



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO E ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Kelly Cristina Costa Camargo

2023

CAMPO GRANDE / MS

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE
PRIMEIRA GERAÇÃO E ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

KELLY CRISTINA COSTA CAMARGO

Dissertação do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração em Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Silva Moreira

CAMPO GRANDE
Setembro / 2023

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai José Carlos e à minha mãe Elizabete pela educação, princípios e valores concedidos, pela confiança depositada durante toda a caminhada, e por nunca terem medido esforços para conceder o possível para o meu bem-estar. Aos meus irmãos Carla e Carlos Henrique, pelo companheirismo e apoio durante a pós-graduação. Ao meu orientador Prof. Dr. Frederico por todo o apoio, paciência e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.



FOLHA DE APROVAÇÃO

KELLY CRISTINA COSTA CAMARGO

ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO E ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovado pela Banca Examinadora em 04 de setembro de 2023, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dr. Frederico Silva Moreira - (Orientador)

Dr. Sandro Petry Laureano Leme.

Dr. Fabiano Pagliosa Branco.

Dr. Jair de Jesus Fiorentino.

Dra. Andrea Teresa Riccio Barbosa.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Sandro Petry Laureano Leme, Professor do Magisterio Superior**, em 06/10/2023, às 09:58, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Fabiano Pagliosa Branco, Usuário Externo**, em 06/10/2023, às 10:42, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Silva Moreira, Professor do Magisterio Superior**, em 06/10/2023, às 13:32, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4383733** e o código CRC **2FD6FC24**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

Referência: Processo nº 23104.026595/2023-65

SEI nº 4383733

RESUMO

O etanol de primeira geração (álcool ou álcool etílico) é uma fonte energética de matéria-prima renovável muito utilizada pela população mundial como combustível e em outros tipos de produto. Além da produção do etanol a partir dos processos já conhecidos, existe a possibilidade de se produzir etanol de segunda geração a partir de resíduos e componentes que não são utilizados no processo de produção do etanol de primeira geração. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de álcool etílico e o maior produtor de cana-de-açúcar. O álcool etílico é produzido a partir da cana-de-açúcar, enquanto o bioetanol utiliza a biomassa disponível, como o bagaço da cana-de-açúcar, mostrando um grande potencial para o país na fabricação do bioetanol. O processo de fabricação do bioetanol utiliza a biomassa lignocelulósica, e as etapas de produção são feitas pela fabricação do álcool etílico, adicionando os processos de pré-tratamento, hidrólise e fermentação das pentoses. Na etapa de hidrólise ocorre a geração do licor de glicose, o qual é encaminhado para o processo de concentração do caldo, onde ocorre a evaporação da água do caldo e o esfriamento do caldo em dois trocadores de calor. O presente trabalho tem o objetivo de mostrar, através de uma revisão bibliográfica, os processos de produção do etanol de primeira e segunda geração, e através de análises comparativas, apontar as principais diferenças e quais as vantagens da utilização do etanol de segunda geração, quando comparado com o etanol de primeira geração. Dentre as vantagens do etanol de segunda geração, destaca-se o aumento da produção de etanol, sem aumentar a área plantada de cana-de-açúcar, aumentando a eficiência geral, o desenvolvimento tecnológico e a renda do trabalhador, e diminuindo os impactos ambientais. Um ponto negativo ainda é o custo maior na produção, comparado ao etanol de primeira geração, que impede a comercialização em grande escala.

Palavras-chave: Etanol, Etanol de segunda geração, Comparação, Viabilidade.

ABSTRACT

First-generation ethanol (alcohol or ethyl alcohol) is an energy source of renewable raw material widely used by the world's population as fuel and in other types of products. In addition to producing ethanol from known processes, there is the possibility of producing second-generation ethanol from residues and components that are not used in the production process of first-generation ethanol. Brazil is the second largest producer of ethyl alcohol and the largest producer of sugarcane. Ethyl alcohol uses sugarcane and bioethanol uses available biomass, such as sugarcane bagasse, showing great potential for the country in the manufacture of bioethanol. The bioethanol manufacturing process uses lignocellulosic biomass, and the production steps are made by manufacturing ethyl alcohol, adding the processes of pre-treatment, hydrolysis and fermentation of pentoses. In the hydrolysis step, the glucose liquor is generated, which is sent to the broth concentration process, where the water in the broth is evaporated and the broth is cooled in two heat exchangers. This work aims to show, through a bibliographic review, the production processes of first and second generation ethanol, and through comparative analyses, point out the main differences and what are the advantages of second generation ethanol, when compared to first generation ethanol. Among the advantages of second-generation ethanol, the increase in ethanol production stands out, without increasing the area planted with sugarcane, increasing general efficiency, technological development and worker income, and reducing environmental impacts. . A negative point is still the higher cost of production, compared to first-generation ethanol, which prevents large-scale commercialization.

Keywords: Ethanol, Second generation ethanol, Comparison, Feasibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura do bagaço da cana de açúcar | 16 |
| Figura 2 - Etapas do processo produtivo do etanol..... | 17 |
| Figura 3 - Processo de extração de caldo em ternos de moenda | 18 |
| Figura 4 - Processo de tratamento de caldo | 20 |
| Figura 5 - Processo de concentração de caldo | 21 |
| Figura 6 - Processo de fermentação | 22 |
| Figura 7 - Processo de destilação | 23 |
| Figura 8 - Setores nos quais o etanol pode ser utilizado..... | 24 |
| Figura 9 - Estrutura do material lignocelulósico..... | 26 |
| Figura 10 - Estrutura da celulose | 29 |
| Figura 11 - Cadeia principal da hemicelulose | 30 |
| Figura 12 - Precursores da lignina; (a) álcool trans-p-cumarílico; (b) álcool trans-coniferílico; (c) álcool trans-sinapílico | 31 |
| Figura 13 - Estrutura da pectina | 31 |
| Figura 14 - Processo de pré-tratamento | 33 |
| Figura 15 - Processo de produção do etanol de segunda geração | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Composição média da cana-de-açúcar | 17 |
| Tabela 2: Produção mundial de etanol (milhões de galões) | 25 |
| Tabela 3: Composição química de matérias-primas lignocelulósicas. | 27 |
| Tabela 4: Fatores que influenciam a hidrólise enzimática | 35 |
| Tabela 5: Comparativo entre o etanol de primeira e segunda geração | 43 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------------------------|---|
| E | Eficiência |
| E_p | Espessura |
| h_{hot} e h_{cold} | Convectivos de troca de térmica |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| k_p | Condutividade térmica das placas |
| ODS | Objetivos do Desenvolvimento Sustentável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| Proálcool | Programa Brasileiro de Álcool |
| USP | Universidade de São Paulo |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. | OBJETIVOS | 12 |
| 1.1.1. | Objetivo geral..... | 12 |
| 1.1.2. | Objetivos específicos..... | 12 |
| 1.2. | JUSTIFICATIVA..... | 13 |
| 1.3. | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 13 |
| 2. | METODOLOGIA | 14 |
| 3. | REFERENCIAL TEÓRICO | 15 |
| 3.1. | PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO BRASIL..... | 15 |
| 3.2. | PROCESSOS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL..... | 16 |
| 3.2.1. | Extração de caldo | 17 |
| 3.2.2. | Tratamento de caldo | 19 |
| 3.2.3. | Processo de concentração de caldo | 20 |
| 3.2.4. | Processo de fermentação..... | 21 |
| 3.2.5. | Processo de destilação | 22 |
| 3.3. | ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO | 23 |
| 3.4. | ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO..... | 25 |
| 3.4.1. | Biomassas Lignocelulósicas | 27 |
| 3.4.2. | Celulose | 28 |
| 3.4.3. | Hemiceluloses | 29 |
| 3.4.4. | Lignina | 30 |
| 3.4.5. | Pectina..... | 31 |
| 3.5. | PRODUÇÃO DE ETANOL ORIGINADOS DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS | 32 |
| 3.5.1. | Enzimas..... | 32 |
| 3.5.2. | Pré-tratamento | 32 |
| 3.5.3. | Hidrólise enzimática | 34 |
| 3.5.4. | Processo de fermentação..... | 35 |
| 4. | COMPARATIVO ENTRE AS VANTAGENS PRODUTIVAS DO ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA GERAÇÃO | 38 |
| 5. | CONCLUSÃO | 44 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |

1. INTRODUÇÃO

Empresas de diversos setores investem cada vez mais em pesquisas que as tornem mais sustentáveis, promovendo a criação de ideias e estratégias que diminuam o impacto humano sobre o meio-ambiente e que disponibilizem fontes renováveis de matéria-prima (Martins *et al.*, 2014). Atualmente sou funcionária de uma empresa que produz etanol de segunda geração e por esse motivo não se torna possível a disponibilização de informações detalhadas do processo produtivo.

Quando se pensa em sustentabilidade, os biocombustíveis são grandes aliados nas estratégias para essa temática. O investimento nesse tipo de combustível contribui para uma diminuição da utilização de combustíveis fósseis, os quais, além de emitir gases que promovem a poluição atmosférica terrestre, são fontes esgotáveis de energia e que tende a ficar cada vez mais escassa com o passar dos anos de extração.

O Brasil lidera a produção de biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar. Apesar de fatores climáticos terem impactado a produção na última safra (ano de 2022), a região sudeste (maior produtora de cana do país) produziu 387,76 milhões de toneladas de cana no ciclo 2022/2023. No caso do biocombustível, a produção teve um aumento de 2,1% em relação à safra anterior, produzindo 12,97 bilhões de litros de etanol anidro e 17,53 bilhões de litros de etanol hidratado (CONAB, 2023).

O etanol tem sua produção a partir de reações bioquímicas pelo processo de fermentação. Seu processo se dá a partir de matérias-primas renováveis que possuam carboidratos que possam ser transformados em álcool, como a glicose, sacarose, frutose, amido, dentre outras, o qual é chamado de etanol de primeira geração (E1G), (Freitas, 2017).

Segundo Martins (2014), o etanol de primeira geração tem sua produção a partir de matérias-primas do caldo de cana-de-açúcar e do milho, sendo, desta forma, um combustível renovável e de baixo custo. A produção desse tipo de biocombustível emite 60% menos gases na atmosfera se comparado a combustíveis fósseis.

Ainda que o etanol de primeira geração seja uma forma menos poluente e com um menor custo de produção, existem alguns danos ambientais que são causados no seu processo

de plantio. A palha existente nos canaviais emite CO₂ para a atmosfera, e o processo de produção do etanol de primeira geração tem como subproduto a vinhaça. Apesar de ser reutilizada no processo de desenvolvimento da cana como forma auxiliar de irrigação, ela é prejudicial ao solo e a lençóis freáticos próximos das plantações (Santos *et al.*, 2012).

O etanol de segunda geração (E2G) é um biocombustível que se destaca nesse aspecto, pois sua produção é realizada a partir de resíduos que seriam descartados no processo de produção do etanol de primeira geração. Exemplos de resíduos utilizados para produção do etanol de segunda geração são a vinhaça e a palha (Robak e Balcerek, 2018).

O principal desafio em produzir E2G viavelmente é a necessidade em determinar a melhor disponibilidade da glicose, sendo ela a partir da hidrólise da celulose e em termos de custo global, rendimento glicosídico e fermentabilidade do hidrolisado. Isso possibilitará uma comercialização eficiente e economicamente viável do produto. Para esse processo ser economicamente viável será necessária uma integração energética perfeita, para que se possa aproveitar todos os resíduos, hemicelulose e lignina da biomassa do sorgo sacarino (Rabelo, 2010).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Demonstrar através de revisão bibliográfica o processo de produção do etanol de primeira e segunda geração, evidenciando as principais diferenças da forma produtiva dos biocombustíveis e comparar a viabilidade econômica desses produtos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Apresentar as vantagens da produção de etanol através da cana-de-açúcar;
- Dissertar a respeito da forma de produção do etanol de segunda geração;
- Realizar o comparativo dos processos do etanol de primeira geração quando comparado ao de segunda geração.

1.2. JUSTIFICATIVA

Diante do atual cenário econômico e da busca por biocombustíveis que possam ser produzidos de forma simples e com baixo custo, destaca-se a extração do caldo da cana-de-açúcar para produção de açúcar e álcool. O processo de fabricação do etanol a partir da cana-de-açúcar é uma das principais fontes de biocombustível no Brasil.

O mercado de etanol é crescente e, para atender esse mercado, apesar dos investimentos tecnológicos que ainda devem ser feitos na cadeia produtiva, a produção de etanol de segunda geração torna-se atrativa para a indústria do setor sucoenergético, uma vez que é uma alternativa para o maior aproveitamento da biomassa da cana e de outros resíduos agrícolas, pois são fontes renováveis de energia.

