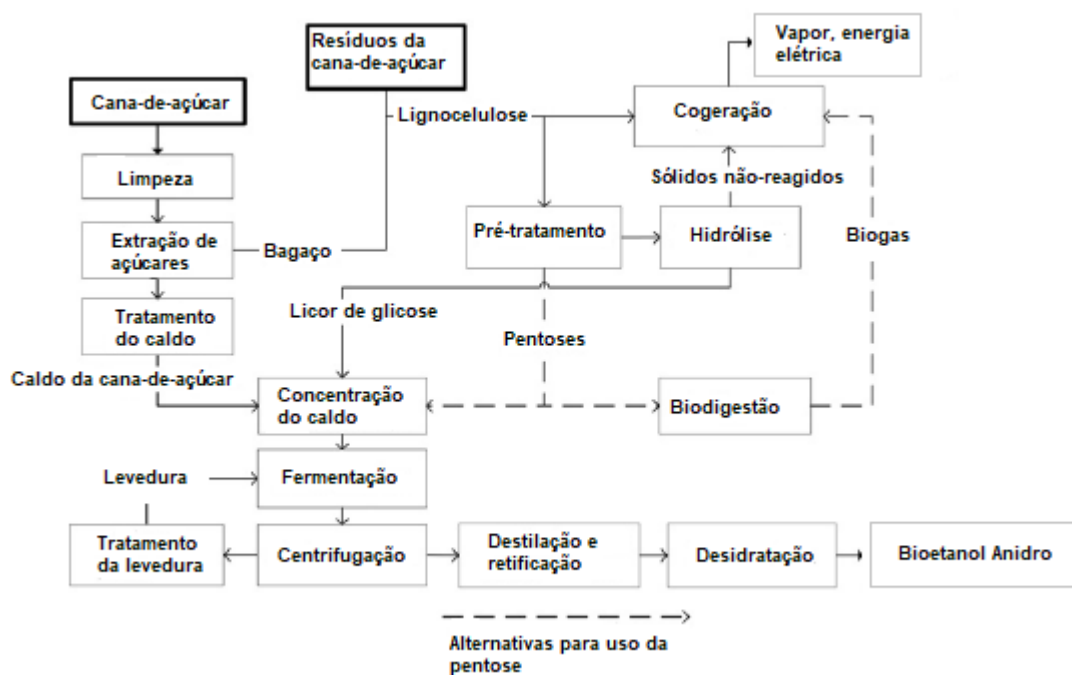


Figura 17: Diagrama esquemático de planta com integração entre a produção de etanol de primeira geração e segunda geração (Fonte: adaptado de DIAS *et al.*, 2012).

As leveduras mais usadas (*S.cerevisiae* e *Z. mobilis*), fermentam apenas hexoses, limitando o processo pois uma grande parcela dos matérias lignocelulósicos é composto por pentoses. Para a fermentação destes açúcares, diferentes leveduras, como a *Pichia stipites*, vem sendo avaliadas, assim como organismos geneticamente modificados, fermentadores de hexoses e pentoses, o que pode aumentar a produção de etanol de segunda geração significativamente. Há também investigações com organismos resistentes a altas temperaturas, porém a falta de resistência contra o etanol destas é um entrave. O organismo fermentador deve possuir resistência a altos teores de álcool e a inibidores formados nos processos de pré-tratamento e hidrólise (VASIĆ *et al.*, 2021)

Por último, a utilização de membranas também vem sendo estudada para viabilizar a separação efetiva de álcool e água e ajudar no balanço energético do processo (PADELLA *et al.*, 2019).

5.4 Utilização de terras e novas matérias-primas

Com relação a impacto ambiental, o uso de terras pouco ou não utilizadas para atividades de agricultura para a produção de bioenergia tem a capacidade de reduzir o risco da mudança de uso do solo indireta, diminuindo as emissões de carbono e em alinhamento com uma economia sustentável. A economia circular é baseada na diminuição do desperdício e uso de todas os subprodutos do processo, utilizando estas terras para gerar valor e um ambiente natural e sustentável (TRAVERSO *et al.*, 2020). As fibras lignocelulósicas possuem grande parte dos açúcares e energia da cana-de-açúcar, sendo possível uma maior produção de etanol na mesma área plantada, fazendo com que o etanol celulósico seja uma das principais opções para o caminho sustentável e possível independência de derivados do petróleo (LORENZI & ANDRADE, 2019). Observa-se isto no fato da Raízen ter aumentado 50%, em relação à safra de 2021-2022, do potencial de produção com a mesma área plantada (Raízen, 2023).