O presente trabalho visa demonstrar através de revisões bibliográficas as principais diferenças e vantagens da produção do etanol de primeira e segunda geração, uma vez que é um mercado em crescente expansão e investimento. O entendimento e clareza a respeito dos dois processos é de grande importância para a comunidade acadêmica, pois com o crescimento da busca por combustíveis menos poluentes e que tenham um bom poder energético, a produção do etanol a partir dos resíduos do processo do E1G traz muitas vantagens e benefícios, tanto para o setor sucroalcooleiro quanto para o meio ambiente.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 é apresentada a introdução, os objetivos e a justificativa do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado a metodologia utilizada nesse trabalho.

A revisão bibliográfica, juntamente com a fundamentação teórica, aparece no capítulo 3 deste trabalho.

O capítulo 4 mostra um comparativo das vantagens produtivas do etanol de primeira geração em relação ao etanol de segunda geração.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, e, por fim, no capítulo 6 têm-se as referências bibliográficas.

2. METODOLOGIA

A metodologia, neste trabalho, foi realizada em duas etapas de estudos. A primeira, foi a caracterização da fundamentação teórica com artigos científicos, dissertações, *websites*, teses e livros para a contextualização do tema, por meio de palavras-chaves: etanol de primeira geração; etanol de segunda geração; processo de produção etanol de segunda geração; vantagens e desvantagens do etanol de primeira e segunda geração.

O processo de busca ocorreu pelos bancos de dados do Google Acadêmico e Repositório USP. Os critérios de inclusão dos dados bibliográficos foram: dentre vinte e dois anos de publicação (2000-2022); e com relevância ao tema.

A segunda etapa foi realizada uma revisão sistemática para a avaliação dos diferentes processos de fabricação do etanol de primeira e segunda geração e entendimento das vantagens de cada processo para o setor energético, promovendo assim, informações sobre uma fonte de energia de extrema importância e com alto potencial para o Brasil. Na revisão sistemática para a construção da análise crítica são apresentados os conceitos, os diferentes equipamentos e os processos para a fabricação do etanol de primeira e segunda geração.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO BRASIL

Quando se fala em produção de etanol, o Brasil se destaca, estando em primeiro lugar na produção de álcool derivado da cana-de-açúcar e sendo o único a fazer a integração de produção de açúcar e álcool no mesmo parque industrial. O que reduz os custos de produção e auxilia na utilização dos resíduos nas várias etapas do processo produtivo. Para cada tonelada de cana utilizada no processo de produção de açúcar, tem-se cerca de 140 kg de bagaço seco, com composição de: 43% de celulose, 25% de hemicelulose e 23% de lignina (Rodrigues, 2007).

Para produzir o bioetanol, a partir dos resíduos da cana de açúcar (bagaço), é necessário que ocorra o processo de transformação da celulose contida na biomassa em açúcares, que serão usados na fermentação alcoólica com o auxílio da ação de enzimas. A cana-de-açúcar possui uma quantidade considerável de fibras em sua composição e em sua palha. Estudos apontam que, a partir das fibras presentes no bagaço resultante do processo de extração de caldo, poderia se gerar uma produção adicional de etanol em cerca de 15%, 150 mil litros para cada 1 milhão de litros produzidos a partir do processo de extração de caldo. A palha presente nos campos de plantação também são uma fonte potencial para o processo produtivo, podendo ser usada como fonte de celulose (Knauf e Moniruzzaman, 2004).

Segundo Ferraz *et al.* (1994), para que seja feito o pré-tratamento dos materiais lignocelulósicos, pode-se utilizar processos térmicos, químicos, físicos, biológicos ou uma combinação de processos. A escolha irá depender do grau de separação que se deseja obter e qual a finalidade da separação. No Brasil, é utilizada como forma de pré-tratamento o processo de explosão a vapor, muito utilizado em usinas que utilizam o bagaço para fazer ração de gado.

A tecnologia utilizada para o processo de produção do álcool de segunda geração tem o objetivo de utilizar o bagaço excedente proveniente do processo para o aumento da produção de álcool, sem a necessidade de uma ampliação do parque industrial. O não reaproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar representa um desperdício de cerca de 30%

da energia, que poderia ser gerada através da planta. Ainda que o bagaço proveniente do processo seja reutilizado para a alimentação da caldeira e fornecimento de vapor para o processo produtivo, existe uma quantidade excedente que poderia ser reaproveitada no processo, permitindo que as plantas industriais pudessem produzir etanol durante os meses de entressafra (Camargo, 2007).

3.2. PROCESSOS UTILIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL

A principal matéria-prima utilizada para a produção de etanol no Brasil é a cana-de-açúcar, *Saccharum* (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura do bagaço da cana de açúcar



Fonte: Scistyle (2020)

Ela é uma gramínea que tem sua origem do sudeste asiático, sendo muito utilizada na produção de aguardente, rum e cachaça (Fonseca, 2014). A cana-de-açúcar possui a capacidade de armazenar seus carboidratos na forma de açúcares (sacarose) ao invés de amido. Ela é formada basicamente por colmos, folhas, nódulos e ponta, sendo que os açúcares, em sua maioria, são armazenados nos colmos da planta (Pellegrini, 2009). A Tabela 1, abaixo, mostra uma média da composição da cana-de-açúcar.

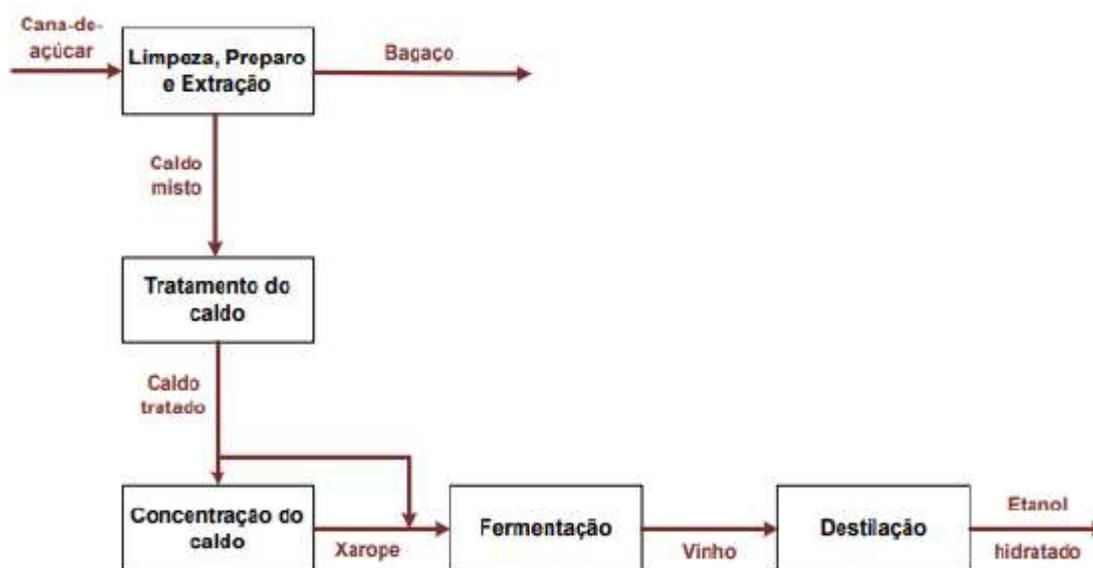
Tabela 1: Composição média da cana-de-açúcar

| COMPONENTE | FRAÇÃO MOLAR (%) |
|------------------|------------------|
| Água | 65 – 75 |
| Sacarose | 11 - 18 |
| Fibra | 8 - 14 |
| Sólidos Solúveis | 12 - 23 |

Fonte: Pellegrini (2009)

Segundo Dias (2008), o processo de crescimento e maturação da cana-de-açúcar está entre 14 e 18 meses. Ao alcançar o nível de maturação é realizada a colheita da planta, que pode ser de forma manual ou mecanizada. As plantas industriais que produzem apenas etanol, comumente são divididas da seguinte forma: Recepção de cana, extração de caldo, tratamento de caldo, fermentação e destilação (Figura 2).

Figura 2 - Etapas do processo produtivo do etanol



Fonte: Mosqueira (2012)

3.2.1. Extração de caldo

Após a colheita feita em campo, a cana-de-açúcar é transportada até o parque industrial por meio de caminhões. Ao chegar na planta industrial os caminhões passam pelo processo de pesagem e retirada de amostras para determinação dos índices de açúcares e impurezas contidas na carga, com a finalidade de determinar o desempenho do processo de

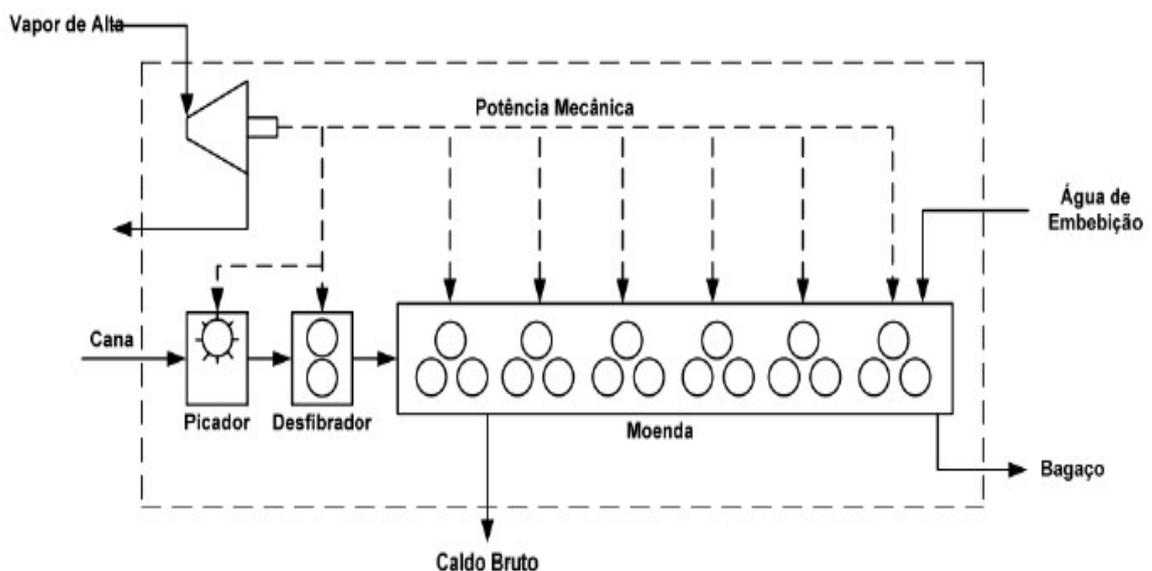
conversão do açúcar em álcool. Após a etapa de pesagem e retirada de amostras o caminhão se posiciona na frente das mesas alimentadoras que irão transportar a cana até as esteiras.

A esteira transportadora irá conduzir a cana até os equipamentos de preparo, compostos por niveladores, picadores e desfibradores. Tais equipamentos são responsáveis por desintegrar a cana, fazendo a alimentação da moenda e/ou difusor com uma massa homogênea e de fibras abertas, facilitando o processo de extração de caldo.

A extração do caldo pode ocorrer de duas formas: moagem e difusão. A primeira forma é a mais comumente encontrada em plantas industriais (Pellegrini, 2009). O processo de moagem através de ternos de moenda é um processo mecânico onde a cana passa por um conjunto de rolos, seguida de constantes lavagens (embebição), para que o caldo possa ser extraído (Figura 3).

Segundo Mosqueira (2012), a extração de caldo no primeiro terno é a mais importante, sendo responsável pela extração de 70% do caldo contido na cana. A extração do caldo no primeiro terno tem como produto o caldo primário. Uma moenda convencional é composta por conjuntos de quatro a sete ternos. A extração ocorrida nos demais ternos é embebida com água quente misturada ao caldo extraído, sendo denominada caldo secundário.

Figura 3 - Processo de extração de caldo em ternos de moenda



Fonte: Pellegrini (2009)

Na extração de caldo através do difusor ocorre o processo de lixiviação. Após a cana passar pelo picador e desfibrador, ela é conduzida até o difusor onde será embebida por água

quente. A sacarose adsorvida nas fibras abertas será diluída e removida por meio de lixiviação num processo contracorrente. Não existe distinção entre caldo primário e secundário nesse processo, visto que, é composto por uma única etapa (Pellegrini, 2009).