Em relação à matéria-prima, a cana-energia é uma cana modificada geneticamente que possui maior quantidade de fibras e, conseqüentemente, de celulose e hemicelulose, sendo ideal para a produção de etanol devido a maior quantidade de biomassa (MILANEZ *et al.* apud LORENZI & ANDRADE, 2019). A GranBio teve quatro projetos aprovados pelo PAISS Agrícola (PAISS 2), incluindo três que envolvem especificamente o desenvolvimento da cana energia, o que representou cerca de R\$ 345 milhões em financiamento. Denominada Cana Vertix, atualmente com os ativos controlados pela Nuseed, o cultivo provou-se crescer melhor em áreas restritivas e obteve uma maior quantidade de fibras comparada às variedades no mesmo espaço (Embrapa, 2018; NovaCana, 2022).

6 Considerações Finais

É evidente que o etanol celulósico é um dos caminhos para a independência energética de combustíveis derivados do petróleo e obtenção de um desenvolvimento sustentável e diminuição da liberação de gases do efeito estufa (GEE). Entretanto, as etapas do processo possuem dificuldades a serem superadas.

Analisar as estruturas da biomassa lignocelulósica é primordial para aumentar a eficiência dos processos de pré-tratamento e hidrólise e ajuda na criação de organismos geneticamente modificados tolerantes às condições do processo. Além disso, a adoção de políticas públicas é essencial para a viabilização de investimentos que criem caminhos para implementação de novas tecnologias e inovações, através de subsídios e isenção de tributos federais. Assim, diminui-se a dependência de empresas estrangeiras e aumenta-se o investimento privado em P&D, principalmente no uso da engenharia genética, que mostrou que é possível aumentar o rendimento do processo de obtenção do E2G, através da criação de organismos geneticamente modificados, tanto na questão de matéria-prima como na de leveduras. O aproveitamento de subprodutos pode determinar a viabilidade econômica do processo através de compostos com alto valor agregado obtidos durante as etapas deste.

Portanto, ainda existem desafios na implementação consistente do E2G como principal fonte de etanol. Porém, a partir do desenvolvimento de pesquisas científicas, suportadas por investimentos viabilizado por políticas públicas adequadas, que busquem a melhoria do processo e suas etapas e alcancem o rendimento requerido para a viabilidade econômica do processo, fica claro que o E2G é uma das melhores rotas para o desenvolvimento sustentável que muitos países, incluindo o Brasil, buscam atualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR-REYNOSA, A.; ROMANÍ, A.; RODRÍGUEZ-JASSO, R.; CRISTÓBAL, A; GARROTE, G., RUIZ, H. Microwave heating processing as alternative of pretreatment in second-generation biorefinery: An overview, *Energy Conversion and Management*. 2017.

AUI, A.; WANG, Y.; WRIGHT, M. Evaluating the economic feasibility of cellulosic ethanol: A meta-analysis of techno-economic analysis studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021.

AWAFO, V.A.; CHAHAL, D.S.; SIMPSON, B.K. Optimization of ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* (ATCC 60868) and *Pichia stipitis* y-7124: a response surface model for simultaneous hydrolysis and fermentation of wheat straw. *Journal of Food Biochemistry*, v. 22, n. 6, p.489-509, 1998.

BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*. 2011.

BECERRA-PÉREZ, L. A.; RINCÓN, L.; POSADA-DUQUE, J. A. Logistics and Costs of Agricultural Residues for Cellulosic Ethanol Production. *Energies*. 2022.