3.2.2. Tratamento de caldo

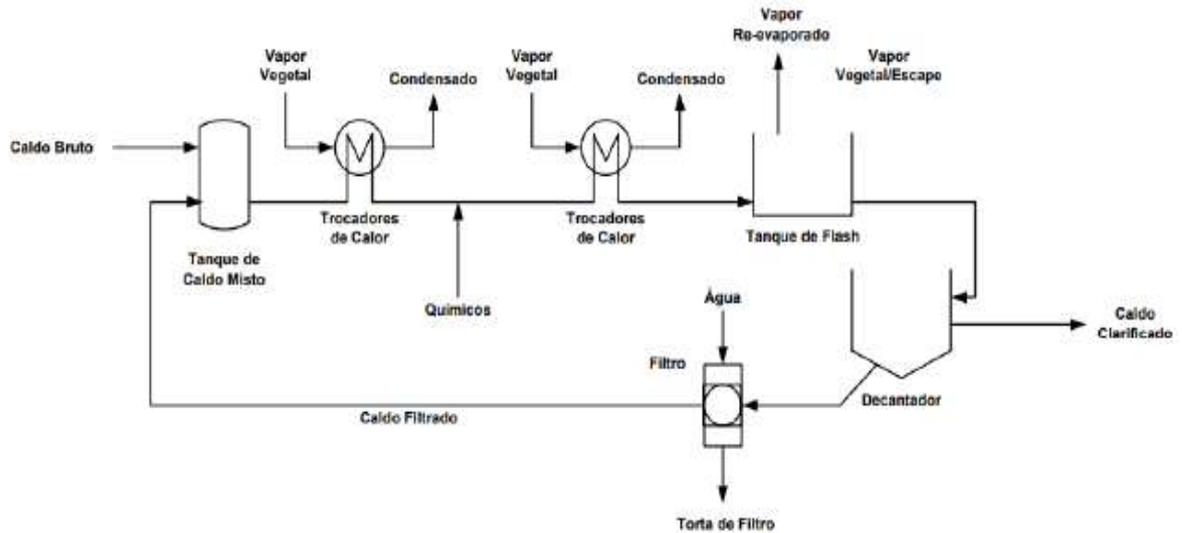
Através do processo de moagem é produzido o caldo, onde o principal produto contido é a sacarose. O objetivo do tratamento de caldo é diminuir a quantidade de impurezas, ajustar a concentração de sacarose e realizar o equilíbrio do pH do caldo para que sejam mínimos os efeitos de inibição, tendo, dessa forma, condições adequadas para o processo de fermentação alcoólica (Dias, 2008).

O caldo irá passar por peneiras, para que sejam removidas as impurezas com maior tamanho de grão (areia, bagaço proveniente do processo, terra, etc.), para que posteriormente possa passar pelo processo de filtragem. São utilizadas peneiras rotativas no processo de extração (visto anteriormente) e no processo de tratamento de caldo (Figura 4), sendo o segundo peneiramento para remoção de materiais fibrosos de menores tamanhos (Dias, 2008).

Após passagem pelas peneiras é realizado tratamento químico do caldo com a utilização de leite de cal. No processo de calagem é feita a correção do pH do caldo, onde ocorre a elevação de seu valor, para que a decomposição da sacarose seja evitada. O caldo então é passado pelo balão de *flash*, à temperatura atmosférica, para que os gases não condensáveis possam ser eliminados. Para que sejam removidas as impurezas mais finas, o caldo é passado nos decantadores, onde são utilizados produtos coagulantes e floculantes, sendo separado o caldo e as impurezas aglutinadas (Leite, 2009).

O lodo resultante da decantação ainda possui uma porcentagem de sacarose que pode ser recuperada através de filtros rotativos. Após a passagem do lodo no filtro rotativo tem-se como produto a torta de filtro, a qual possui uma pol (porcentagem de sacarose) menor de 1% e comumente espalhada nas plantações de cana-de-açúcar como fertilizante.

Figura 4 - Processo de tratamento de caldo



Fonte: Pellegrini (2009)

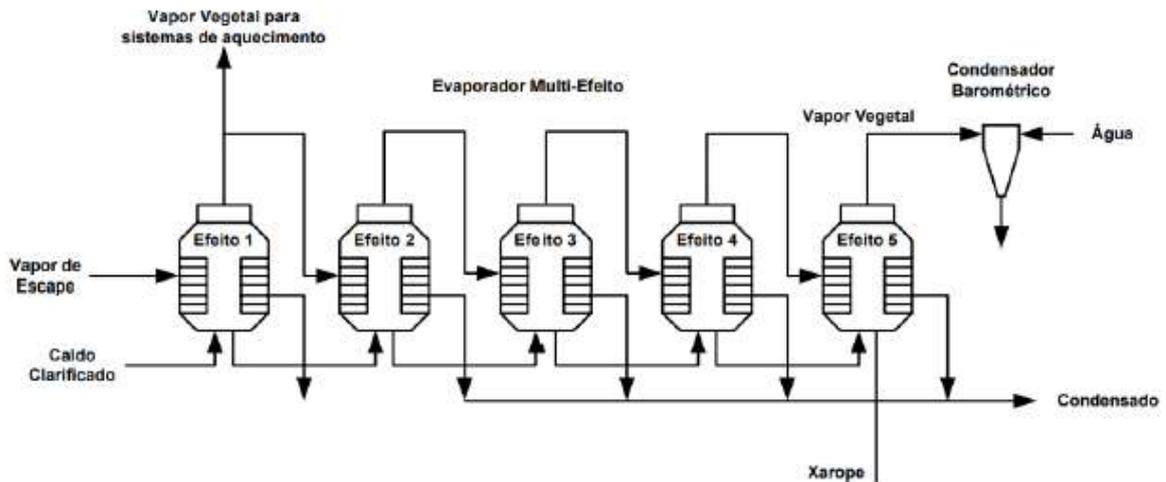
3.2.3. Processo de concentração de caldo

Com a passagem do caldo pelo processo de tratamento, inicia-se o processo de concentração de caldo e esterilização (Figura 4), para que se possa obter uma fermentação com alto grau alcoólico do vinho, para posterior destilação.

Segundo Mosqueira (2012), a realização da concentração de caldo é feita a partir dos evaporadores e pré- evaporadores. Apesar desse tipo de processo ser amplamente utilizado em usinas que produzem açúcar e álcool, sua utilização em plantas que fabricam apenas álcool é bastante interessante, pois a preparação do mosto nas destilarias não contempla o uso do melão, produto proveniente do processo da produção de açúcar.

Ainda, segundo o autor, a função dos evaporadores é a retirada da água presente no caldo. Para que se tenha uma evaporação eficiente é necessário que os evaporadores estejam livres de incrustações em seus tubos, sendo realizadas limpezas periódicas.

Figura 5 - Processo de concentração de caldo



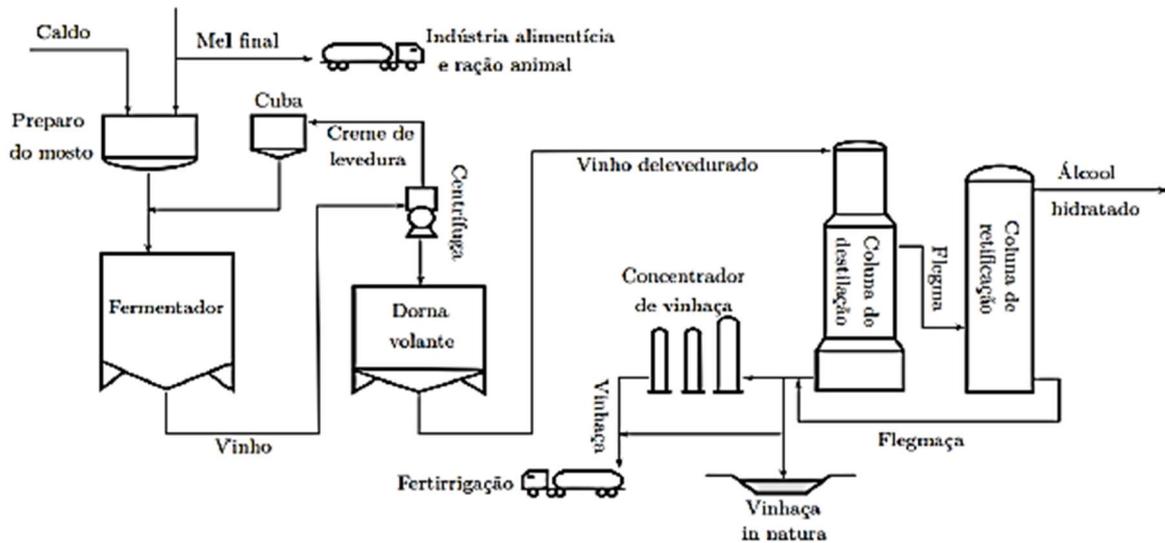
Fonte: Pellegrini (2009)

3.2.4. Processo de fermentação

O processo de fermentação, ilustrado na Figura 6, é composto por reações químicas em cadeia catalisadas por microrganismos (leveduras, *Saccharomyces cerevisiae*) que podem ser geneticamente modificadas para tipos diferentes de cana-de-açúcar. A levedura converte o açúcar em etanol realizando a emissão de dióxido de carbono e possuindo uma reação exotérmica.

Segundo Leite (2009), o principal método de fermentação utilizado no Brasil é o *Melle-Bonoit*, que tem como principal objetivo a recuperação das leveduras através da centrifugação do vinho. O processo de transformação do açúcar em álcool ocorre nas cubas de fermentação onde são misturados o mosto e o leite de levedura, e o produto dessa mistura é denominado vinho.

Figura 6 - Processo de fermentação



Fonte: Dias (2008)

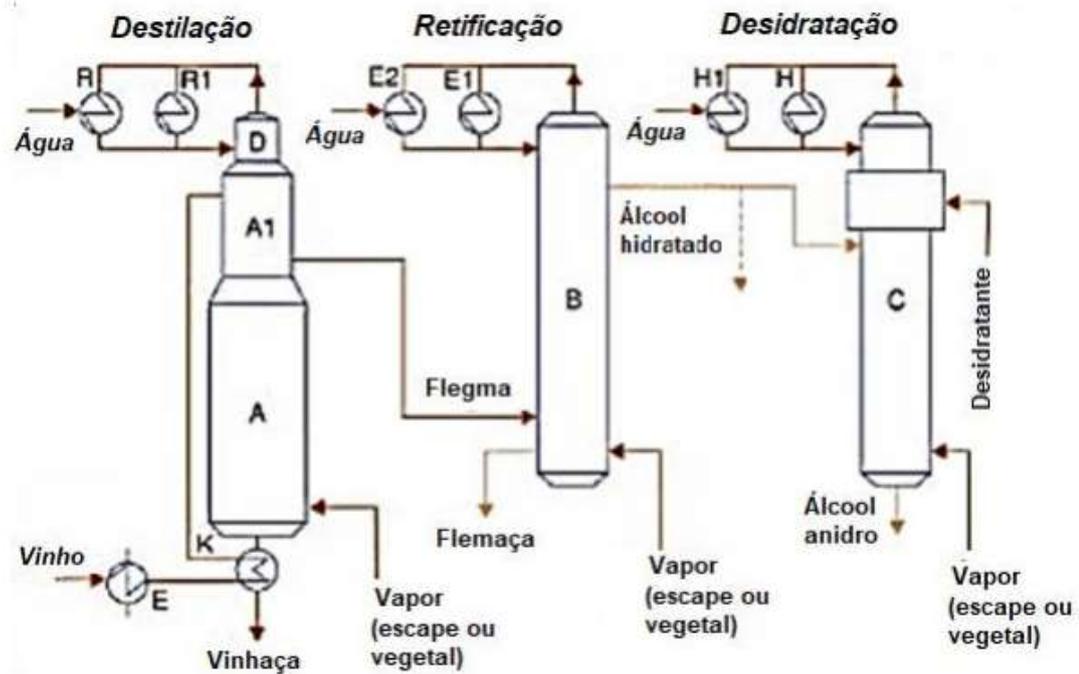
3.2.5. Processo de destilação

O vinho resultante do processo de fermentação é concentrado na etapa de destilação com o intuito de separar o etanol da água. No processo de destilação (Figura 7), ocorre a separação de múltiplos estágios, baseando-se na diferença de volatilidade dos componentes da mistura. O produto em maior quantidade resultante desse processo é o etanol hidratado (AEHC), possuindo entre 92,6 e 93,8 % de etanol em massa (Pellegrini, 2009).

Para obtenção do etanol hidratado são utilizadas duas etapas de processo. A primeira ocorre nas colunas de esgotamento, depuração e concentração de cabeça, sendo este conjunto de colunas frequentemente chamado de colunas de destilação. A segunda etapa é composta por colunas de retificação e esgotamento (Pellegrini, 2009).

A partir do álcool hidratado produzido é possível que ocorra o reprocessamento e a produção do álcool anidro, o qual possui massa mínima de 99,3% de etanol.

Figura 7 - Processo de destilação



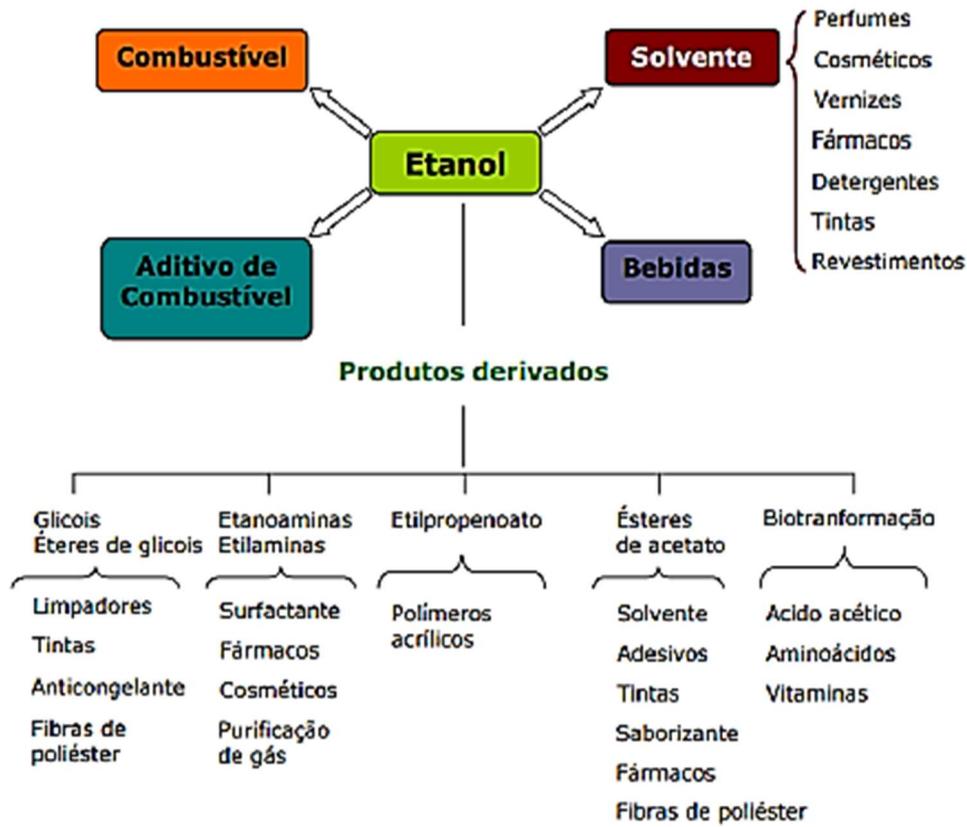
Fonte: Mundo da cana (2009)

3.3. ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO

O etanol é um líquido incolor, volátil e de cheiro parecido com o éter, sendo miscível em água e outros líquidos orgânicos. Ele pode ser comercializado tanto na sua forma hidratada quanto em forma de álcool anidro, sendo a primeira forma utilizada como combustível e a segunda forma na fabricação de tintas, vernizes e aerossóis, como inseticidas, repelentes de insetos, desodorantes de ambientes, fungicidas, além de ser uma mistura colocada na gasolina (Carvalho *et al.*, 2013).

O termo etanol de primeira geração (E1G), é referente a produção do biocombustível através da fermentação de moléculas de sacarose conforme descrito nos processos de obtenção de álcool, capítulo 2.2. Ele é amplamente utilizado em vários setores, como pode ser visto na Figura 7, de forma mundial (Tabela 2).

Figura 8 - Setores nos quais o etanol pode ser utilizado



Fonte: Vásquez, 2007

O etanol, além de estar presente no cotidiano do consumidor, tem seu uso impulsionado e estudado por ser um biocombustível que contribui de forma menor para a emissão de gases do efeito estufa quando comparado a combustíveis fósseis. A produção do etanol se mostra vantajosa no Brasil, visto que o país possui uma área cultivável considerável e um clima favorável para o desenvolvimento da agricultura (CGEE, 2009).

A *Renewable Fuels Association*, Associação de Combustíveis Renováveis, é uma empresa que representa a indústria do etanol da América. A Tabela 2 demonstra o Brasil como o segundo maior produtor mundial de etanol, sendo sua principal matéria-prima a cana-de-açúcar, mas observando crescimento também da utilização do milho (Vidal, 2021).

A importância do etanol de primeira geração para o Brasil é significativamente satisfatória, apresentando vantagens econômicas e ambientais em relação ao combustível fóssil, porém, apresenta maiores impactos ambientais na sua produção em comparação com o etanol de segunda geração (Senna e Ansanelli, 2016).

Tabela 2 - Produção mundial de etanol (milhões de galões)

| País | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | % da produção mundial |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|
| Estados Unidos | 15.413 | 15.936 | 16,091 | 15.778 | 13.941 | 15.015 | 55% |
| Brasil | 6.840 | 6.730 | 8.060 | 8.860 | 8.100 | 7.430 | 27% |
| União Europeia | 1.190 | 1.250 | 1.300 | 1.350 | 1.280 | 1.350 | 5% |
| China | 730 | 850 | 810 | 1.010 | 930 | 860 | 3% |
| Índia | 260 | 230 | 430 | 460 | 540 | 860 | 3% |
| Canadá | 460 | 460 | 460 | 497 | 429 | 434 | 2% |
| Tailândia | 330 | 380 | 390 | 430 | 390 | 350 | 1% |
| Argentina | 240 | 290 | 290 | 290 | 210 | 260 | 1% |
| Outros | 587 | 644 | 709 | 655 | 650 | 711 | 3% |
| Total | 26.050 | 26.770 | 28.540 | 29.330 | 26.470 | 27.270 | - |

Fonte: Renewable Fuels Association (2022)

3.4. ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

A diferença principal entre o etanol de primeira e segunda geração é que nos casos da produção do E2G ocorre a etapa de pré-tratamento, além da necessidade de se realizar a hidrólise da celulose antes do início do processo fermentativo.

O caldo de cana-de-açúcar é constituído, basicamente, por água (75-82%) e sólidos totais dissolvidos (18-25%). Na composição dos sólidos totais dissolvidos estão os açúcares (formados por sacarose, glucose e frutose) e não açúcares (orgânicos e inorgânicos). A parte orgânica não-açúcar é formada por uma matéria nitrogenada (proteínas, amidas e aminoácidos) e a parte inorgânica são minerais (Prati e Camargo, 2008).

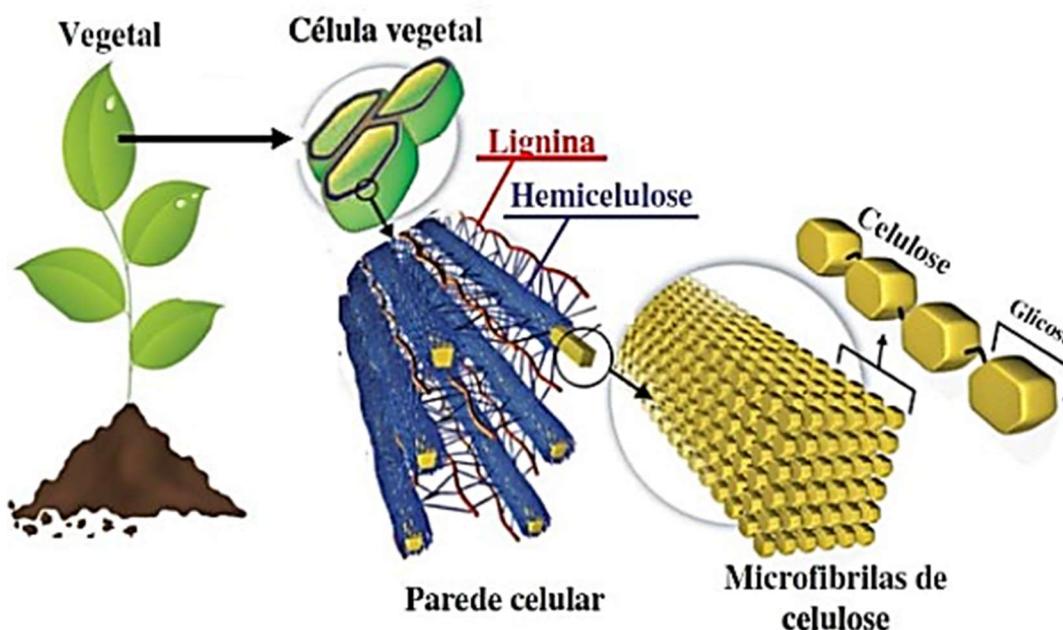
O Bioetanol, também conhecido como etanol celulósico, é visto pelo mercado global como uma alternativa imprescindível para atender a demanda por biocombustíveis. Sua produção ocorre pelo processo de hidrólise e lignocelulose, além do uso da biomassa disponível (Souza, 2013).

Pode-se utilizar para a produção do etanol de segunda geração o bagaço, a palha da cana-de-açúcar, o sorgo, o milho, a beterraba, etc. Desta forma, o Brasil se torna um dos países com grande potencial de produção do bioetanol, visto que, o clima e o solo brasileiro contribuem para a produção das matérias-primas citadas (Martins *et al.*, 2014).

Os materiais lignocelulósicos são formados em grande parte por celulose, hemicelulose e lignina. O etanol de segunda geração é produzido a partir da quebra dos polissacarídeos (celulose e hemicelulose) que estão inseridos na biomassa lignocelulósica para que seja feita a produção de açúcares mais simples, desta forma, podendo ser utilizados na produção de etanol (Santiago e Rodrigues, 2017).

O local onde se encontra a maior parte do material lignocelulósico é a parede celular das plantas (Figura 9), sendo ele a fração de maior quantidade dentro da biomassa terrestre (Sticklen, 2008).

Figura 9 - Estrutura do material lignocelulósico



Fonte: Ritter (2008)

De acordo com Zheng, Pan e Zhang (2009), a biomassa lignocelulósica é um dos recursos biológicos renováveis encontrados de forma mais abundante na terra, podendo ser facilmente encontrado na superfície terrestre, não necessitando um custo elevado para a sua produção. A Tabela 3 traz informações a respeito da composição química de diversas potenciais matérias-primas para a produção do E2G.

Tabela 3: Composição química de matérias-primas lignocelulósicas.

| Biomassa Lignocelulósica | % Celulose | % Hemicelulose | % Lignina |
|-----------------------------|------------|----------------|-----------|
| Palha de cana | 40-44 | 30-32 | 22-25 |
| Bagaço de cana | 32-48 | 19-24 | 23-32 |
| Madeira dura | 43-47 | 25-35 | 16-24 |
| Madeira mole | 40-44 | 25-29 | 25-31 |
| Talo de milho | 35 | 25 | 35 |
| Espiga de milho | 45 | 35 | 15 |
| Algodão | 95 | 2 | 0,3 |
| Palha de trigo | 30 | 50 | 15 |
| Sisal | 73,1 | 14,2 | 11 |
| Palha de arroz | 43,3 | 26,4 | 16,3 |
| Forragem de milho | 38-40 | 28 | 7-21 |
| Fibra de coco | 36-43 | 0,15-0,25 | 41-45 |
| Fibra de bananeira | 60-65 | 6-8 | 5-10 |
| Palha de cevada | 31-45 | 27-38 | 14-19 |

Fonte: Gomez et al. (2010)

Através da Tabela 3, pode-se perceber que existe uma diversidade de compostos que podem ser utilizados para a produção de etanol de segunda geração. Existem no Brasil duas plantas industriais que realizam a produção do etanol E2G, possuindo juntas uma capacidade de produção de 100 milhões de litros por ano. A produção comercial desse etanol depende de tecnologia moderna para uma produção mais sustentável economicamente. Mesmo que exista uma semelhança nos processos industriais de produção do etanol de primeira e segunda geração, existem algumas diferenças tecnológicas em relação às matérias-primas, aos insumos, às operações e aos equipamentos, que devem ser consideradas para sua produção (Carpio, 2019).

3.4.1. Biomassas Lignocelulósicas

Quando se fala em materiais lignocelulósicos existem seis grupos principais que devem

ser considerados: coníferas, folhosas, resíduos de celulose, biomassa herbácea (feno, gramíneas), resíduos municipais sólidos e resíduos de agricultura (bagaço de cana, palhas, cascas de sementes, caroço de azeitona e celulose) (Barcelos, 2012).