BES, K; LEMÕES, J. S; SILVA, C. F. L; SILVA, S. D. A. Extração e caracterização da lignina proveniente do pré-tratamento de biomassa para produção de etanol de 2ª geração. *Eng Sanit Ambient*, v.24, n.1, 2019.

BNDES, BNDES amplia para R\$ 3,5 bilhões recursos para o setor de biocombustíveis, 31 de jul. de 2023. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-amplia-para-3%2C5-milhoes-recursos-para-setor-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 17 de out de 2023.

BRETHAUER, S; WYMAN, C.E. Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production. *Bioresour Technol* (2010).

BUCKERIDGE, M.S.; SANTOS, W.D. Dos; SOUZA, A.P De. "ROUTES FOR CELLULOSIC ETHANOL IN BRAZIL", p.365-380. In Luis Augusto Barbosa Cortez (Coord.). *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014.

CARVALHO, M. L. de. Estudo cinético da hidrólise enzimática de celulose de bagaço de cana-de-açúcar. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

DIAS, M.; JUNQUEIRA, T.; CAVALETT, O.; CUNHA, M.; JESUS, C.; ROSSELL, C.; FILHO, R.; BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource technology*, 2012.

DONATE, P. Síntese Ambientalmente Correta a partir de Biomassa. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*. 2014.

Embrapa, Variedades Vertix para ambientes restritivos. Simpósio Integração da Pesquisa Pública com Cana-de-Açúcar no Brasil, 15 de março. de 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/1355063/32772467/Jose%CC%81+Bressiani.pdf/69cb6c5f-d27e-a7ef-6285-8a40ac1c3040>>. Acesso em: 20 de set. de 2023.

GranBio. GranBio faz ajustes e volta a ter lucro. Disponível em: <<https://www.granbio.com.br/centro-de-midia/noticias/granbio-faz-ajustes-e-volta-a-ter-lucro/>>. Acesso em 07 de abril de 2024.

IBGE, Frota de veículos. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?ano=2022>>. Acesso em: 24 de out de 2023.

Ko JK, Lee SM. Advances in cellulosic conversion to fuels: engineering yeasts for cellulosic bioethanol and biodiesel production. *Curr Opin Biotechnology*, 2018.

KRAMER, D.. “Whatever happened to cellulosic ethanol?” *Physics Today* (2022).

KUMAR, A; KURUP, S; SNISHAMOL, C.; PRABHU, G. Role of Cellulases in Food, Feed, and Beverage Industries: Enzymes in Industrial Food Processing. 2019.

LIGUORI, R; VENTORINO, V; PEPE, O; FARACO, V. Bioreactors for lignocellulose conversion into fermentable sugars for production of high added value products. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2016.

LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. *Biotecnologia industrial volume 3 – Processos fermentativos e enzimáticos*, 2019.

Liquid Biofuel Atlas, 2021-22. Disponível em: <<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/21328/BCO22118587i.pdf?sequence=5&isAllowed=y>>. Acesso em: 24 de fev. de 2024.

LIU, C-C., XIAO, Y.; XIA, X-X; ZHAO, X-Q.; PENG, L.; SRINOPHAKUN, P.; BAI, F-W. Cellulosic ethanol production: Progress, challenges and strategies for solutions. *Biotechnology Advances*, Volume 37, Issue 3, 2019, Pages 491-504.

LIU, Q.; LIU, Q., HU X. Selective conversion of furfural into value-added chemical commodity in successive fixed-bed reactors, 2020.

LORENZI, B.; ANDRADE, T. (2019). O ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO NO BRASIL: POLÍTICAS E REDES SOCIOTÉCNICAS. *Revista Brasileira de Ciências Sociais*.

LUCARINI, A. C., DELQUIARO, A. C. T., VIDOCA, L. C. P. T., Braz, R., Martins, R. M., & Alves, T. P. (2017). ESTUDO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DA PALHA DA CANA DE AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 3(2), 242–253.

LYND, L. R.; WEIMER P. J; VAN ZYL., W. H.; PRETORIUS, I. S. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v.66, n.3, p.506-577, 2002.