Esse tipo de material tem por característica ser composto de fibra, sendo capaz de formar uma estrutura vegetal complexa, por conta do entrelaçamento que ocorre entre seus componentes (celulose, hemicelulose e lignina) (Assumpção, 2015).

A forma construtiva do material lignocelulósico é arranjada de forma que as cadeias de celulose e hemicelulose sejam fixadas através da lignina. De forma paralela, as cadeias de celulose ficam compactadas por meio de ligações de hidrogênio, o que dá à planta a sua rigidez, enquanto a lignina circundante tem a função de barreira física contra microrganismos e água. O papel da hemicelulose é proporcionar a ligação entre a celulose e a lignina, dando assim a formação da estrutura fibrosa (Rabelo, 2010).

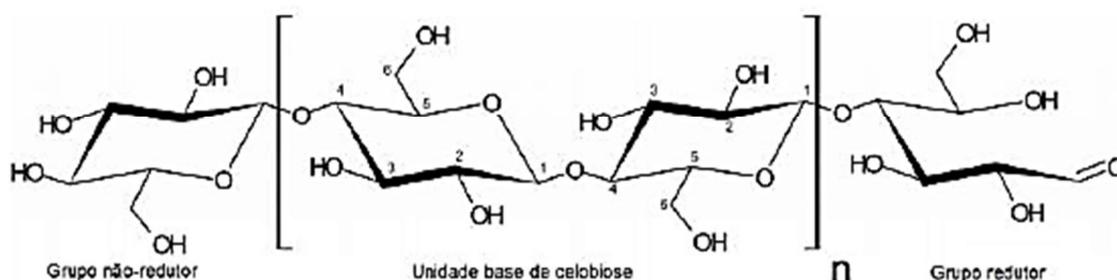
Os materiais acima citados formam uma complexa rede morfológica, o que dificulta a conversão deles em biocombustíveis ou outros produtos que possam ser potencialmente fabricados (Barcelos, 2012).

3.4.2. Celulose

Classificada como um carboidrato $(C_6H_{10}O_5)_n$, a celulose tem seu destaque devido a sua abundância no planeta, e por ser um polímero natural. Ela pode ser encontrada em fontes renováveis de matéria-prima, tendo uma produção anual de mais de 50 bilhões de toneladas (Silva *et al.*, 2009).

Sua formação, com a estrutura apresentada na Figura 10, é feita a partir de unidades de glicose unidas por uma ligação β 1-4, o que a torna um substrato de alto potencial para processos fermentativos. A rigidez e sustentação estrutural de sua parede celular é propiciada pelas interações entre os polissacarídeos de celulose que são reforçados por uma matriz de hemicelulose e pectinas. Tal rigidez estrutural é uma das funções mais importantes da celulose (Nunes, 2013).

Figura 10 - Estrutura da celulose



Fonte: Klem *et al.*, 2005

Para que as cadeias de celulose se unam, são feitas ligações de hidrogênio em sua estrutura cristalina pela força de Van der Waals. A estrutura cristalina é chamada de fibrila elementar, a qual possui por volta de 40 cadeias glicanas, a junção dessas cadeias origina as microfibrilas (Bidlack *et al.*, 1992 apud Rabelo, 2010).

As fibras de celulose sofrem intrumescimento quando entram em contato com a água e determinados solventes orgânicos. A extensão do intrumescimento pode ser intercristalina ou intracristalina. No caso de intracristalino, o agente intrumescedor penetra na região amorfa da microfibrila de celulose e nos espaçamentos entre elas, sendo que o caso mais comumente encontrado é o ocasionado pela entrada de água na celulose. No caso de intrumescimento intracristalino, o agente penetra na região cristalina das microfibrilas, sendo mais comum ocorrer através da inserção de soluções concentradas de ácidos, bases fortes e alguns sais (Rabelo, 2010).

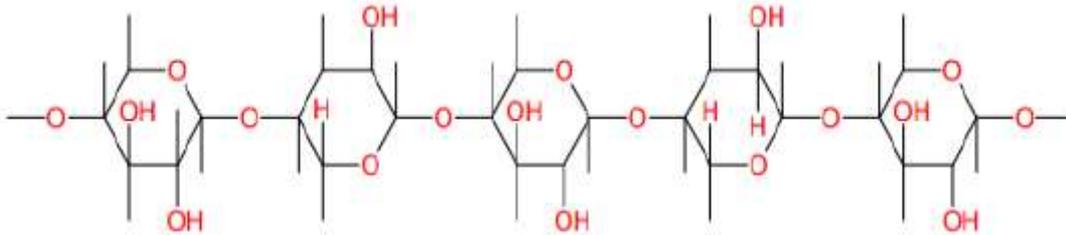
3.4.3. Hemiceluloses

A hemicelulose se faz presente em todas as camadas da parede celular da planta, concentrando-se principalmente nas camadas primárias e secundárias, nas quais estão majoritariamente ligadas a celulose e lignina. Por volta de 30% dos polissacarídeos que compõem a parede celular dos vegetais são formados de hemicelulose, sendo ela, desta forma, um carboidrato que se encontra de forma abundante no meio ambiente (Rabelo, 2010).

A principal cadeia da hemicelulose (Figura 11) pode ser constituída de uma só unidade (homopolímero), ou a partir de duas ou mais unidades (heteropolímero). Os açúcares que

compõem a hemicelulose têm a presença das pentoses, hexoses, ácidos hexurônicos e deoxi-hexoses (Pastore, 2004).

Figura 11 - Cadeia principal da hemicelulose



Fonte: Fengel e Wegener (1984)

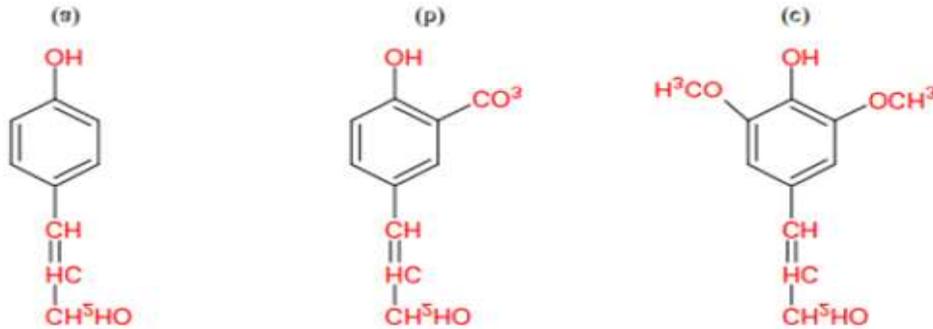
A hemicelulose se diferencia da celulose, em grande parte, por ser constituída de diferentes unidades de açúcares, o que forma cadeias moleculares curtas e muito ramificadas. Mesmo que as duas sejam formadas por açúcares, existem diferenças expressivas no modo em que se comportam quando estão em reação (Rabelo, 2010).

3.4.4. Lignina

A lignina é uma das macromoléculas que se encontra de forma mais abundante na biosfera, depois da celulose. Tem como definição uma estrutura tridimensional, amorfa, de alta ramificação e hidrofóbica (Silva, 2011).

Ela se incorpora durante o crescimento vegetal, e sua composição é feita basicamente por fenilpropano, que forma uma macromolécula tridimensional e amorfa. De acordo com Rabelo (2010), os monômeros que constituem a lignina são chamados de álcoois cumarílicos, que se diferenciam pelas trocas em seu anel aromático, como ilustra a Figura 12.

Figura 12 - Precursores da lignina; (a) álcool trans-p-cumarílico; (b) álcool trans-coniferílico; (c) álcool trans-sinapílico



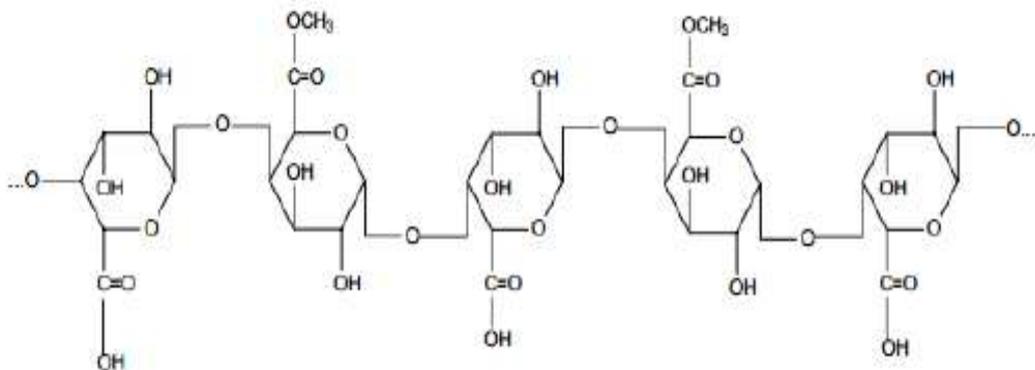
Fonte: Balogh (1989)

No processo de desenvolvimento celular, a lignina é a última a ser incorporada na parede da célula, envolvendo as microfibrilas celulósicas e garantindo o enrijecimento da parede celular, o que confere à planta dureza mecânica. Adicionalmente, a lignina é responsável pela realização de transporte de água e nutrientes na planta, protegendo seu tecido vegetal da degradação química/biológica (Marabezi, 2009).

3.4.5. Pectina

A pectina (Figura 13) é formada basicamente por ácido poligalacturônico, ramnose, arabinose e galactose. Ela é constituinte da lamela média da parede vegetal, sendo a parte mais facilmente extraída da parede celular, obtendo propriedades de gel (Rabelo, 2010).

Figura 13 - Estrutura da pectina



Fonte: Bobbio (1989)

3.5. PRODUÇÃO DE ETANOL ORIGINADOS DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS

A produção de etanol por meio de materiais lignocelulósicos passa, de modo geral, por quatro etapas: produção de enzimas, pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação (Sun e Cheng, 2002).

3.5.1. Enzimas

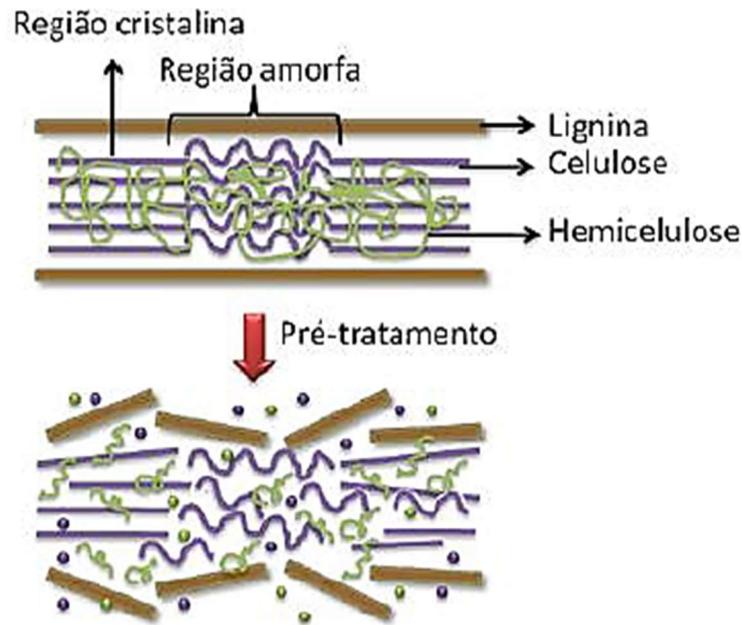
As enzimas são formadas por polímeros de aminoácidos, e efetuam o processo metabólico das células vivas. Elas atuam como um acelerador da velocidade de reações químicas, sem que ocorra alterações dos agentes presentes na reação (Rosa, 2003).

As enzimas podem ser de origem fúngica, bacteriana ou de animais superiores, microrganismos e vegetais superiores. A aquisição de enzimas por meio de microrganismos celulósicos traz cerca de 50% de retorno, quando se olha o custo global do processo para a aquisição dos açúcares por meio da hidrólise enzimática (Wyman, 2001).

3.5.2. Pré-tratamento

Para que seja possível a produção do etanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar, é necessário que haja a transformação da celulose e hemicelulose em monômeros de glicose e xilose. Além disso, é necessário que, posteriormente, exista a conversão dos microrganismos em etanol. Para que ocorra uma maior exposição das fibras da celulose, é necessário que o bagaço passe por um pré-tratamento (Figura 14), que consiste em remover a lignina e a hemicelulose da biomassa, reduzir a cristalinidade da celulose e aumentar a porosidade do material (Rabelo, 2010).

Figura 14 - Processo de pré-tratamento



Fonte: Mosier et al. (2005)

A biomassa é pré-tratada de forma que a celulose seja fracionada. Existem várias tecnologias para isso (como processo químico, que pode ser básico ou ácido, processo biológico, processo térmico e processo mecânico etc.). O intuito dessa etapa é disponibilizar a biomassa (Raízen, 2022).

Existe uma grande variedade de métodos de pré-tratamento, que irão depender do tipo de biomassa que será utilizada para o etanol de segunda geração, podendo ser físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, e também uma combinação entre os métodos (Haghghi Mood *et al.*, 2013).

Para cada tipo de pré-tratamento irá ocorrer uma alteração diferente na estrutura da biomassa. A eficiência de cada método será medida tanto na composição físico-química da biomassa quanto no seu desempenho na etapa de hidrólise enzimática. De forma geral, um bom pré-tratamento irá propiciar alto rendimento e conversão de hidrólise, não irá gerar inibidores de fermentação, possuirá um baixo custo e não apresentará perda de carboidrato ou degradação de biomassa (Balat *et al.*, 2008).

Os principais objetivos do pré-tratamento são: reduzir o grau de cristalinidade da celulose, dissociar o complexo celulose-lignina, aumentar a área superficial da biomassa, preservar as pentoses maximizando rendimentos em açúcares e evitar ou minimizar a

formação de compostos inibidores do processo, tanto na etapa de hidrólise quanto na etapa de fermentação (RABELO, 2010). De acordo com (PACHECO, 2011), o melhor pré-tratamento é aquele que não desestrutura a celulose e a lignina.

De maneira geral o processo do pré-tratamento consiste em um triângulo, sendo formado por alta temperatura, PH ácido e tempo de concentração, esses três fatores juntos são responsáveis por quebrar as moléculas da biomassa.

3.5.3. Hidrólise enzimática

Na etapa de hidrólise enzimática as cadeias da biomassa são quebradas em açúcares fermentescíveis. A hemicelulose que constitui o material é convertida em pentose, de forma predominante xilose, e a celulose é convertida em glicose (Chen *et al.*, 2011).

Condições do processo como temperatura, pH, tempo de sacarificação, concentração enzimática e relação sólido-líquido, irão depender do substrato que será utilizado e das propriedades das enzimas que serão utilizadas (Rabelo, 2010).

A forma como a reação enzimática irá ocorrer é extremamente dependente das características estruturais do substrato utilizado, da natureza das células e das condições do meio em que ocorrerá a reação. A eficiência da hidrólise de materiais lignocelulósicos está fortemente ligada à interação entre substrato e enzima (Yang *et al.*, 2011). Os fatores que influenciam a hidrólise enzimática estão listados na Tabela 4.

Tabela 4: Fatores que influenciam a hidrólise enzimática

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|
| Fatores relacionado ao substrato | | | | | |
| Cristalinidade da celulose | x | | | x | |
| Grau de polimerização (DP) | | x | | | |
| Disponibilidade/acessibilidade da área superficial | x | x | x | x | x |
| Organização estrutural (macro ou microestrutura) | | | x | x | |
| Tamanho de partícula | | | x | x | |
| Porosidade | | | x | x | x |
| Presença de lignina e hemicelulose | x | | | x | x |
| Fatores relacionados à enzima | | | | | |
| Natureza do sistema enzimático empregado (EG, CBH, BG) | x | x | x | x | x |
| Tamanho relativo das enzimas | | | | x | |
| Concentração da enzima | x | x | x | x | |
| Adsorção | x | x | x | x | x |
| Sinergismo | x | x | | x | |
| Inibição do produto final | | | | x | x |
| Desativação mecânica | | | | | x |
| Inativação térmica | | | | | x |
| Irreversibilidade da ligação com a lignina | | | | x | x |

1: Aumento aparente da cristalinidade do substrato durante toda a hidrólise;

2: Diminuição do DP;

3: Mudanças contínuas na acessibilidade de superfície, e topologia da superfície (corrosão de superfície);

4: Mudanças contínuas na digestibilidade do substrato;

5: Diminuição da concentração de enzima ativa;

EG: Endoglicanase; CBH: Celobiohidrolase; BG: β -glicosidase

Fonte: Rabelo (2010)

3.5.4. Processo de fermentação

A produção de etanol de segunda geração irá depender da eficiente metabolização das pentoses pelos microrganismos fermentadores. Embora existam diversos métodos e processos para obtenção de etanol a partir do uso da biomassa, ainda se tem dificuldades de se obter etanol lignocelulósico de maneira econômica (Giese *et al.*, 2011).

Segundo Eliasson *et al.* (2000), ainda que a *Saccharomyces cerevisiae* não possua capacidade de se utilizar da xilose, ela pode metabolizar o produto da isomerização da xilulose. Porém, o metabolismo deste isômero ocorre de forma lenta, por conta da baixa atividade da enzima xilulocinase (XK). A incapacidade da *S. cerevisiae* de metabolizar a xilose

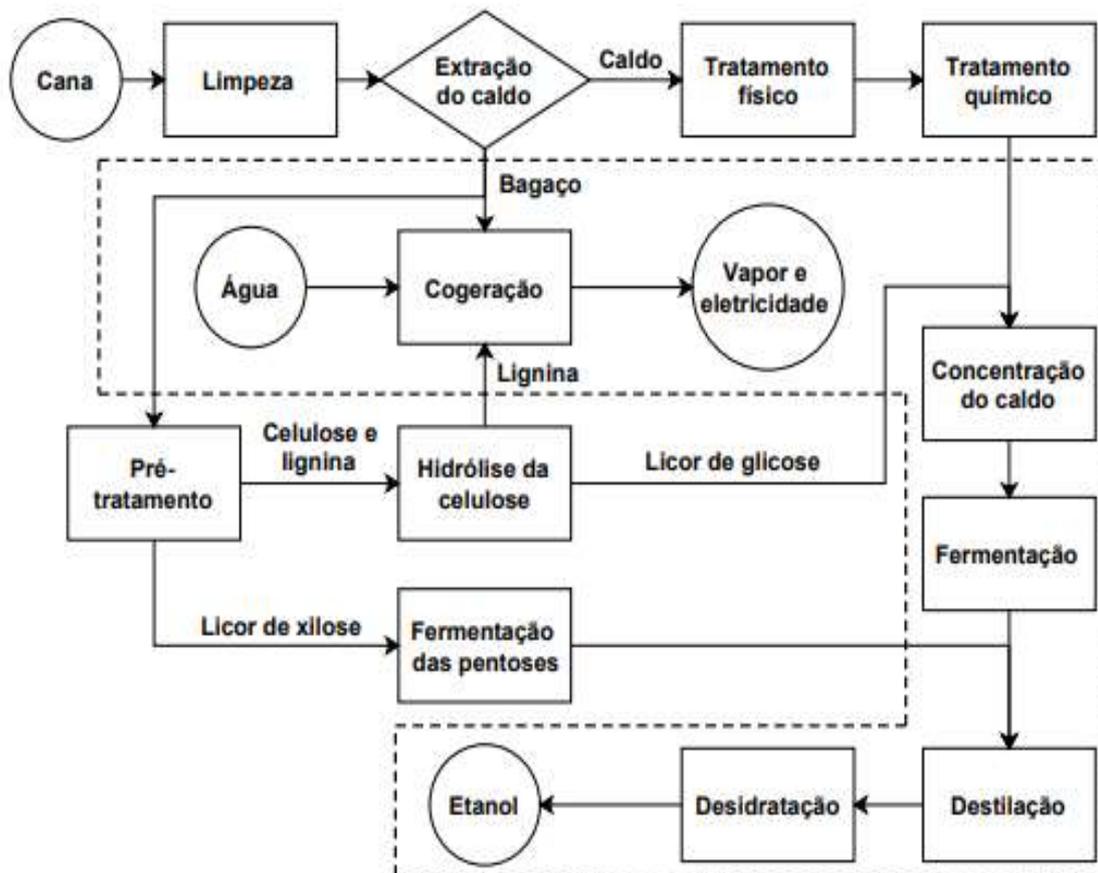
ocorre por conta da baixa expressão dos genes que codificam as enzimas que contribuem para a isomerização da xilose à xilulose e sua posterior fosforilação pela XK.

Existem outras espécies de leveduras, como *Candida succiphila*, *C. jeffriesii*, *C. intermedia*, *Pichia stipitis*, *Pichia tannophilus*, que possuem a capacidade de metabolizar xilose e produzir etanol (Jeffries *et al.*, 2007).

A levedura *Pichia kudriavzevii*, antes chamada de *Issatchenkia orientalis* e *Candida krusei*, tem se mostrado uma forte candidata na utilização para a fermentação de pentoses e hexoses (Pagnocca, 2015).

O processo de produção do etanol de segunda geração é representado na Figura 15, onde basicamente são utilizadas as etapas descritas anteriormente.

Figura 15 - Processo de produção do etanol de segunda geração



Fonte: Carpio, 2019

Após a etapa de pré-tratamento ocorre a hidrólise enzimática. Nas aplicações físicas ocorre a trituração da biomassa para ser tratada com vapor saturado depois da descompressão e uma termo-hidrólise; as aplicações químicas são realizadas com ácidos,

concentrados ou diluídos, e organosol; a aplicação biológica utiliza fungos e algumas bactérias para secretar enzimas extracelulares e remover uma quantidade de lignina da biomassa; e os combinados são uma mistura de práticas com vapor saturado e substâncias (Martins *et al.*, 2014).

A operação da hidrólise pode ser realizada de forma ácida ou enzimática para a quebra dos polissacarídeos em açúcares simples, fermentação destes açúcares e, separação e purificação do etanol (Martiniano, 2013).

O licor de glicose produzido na hidrólise do bagaço, com a tecnologia do etanol de segunda geração, é encaminhado para a etapa de concentração do caldo, onde a água é evaporada do caldo, e o caldo é esfriado mediante dois trocadores de calor (o primeiro trocador faz a troca térmica para pré-aquecer e o segundo faz o pré-aquecimento do caldo com água), sendo conduzido para a fermentação. A fermentação realiza o processo *Melle Boinot*, um regime não estacionário. Já o licor de xilose da etapa de pré-tratamento é direcionado para a fermentação das pentoses para a produção do etanol. A separação do licor de xilose é feita através de decanter e filtros rotativos. E assim, é realizado por dois evaporadores, com o objetivo de aumentar a concentração da xilose, onde a corrente de entrada (primeiro evaporador) é pré-aquecida com a corrente de saída (segundo evaporador). A xilose concentrada precisa resfriar-se, para alcançar a temperatura ideal, para a realizar a fermentação e atingir o etanol (Carpio, 2019).

4. COMPARATIVO ENTRE AS VANTAGENS PRODUTIVAS DO ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA GERAÇÃO

Apesar do avanço tecnológico existente no Brasil e da busca por meios mais sustentáveis de produção de energia, o uso do potencial produtivo do etanol de segunda geração ainda é baixo, registrando pouco mais de 100 milhões de litros produzidos por ano (Lorenzi e Andrade, 2019).

A diversificação da matriz energética mundial tornou-se fundamental em virtude da crescente demanda por energia. Sendo assim, o desenvolvimento econômico dos países que possuem a agroindústria do etanol consolidada, tem sido voltado para a obtenção de biocombustíveis sem aumento da área plantada. Isso é possível quando subprodutos do agronegócio em geral, passam a ter aplicação como insumos industriais, a chamada biorrefinaria. E são justamente esses dois fatores que concedem ao Brasil uma posição de destaque na produção de etanol 2G: um agronegócio forte e uma agroindústria do etanol 1G bem estabelecida (EMBRAPA, 2016).

Pode-se usar, para fins de comparação, a produção de etanol de primeira geração tendo como produto base o milho, onde existe um rendimento de 460 litros por tonelada do vegetal. Em contrapartida uma tonelada de cana-de-açúcar pode gerar uma produção de 85 a 90 litros. A principal diferença entre os processos produtivos está no tempo de fermentação, o milho demora de 38 a 45 horas, e no caso da cana-de-açúcar o tempo de espera fica de 10 a 12 horas, tornando o processo menos moroso e mais vantajoso, quando se fala em produção em larga escala (Nova Cana, 2017).

Os maiores produtores de milho brasileiro (são na ordem): Mato Grosso, Paraná e Mato Grosso do Sul (CONAB, 2021). Mato Grosso é o estado que mais produz milho no território brasileiro, sendo 15% da produção dedicada ao mercado interno. Existem, dentro do estado, usinas que trabalham com a produção de etanol advinda da cana-de-açúcar e do milho. Tais indústrias são chamadas de flex, e a produção de etanol a partir do milho ocorre no período de baixa da safra da cana-de-açúcar (Ozaki, 2019).