MALVIYA, M. Ecofriendly treatment of azo dyes: biodecolorization using bacterial strains isolated from textile wastewater. 2012.

MILANEZ, A.; NYKO; D.; VALENTE; M.; SOUSA; L.; BONOMI; A.; JESUS; C.; WATANABE; M.; CHAGAS; M.; REZENDE; M.; CAVALETT; O.; JUNQUEIRA; T.; GOUVEIA, V. De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n.41, p. 237-294, 2015.

MOHAN, M.; BANERJEE, T; GOUD, V. Hydrolysis of Bamboo Biomass by Subcritical Water Treatment. *Bioresource Technology*. 2015.

NovaCana, [Entrevista] Nuseed quer ocupar mais de 400 mil hectares com cana-energia, 30 de nov. de 2022. Disponível em:

<<https://www.novacana.com/noticias/nuseed-ocupar-mais-400-mil-hectares-cana-energia-301122>>. Acesso em: 24 de set. de 2023.

NUNES, R. DE M.; GUARDA, E. A.; SERRA, J. C. V.; MARTINS, ÁLVARO A. (2014). Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil. *Revista Liberato*, 14(22), 135–150.

PADELLA, M.; O'CONNELL, A; PRUSSI, M. 2019. "What is still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector" *Applied Sciences* 9, no. 21: 4523.

PHILLIPS, S; JONES, S; MEYER, P; SNOWDEN-SWAN, L. Techno-economic Analysis of Cellulosic Ethanol Conversion to Fuel and Chemicals. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2022.

Raízen. Raízen reforça investimento em Renováveis e anuncia a construção de duas plantas de Etanol de Segunda Geração (E2G). Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-reforca-investimento-em-renovaveis-e-anuncia-a-construcao-de-duas-plantas-de-etanol-de-segunda-geracao-e2g>>. Acesso em: 07 de abril de 2024.

Raízen. Relatório Anual de 2023. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/relatorioanual/2023/pt/>>. Acesso em: 07 de abril de 2024.

RenovaBio. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>>. Acesso em: 15 de set. de 2023.

ROSA, S.E.S Da; GARCIA, J.L.F. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, n.32 , p. 117-156, dez. 2009.

SALIBA, E.; MÁRIO, R.; MORAIS, S.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. *Ciência Rural*. 2001.

SÁNCHEZ, S.; BALBINO, T.; DE OLIVEIRA, F.; MOURA ROCHA, T.; BARBOSA, F.; VELEZ-MERCADO, M.; MARCELINO, P.; ANTUNES, F.; MORAES, E.; SANTOS, J.; DA SILVA, S. Surfactants, Biosurfactants, and Non-Catalytic Proteins as Key Molecules to Enhance Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Molecules*. 2022.

SANTOS, F.; QUEIROZ, J.; COLODETTE, J.; FERNANDES, S.; GUIMARAES, V. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, 2012.

SUN, Y.; CHENG, J. (2002). Hydrolysis of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production: A Review. *Bioresource technology*. 83. 1-11.

TIMAR-BALAZSY, A.; EASTOP, D. (1998) *Chemical Principles of Textile Conservation*. Butterworth-Heinemann, Oxford.

TRAVERSO, L.; COLANGELI, M.; MORESE, M.M.; PULIGHE, G.; BRANCA, G. Opportunities and constraints for implementation of cellulosic ethanol value chains in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 2020.

VASIĆ, K.; ŽELJKO, K.; LEITGEB, M. "Bioethanol Production by Enzymatic Hydrolysis from Different Lignocellulosic Sources." *Molecules* 26 (2021).

VITRONE, F.; RAMOS, D.; PIERA, F.; SALVADÓ, J. Binderless Fiberboards for Sustainable Construction. *Materials, Production Methods and Applications*. *Journal of Building Engineering*. 2021.

XU, Y.; ZHANG, M.; ROOZEBOOM, K.; WANG, D. Integrated bioethanol production to boost low-concentrated cellulosic ethanol without sacrificing ethanol yield. *Bioresource Technology*, 2017.

ZHU, G. (2021). *A Feasibility Study about Cellulosic Ethanol Industrialization*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.