A industrialização do grão de milho beneficia também produtores florestais de eucalipto, planta que é utilizada como fornecimento de biomassa nas usinas que processam o etanol de milho. A relação vantajosa do uso da cana-de-açúcar está no plantio; são 7000

litros de etanol/hectare plantado em oposição à 2240 litros/hectare de milho plantado. Em contrapartida, caso não seja possível utilizar biomassa como combustível nas caldeiras, é necessário a utilização da energia elétrica. O que traz mais custos ao processo de produção.

Os processos de produção de etanol pela cana-de-açúcar e grão de milho são bastante similares entre si, tendo sua principal diferença nas etapas iniciais. Dessa forma, o termo Usinas Flex se origina da palavra Flexibilização, que permite alternar entre as duas matérias-primas. Na região centro-sul a safra de cana-de-açúcar ocorre de maio a novembro, ficando a fábrica de etanol parada ou em manutenção durante o período restante de meses (Pelegri, 2009).

O processo de produção do etanol de segunda geração ainda possui um custo mais elevado quando comparado com o processo comumente utilizado para a produção do etanol de primeira geração. A necessidade do uso de enzimas no processo fermentativo encarece a produção, bem como as etapas de pré-tratamento.

Apesar da produção de etanol de segunda geração ser uma alternativa promissora para o futuro energético, ainda é um processo de alto custo, e não é economicamente viável em casos de plantas industriais que não estejam adaptadas para a produção desse tipo de etanol. Apesar disso, é esperado que com o desenvolvimento de pesquisas, em poucos anos, o custo de produção do etanol a partir de resíduos de biomassa seja mais barato, tornando-se mais vantajoso quando comparado com o etanol de primeira geração.

Para que seja possível o uso da celulose na produção de etanol em grande escala, em um nível competitivo, é necessário que haja o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para a biomassa lignocelulósica na etapa de pré-tratamento, desenvolvimento e produção de microrganismos que tenham capacidade de metabolizar açúcares pentoses e hexoses e resistam ao estresse causado pelos inibidores, microrganismos geneticamente modificados capazes de se manter estáveis em produções de larga escala (Margeot *et al.*, 2009).

Não há dúvidas de que o futuro da produção de energia está no etanol a partir de biomassa. Onde o etanol será produzido a partir de bagaço, celulose e outras matérias orgânicas incrementando a produtividade em 40-50%. E onde se terá uma produção menos poluente, em harmonia com o meio ambiente (Sachs, 2005).

O setor agrícola do Brasil contribui para a disponibilidade de inúmeros resíduos de

biomassas, o Brasil é líder na produção de etanol de primeira geração utilizando a cana como fonte, sendo também conhecido como o maior produtor de cana-de-açúcar. A confecção desse etanol depende da moenda de cana-de-açúcar proporcionar a disponibilidade e um baixo custo dos resíduos lignocelulósicos para o Bioetanol (Santo, 2015).

Segundo o IBGE (2020a), a produção de cana-de-açúcar de 2020 coletou 757.116.855 toneladas de uma área de 10.014.298 hectares, gerando um valor de R\$ 60.800.886, com rendimento médio de 75,6 toneladas por hectare. O maior estado produtor é São Paulo, seguido por Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná.

Segundo Araújo, Navarro e Santos (2013), a confecção do Bioetanol através do bagaço da cana-de-açúcar é a melhor alternativa para o Brasil, contribuindo para a diminuição o aquecimento global, competindo com os altos preços do petróleo e aumento da demanda no mercado nacional e internacional por biocombustíveis.

A utilização da cana-de-açúcar para a indústria no Brasil é utilizada para diversos produtos. Assim, a geração do bagaço tem potencial para gerar o etanol de segunda geração, uma vez que a produção de 1 tonelada de cana-de-açúcar gera cerca de 140 quilogramas de bagaço (Silveira, 2021).

A fabricação do etanol de segunda geração no Brasil possibilitará o desenvolvimento e crescimento do setor de produção de energia limpa, tendo uma posição de liderança na produção de biocombustíveis, e o desenvolvimento do Sistema Nacional de Inovação em etanol (Souza, 2013), além de contribuir para a inovação, tornará o País um jogador estratégico no mercado energético internacional (Araujo, Navarro e Santos, 2013).

Da vasta gama de matérias que geram energia e possuem resíduos que podem ser reutilizados, a biomassa lignocelulósica está entre as fontes biológicas de maior abundância, de baixo custo e grande potencial energético para produção de etanol de segunda geração (Santos, 2012).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, e seus resíduos são abundantes e de grande potencial, com pouco uso ainda no país. O potencial produtivo de biomassa seca é estimado em 1 bilhão de toneladas para cerca de 80-130 bilhões de galões de etanol (Zhang, 2008).

Ainda que exista um grande avanço na tecnologia e uma crescente busca por fontes

sustentáveis de matéria-prima, no Brasil, o uso do potencial produtivo de etanol de segunda geração ainda é baixo, registrando pouco mais de 100 milhões de litros produzidos por ano.

A moagem de cana-de-açúcar no acumulado da safra 2022/23 (abril de 2022 a março de 2023) atingiu 538,98 milhões de toneladas até 16 de dezembro passado, em comparação com 522,61 milhões de toneladas registradas em igual período de 2021/22, correspondendo a um avanço de 3,13%. No acumulado desde o início do atual ciclo agrícola, a fabricação do biocombustível totalizou 27,15 bilhões de litros (+2,52%), dos quais 15,63 bilhões consistem em etanol hidratado (-0,65%) e 11,52 bilhões em anidro (+7,16%) (Canal Rural, 2023).

O bagaço é um dos resíduos provenientes da cana-de-açúcar que possui um alto potencial energético. Em grande parte dos casos o subproduto é queimado nas caldeiras para produção de vapor que é utilizado para geração de energia elétrica. Cerca de 28% dos resíduos do processo produtivo da cana-de-açúcar são compostos pelo bagaço e 50% são resíduos da cana, entre outros materiais (colmo, palha, copas, folhas) (Khatiwada *et al.*, 2016).

O Brasil enfrenta dificuldades para realizar o processo de produção de etanol de segunda geração, pois poucas empresas realizam a produção em escala industrial, devido ao elevado custo de capital industrial para habilitar uma empresa a essa função. Associado a isso, o setor também enfrenta problemas relacionados às tecnologias do processo, pois o tempo de quebra da lignina e da hemicelulose ainda é longo. Assim, o custo de investimento para produção do etanol de segunda geração acaba sendo desaconselhável economicamente, sendo a produção do etanol de primeira geração ou até mesmo a produção do etanol de primeira e segunda geração em uma mesma planta mais viável economicamente (Santos, 2012)

Atualmente é mais interessante, do ponto de vista econômico, montar uma usina para produção de etanol de primeira geração. O custo para produção de etanol de primeira geração custa em torno de R\$ 1,15 por litro, enquanto o custo para produção de etanol de segunda geração gira em torno de R\$ 1,50 o litro (Alisson, 2017).

Pesquisadores afirmam que em 2025 o etanol de segunda geração pode se tornar economicamente viável, sendo um produto que irá competir com o etanol de primeira geração. Os obstáculos para sua produção ainda estão no custo da biomassa para produção do E2G, falta de sistema agrícola para o uso da cana de forma integral (considerando sua

palha), custo dos equipamentos necessários no parque industrial elevados, pré-tratamento da biomassa e tempo necessário de hidrólise alto (Fapesp, 2017).

A respeito de pesquisas sobre o etanol de segunda geração, os cinco primeiros países que realizam pesquisas e publicações científicas sobre o assunto, são: os Estados Unidos (1.559); a China (684); Brasil (347); Japão (332) e Índia (299). A liderança dos Estados Unidos está na sua capacidade de desenvolver a tecnologia para a produção desse etanol. Apesar de o Brasil ser o 3º maior em número de publicações, não apresenta articulação com os outros países para a realização do desenvolvimento do Bioetanol. As publicações científicas sobre o etanol de segunda geração no Brasil e sua colocação no *ranking* de liderança é devido a Universidade de São Paulo (USP) assumir uma alta inserção de pesquisas e publicações focadas nesse combustível (Souza, 2013).

No que se diz respeito ao aspecto energético do etanol produzido a partir de produção convencional e segunda geração não existem diferenças significativas com relação ao poder calorífico, visto que os processos de produção são diferentes, mas o produto gerado é o mesmo.

A Tabela 5 apresenta um comparativo entre o etanol de primeira geração e o etanol de segunda geração, considerando aspectos produtivos, tecnológicos, ambientais, sociais e de perspectiva futura.

Tabela 5: Comparativo entre o etanol de primeira e segunda geração

| Aspectos | Etanol de primeira geração | Etanol de segunda geração |
|---------------------------|---|---|
| Produtivo | Alta produtividade por área plantada. | Não precisa aumentar a área plantada, pois utiliza a mesma cana-de-açúcar usada na produção do etanol de primeira geração. |
| Econômico | Custo menor de produção, R\$1,15 o litro. | Custo produtivo ainda é maior, R\$ 1,5 o litro; Não há custo com novas fontes de matéria prima; A comercialização em grande escala ainda não é viável economicamente. |
| Tecnologia | Cultura mecanizada; Mão de obra com baixo/médio nível de escolaridade; Tecnologia já consolidada. | Indústria altamente tecnológica; Mão de obra com alto nível de escolaridade; Tecnologia nacional em desenvolvimento; Diferenças na fase de pré-tratamento. |
| Ambiental | Fonte renovável; Baixa emissão CO2 comparado a gasolina. | Inovação Ambiental; Melhor aproveitamento da área plantada; Menor impacto ambiental. |
| Social | Média de renda e escolaridade maior comparado a trabalhadores do setor agrícola | Melhoria da qualificação de mão-de-obra; Mão de obra com nível de renda e escolaridade mais elevados |
| Perspectiva futura | Produção estável. | Aumento da produtividade e redução de custos. |

Fonte: Elaborada pela autora

5. CONCLUSÃO

A produção de etanol vem sendo tema de várias pesquisas, não só pelo grande poder de produção, devido a vasta área que pode ser plantada e pela diversidade de matérias-primas que podem ser utilizadas, mas também por ser um biocombustível capaz de competir com combustíveis produzidos a partir de fontes não renováveis de energia.

A produção do etanol de segunda geração traz uma grande evolução quando se pensa em combustíveis que geram menos gases poluentes e podem ser produzidos através de fontes diversas. Não só a partir dos resíduos do processo do etanol de primeira geração, mas também da palha, plantas e materiais que tenham fonte lignocelulósica.

Produzir o biocombustível E2G é viável no Brasil, e pode aumentar a produção de uma planta industrial em até 50% quando comparado a plantas que produzem somente etanol de primeira geração. Porém os custos de produção do etanol de segunda geração ainda são elevados. A escolha da melhor enzima para abertura de fibras, gerando um processo de extração eficiente é de vital importância, bem como investimentos em pesquisas para que o processo de produção seja menos demorado.

Conforme pesquisa realizada, para produção de etanol a partir dos grãos de milho, por exemplo, onde se utiliza enzimas para quebra de amido, leva-se um tempo de 38 a 45 horas. Em contrapartida o etanol feito a partir da cana-de açúcar leva de 10 a 12 horas no processo de fermentação. Sendo o etanol de primeira geração (o qual não utiliza enzimas para quebra de amido) mais vantajoso e com processo de produção mais rápido.

Pode-se afirmar que a produção do etanol de segunda geração é muito promissora, e será capaz de suprir boa parte da demanda de biocombustíveis no país, porém, ainda é necessário a realização de mais pesquisas a respeito do tema, para que seja possível tornar o processo mais rápido e com um melhor custo-benefício.

Como trabalhos futuros, sugere-se desenvolver pesquisas em pontos específicos do processo produtivo do etanol de segunda geração, que exigem um desenvolvimento tecnológico próprio para essa nova forma de produção. Um aspecto a ser pesquisado é a troca térmica do condensador, que ainda possui muitas perdas e necessita aumentar a sua eficiência, visto que foi adaptado de um outro processo produtivo.

Recomendações para trabalhos futuros

O principal desafio em produzir o etanol de segunda geração a um custo mais competitivo está em determinar a melhor disponibilidade da glicose, aumentando o rendimento glicosídico e a fermentabilidade do hidrolisado. A integração energética deve ser perfeita, para que se possa aproveitar todos os resíduos, hemicelulose e lignina da biomassa do sorgo sacarino. Dessa forma, há vários processos ainda a serem pesquisados e desenvolvidos.

Uma sugestão de melhoria no processo, para aumentar a eficiência energética, apresentado por Camargo e Moreira (2022), é relacionada a troca térmica na etapa de evaporação. O trocador de calor é um equipamento que realiza a troca térmica entre dois fluidos com diferentes temperaturas. Esse equipamento possui diferentes tipos, sendo que o tipo utilizado, no processo em questão, são os trocadores de calor de placa. Para melhorar o desempenho do processo, diminuindo as perdas, verifica-se a existência da necessidade de melhoria neste equipamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alisson, Elton. **Etanol de segunda geração poderá ser economicamente viável a partir de 2025**. Fundação de amparo à pesquisa do estado de São Paulo – FAPESP, Agência FAPESP, 2017. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/etanol-de-segunda-geracao-podera-ser-economicamente-viavel-a-partir->

[de2025/26272/#:~:text=%E2%80%9CAo%20custo%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de,litro%E2%80%9D%2C%20estimou%20o%20pesquisador](https://agencia.fapesp.br/etanol-de-segunda-geracao-podera-ser-economicamente-viavel-a-partir-de-2025/26272/#:~:text=%E2%80%9CAo%20custo%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de,litro%E2%80%9D%2C%20estimou%20o%20pesquisador). Acesso em 05 jul de 2023.

Araujo, Geraldo José Ferraresi de; Navarro, Luiz Felipe Scaranti; Santos, Bruno Antonio Santana. **Etanol de segunda geração e sua importância estratégica ante o cenário energético internacional contemporâneo**. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 5, 2013, p. 01-11.

Assumpção, Samira Maria Nonato de. **Pré-tratamento químico combinado do bagaço da cana visando a produção de etanol de segunda geração**. Dissertação (mestrado). 2015. 99 p. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2015.

Balat, M., Balat, H., OZ, C. 2008. **Progress in Bioethanol Processing, Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, pp. 551-573.

Barcelos, C. A. **Aproveitamento das frações sacarínea, amilácea e lignocelulósica do sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para a produção de bioetanol**. 2012. 334 f. Tese (Doutorado em Ciências (DSc). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

Balogh, D.T (1989). **Efeito de solvente na obtenção de ligninas pelo processo organo solv**. 110p. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

Camargo, Kelly Cristina Costa, Moreira, Frederico Silva. **Etanol de segunda geração, o biocombustível atual**. Anais do III CoBICET, Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 29 de agosto a 02 de setembro, 2022.

Camargo, P.D. **Força verde: um novo campo para a indústria química**. Revista Brasileira de Engenharia Química, p. 18-21, 2007.

Canal Rural. **Moagem de cana acumulada na safra 22/23 supera total de 21/22: No acumulado desde o início da safra 2022/2023, a fabricação de açúcar totaliza 33,29 milhões de toneladas**. [S. l.], 29 jun. 2023. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/cana/moagem-de-cana-acumulada-na-safra-22->

23-supera-total-de-21-22/. Acesso em: 20 jul. 2023.

Carvalho, M. L. **Estudo Cinético da Hidrólise Enzimática de Celulose de Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, 2011.

Carpio, Roymel Rodriguez. **Otimização do processo de produção de etanol de segunda geração em um sistema integrado à primeira geração**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química. Rio de Janeiro, abril 2019.

CGEE. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS TECNOLÓGICOS, 2009.

Chen, W., XU, Y., WANG W., WANG, J. B., 2011, **Pretreatment of rice straw using an extrusion/extraction process at bench-scale for producing cellulosic ethanol**, *Bioresource Technology*, v. 102, pp. 10451-10458.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira - cana-de-açúcar (safra 2022/23)**. – Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, 2023.

Dias, M.O.S. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes de bagaço**, 2008. 253p. Dissertação (Mestrado) -Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Eliasson, A., Christensson, C., Wahlbom, C.; Hahn-Hagerdal, B. (2000). **Anaerobic Xylose Fermentation by Recombinant *Saccharomyces cerevisiae* Carrying XYL1, XYL2, and XKS1 in Mineral Medium Chemostat Cultures**. *Applied and Environmental Microbiology*, 66.

EMBRAPA. Contextualização, **mercado e gargalos de P&D do etanol lignocelulósico**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1054229/contextualizacao-mercado-e-gargalos-de-pd-do-etanol-lignocelulosico>. p. 35.

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.

Ferreira, Antonio Carlos. **Estudo comparativo da troca térmica em trocadores de calor dos tipos casco-tubos e de placas**. Unoesc & Ciência – ACET, Joaçaba, p. 57-66, 2014.

Fengel, D.; Wegener, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**, Berlin/New York: Walter de Gruyter. 613p. , 1989.

Freitas, L.A. **Produção de etanol de segunda geração utilizando bagaço de sorgo sacarino, forrageiro e biomassa**. Tese (doutorado em microbiologia agropecuária). 2017. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017. 179p.

Fonseca, Gabriel de Castro. **Modelagem e simulação de uma destilaria autônoma de produção de etanol de primeira geração (E1G)**.90fl. São Carlos: UFSCar, 2014.90f.

Giese, E. et al. **Prospects for the bioethanol production from sugarcane feedstock: focus on Brazil**: Nova Science Publishers, New York, NY, USA 2011.

Haghighi Mood, S. et al. **Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27, p.77–93, 2013.

IBGE. **Produção de Cana-de-açúcar**. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>> Acesso em: 12 ago 2022.

Jeffries, T. W.; Grigoriev, I. V.; Grimwood, J.; Laplaza, J. M.; Aerts, A.; Salamov, A.; Richardson, P. M. Genome sequence of the lignocellulose-bioconverting and xylose-fermenting yeast *Pichia stipitis*. **Nature Biotechnology**, 25, 319-326, 2007.

Knauf, M.; Moniruzzaman, K. **Lignocellulosic biomass processing: A perspective**. *International Sugar Journal*, v. 106, n.1263, p. 147-150, 2004.

Khatiwada, Dilip; Leduc, Sylvain; Silveira, Semida; McCallum, Ian. **Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil**. Renewable Energy, v. 85, p. 371-386, 2016.

Leite, R. C.; Cortez, L. A. B. O etanol combustível no Brasil. In: SWARZAC, A. **Biocombustíveis no Brasil: realidade e perspectivas**. Brasília: Ministério das Relações Exteriores, 2008. p. 60-75. Disponível em: <http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdrmftk.pdf>. Acesso em: maio de 2023;

Lorenzi, Bruno Rossi; Andrade, Thales Haddad Novais. **O etanol de segunda geração**

no Brasil – Políticas e redes sociotécnicas. Revista Brasileira de Ciências Sociais, São Paulo, v. 34, n. 100, e3410014, set. 2019.

Marabezi, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar.** 2009. 135f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Margeot, A.; Hahn-Hagerdal, B.; Edlund, M.; Slade, R.; Monot, F. **New improvements for lignocellulosic ethanol.** Current Opinion Biotechnology, v. 20, n.3, p. 372-380, 2009.

Martiniano, Sabrina Evelin. **Potencial fermentativo das leveduras Candidashehatae CG8-8BY e Spathasporaarborariae UFMG-HM 19.1 A para a produção de etanol de segunda geração.** Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na área de Microbiologia Aplicada. Lorena, 2013.

Martins, Fernanda de Araújo; Martim, Thamara; Correa, Andressa Maria; Oliveira, Faberson Ferreira de. **A produção do etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar.** Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, Vol. 2, n. 3. jul./dez 2014.

Mosqueira, Salazar; Klever, João. **Uso de água e análise exergética na produção integrada de etanol de primeira e segunda geração a partir da cana-de-açúcar.** Campinas, SP:2012.

Mosier, N.; Wyman, C.; Dale, B.; Elander, R. **Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass.** Bioresource Technology, v.96, pp. 673-686, 2005.

NovaCana. **Curiosidades sobre o etanol.** Portal NovaCana, 2017. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/curiosidades>. Acesso em: 10 de julho, 2023.

Nunes, Rachel de Moura; Guarda, Emerson Adriano; Serra, Juan Carlos Valdés; Martins, Álvaro Alves. **Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 14, n. 22, p. 113-238, jul./dez. 2013.

Ozaki, Paulo Moraes. **Clusters de etanol de milho.** Disponível em: <http://www.imea.com.br/imeasite/view/uploads/estudoscustomizados/AnaliseClusterEtanoIMilho.pdf>. Acesso em 05 julho 2023

Pagnocca, F. C. **A busca por mais etanol.** Disponível na internet em: <http://www.rc.unesp.br/ib/ceis/mundoleveduras/2012/A%20busca%20por%20mais%20eta>

nol.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2023.

Pastore, T.C.M. **Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias Raman (Ft-Raman), de reflectância difusa do infravermelho (DRIFT) e no visível (CIEL-L*a*b)**. 117p. Tese (Doutorado). Instituto de Química Universidade de Brasília. 2004.

Pellegrini, Luiz Felipe. **Análise e otimização termo econômica ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**. Diss. Universidade de São Paulo, 2009.

Prati, P.; Camargo, G. A. **Características do caldo de cana e sua influência na estabilidade da bebida**. BioEng, Campinas, v.2, n.1, p.037-044, jan./abr., 2008.

Rabelo, S. C. **Avaliação de Desempenho do Pré-tratamento com Peróxido de Hidrogênio Alcalino para a Hidrólise Enzimática de Bagaço de cana-de-açúcar**. Campinas, 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.

Raizen. **Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades**. [S. l.], 25 maio 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em: 20 jul. 2023.

Renewable Fuels Association. **Annual Ethanol Production**. Website, s.d. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production> > Acesso em: 10 ago 2022.

Robak, Katarzyna; Balcerek, Maria. Review of second-generation bioethanol production from residual biomass. **Food Technology and Biotechnology**, v. 56, n. 2, p. 174-187, jun. 2018.

Rodrigues, F.A. **Avaliação da tecnologia de hidrólise ácida de bagaço de cana**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

Rosa, Sergio Eduardo Silveira da; Garcia, Jorge Luiz Faria. **O etanol de segunda geração: limites e oportunidades**. Revista do BNDES 32, dezembro, 2009.

Sachs, Ignacy. **Os biocombustíveis estão chegando à maturidade**. Democracia Viva, No. 29, Dez/Out, 2005.

Santiago, Bárbara Luiza Silva; Rodrigues, Fábio de Ávila. **Processamento de biomassa lignocelulósica para produção de etanol: uma revisão**. The Journal of Engineering and Exact Sciences- JCEC, v. 03, n. 07, p. 1011-1022, 2017.

Santo, Melissa Cristina do Espirito. **Otimização de estratégias de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração via hidrólise enzimática**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências. São Carlos, 2015.

Santos, Fernando; QUEIRÓZ, José; Colodette, Jorge; Fernandes, Sergio; Guimarães, Valéria; Rezende, Sebastião. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. Química Nova, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

Senna, Pedro Pinho. Ansanelli, Stela Luiza de Mattos. **Etanol de primeira ou de segunda geração? Uma comparação entre os ciclos produtivos**. BlucherEngineeringProceedings, 3(4), 1497-1510, 2016.

Silva, R.; Haraguchi, S. K.; Muniz, E. C.; Rubira, A. F. **Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos**. Química Nova 32, 661-671, 2009.

Silva, Neumara Luci Conceição. **Produção de bioetanol de segunda geração a partir de biomassa residual da indústria de celulose**. Dissertação apresentada Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências (M.Sc). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

Silveira, Juliane Machado da. **Obtenção de etanol de segunda geração (E2G) utilizando células de Spathasporapassalidarum NRRL Y-27907 imobilizadas em alginato de cálcio**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2021.

Souza, Luiz Gustavo Antonio de. **Redes de inovação em etanol de segunda geração**. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Piracicaba, 2013.

Sun, Y., Cheng, J., 2002. **Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review**. Bioresource Technology, v.83, pp. 1–11.

Vásquez, M. P. **Desenvolvimento de processo de hidrólise enzimática e fermentação simultâneas para a produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Vidal, Maria de Fátima. **Produção e mercado do etanol**. Caderno Setorial Etene, ano 6, nº 159, abril, 2021.

Wyman, C. E. **Twenty years of trials, tribulations and research progress in bioethanol technology - Selected key events along the way.** Applied Biochemistry and Biotechnology, 91-3, 5-21, 2001.

YANG, B.; DAL, Z.; DING, S.Y.; WYMAN, C.E. **Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass.** Biofuels, 2 (4), 421-450, 2011.

Zhang, Y-H. Percival. **Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries.** Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, v. 35, n. 5, p. 367-375, 2008.

Zheng, Y.; Pan, Z.; Zhang, R. **Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production.** Int. J Agric. & Biol. Eng., v. 2, n. 3, p. 51-68, set., 2009.