UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

EUDES FERNANDES DA SILVA

Produção de Etanol Segunda Geração (E2G) em biorreatores a partir da biomassa do sorgo sacarino *(Sorghum bicolor* [L.] Moench*): uma revisão bibliográfica.*

JOÃO PESSOA - PB
2022

EUDES FERNANDES DA SILVA

Produção de Etanol Segunda Geração (E2G) em biorreatores a partir da biomassa do sorgo sacarino *(Sorghum bicolor* [L.] Moench*): uma revisão bibliográfica.*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química Industrial, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, campus I, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Profª. Drª Andrea Lopes de Oliveira Ferreira

JOÃO PESSOA

2022

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586p Silva, Eudes Fernandes da.
Produção de Etanol Segunda Geração (E2G) em biorreatores a partir da biomassa do sorgo sacarino (Sorghum bicolor [L.] Moench): uma revisão bibliográfica. / Eudes Fernandes da Silva. - João Pessoa, 2022.
54 f. : il.

Orientação: Andrea Lopes de Oliveira Ferreira.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Etanol de segunda geração(E2G). 2. sorgo sacarino. 3. Cinética. 4. Biorreator. I. Ferreira, Andrea Lopes de Oliveira. II. Título.

UFPB/CT CDU 66.01(043.2)

Elaborado por ROSANGELA GONCALVES PALMEIRA - CRB-216

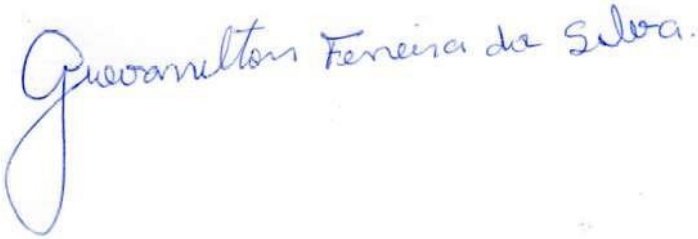
EUDES FERNANDES DA SILVA

Produção de Etanol Segunda Geração (E2G) em biorreatores a partir da biomassa do sorgo sacarino *(Sorghum bicolor* [L.] Moench*): uma revisão bibliográfica.*

Aprovada em: 12 de dezembro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof.ª Dra. Andrea Lopes de Oliveira Ferreira – DEQ/CT/UFPB(Orientadora)



Prof. Dr. Giovanilton Ferreira da Silva – DEQ/CT/UFPB(Membro da Banca)

Eng. Mirelle Dayanne Freire de Lima – PPGEQ/CT/UFPB (Membro da Banca)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças nos momentos difíceis.

A minha mãe Rosimere Celestino e ao meu pai José Fernandes, pela educação, por todo amor, esforço e trabalho duro.

A profª. Dr.ª Andrea Lopes, toda a minha gratidão pelo incentivo, força, atenção e paciência, que tornou possível a realização deste trabalho, e ao longo desses últimos semestres de curso.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química (DEQ) e Departamento de Química (DQ) pelo aprendizado.

Agradeço a minha irmã Eudiany Fernandes, pelo apoio e amizade na minha vida inteira; e aos meu sobrinhos Iago e Isabela, aos meus avós Luzinete Pereira, Mário Celestino, Gercina Luzia e Pedro Fernandes, pela força.

Aos amigos e em especial a Elisabely, Gabriel, Gabriella, Joelyngton, Juan, Naiele e Thiago, por sempre me ajudarem e estarem comigo, e nesses anos de curso me proporcionarem momentos engraçados e felizes ao longo da graduação.

À toda minha família, por todo apoio e carinho.

A todos que contribuíram e me apoiaram ao longo desses anos.

RESUMO

Nos dias atuais têm se discutido várias questões a respeito da produção e desenvolvimento das tecnologias de novas fontes energéticas. Isso ocorre pelo fato da crescente preocupação com o meio ambiente, e com a preocupação do esgotamento e com alta nos preços dos combustíveis de origem fósseis. Todos esses impasses levou a busca de novas fontes de obtenção de energia. Um candidato a combustível que tem se mostrado muito promissor é o etanol de segunda geração, pois ele é produzido a partir de materiais lignocelulósicos, sendo essa biomassa considerada resíduos, alguns exemplos desses materiais são: o bagaço da cana-de-açúcar, a palha do milho, palha do feijão e etc. A biomassa do sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* [L.] Moench*)* tem se mostrado um forte candidato para a produção de etanol segunda geração, o sorgo sacarino é uma planta originada da África, pra ser mais exato da região onde engloba os países Etiópia e Sudão, essa planta tem um alto valor pois é constituída de três grupos de matérias susceptíveis para o processo fermentativo do etanol, sendo eles os açúcares (no caule), o amido (nos grãos) e o material lignocelulósicos (no bagaço). Tendo em vista que o sorgo sacarino é um forte candidato para a produção de etanol segunda geração, esse trabalho buscou abordar os processos de produção de etanol utilizando a biomassa do sorgo sacarino como fonte de carbono em biorreatores, que são recipientes utilizados nos processos de fermentação, onde ocorre as reações químicas catalisadas por "biocatalisadores", tendo o controle de algumas variáveis importantes para o processo, como a temperatura e pH. Foram encontrados 12 artigos científicos sobre o tema de nossa pesquisa e se observou que o uso do sorgo sacarino na produção de etanol reduziu o tempo de entressafra e aumentou a disponibilidade do etanol no mercado.

Palavras-chave: Etanol de segunda geração (E2G); sorgo sacarino; cinética; biorreator.

ABSTRACT

Nowadays, several issues have been discussed regarding the production and development of technologies for new energy sources. This is due to the growing concern with the environment, and the concern with the exhaustion and high prices of fossil fuels. All these impasses have led us to search for new sources of energy. One candidate that has shown great promise is second generation ethanol, because it is produced from lignocellulosic materials, and this biomass is considered waste, some examples of these materials are: sugarcane bagasse, corn straw, bean straw, etc. The biomass of sugar sorghum (Sorghum bicolor L.) has shown to be a strong candidate for the production of second generation ethanol, the sugar sorghum is a plant originally from Africa, to be more exact from the region where Ethiopia and Sudan are located. This plant has a high value because it is composed of three groups of susceptible materials for the fermentation process of ethanol, which are sugars (in the stem), starch (in the grains) and lignocellulosic material (in the bagasse). Considering that sugar sorghum is a strong candidate for the production of second generation ethanol, this paper sought to approach the processes of ethanol production using sugar sorghum biomass as a carbon source in bioreactors, which are containers used in fermentation processes, where chemical reactions catalyzed by "biocatalysts" occur, having the control of some important variables for the process, such as temperature and pH. Twelve scientific articles were found on the subject of our research and the use of sugar sorghum in ethanol production reduced off-season time and increased availability of ethanol in the market.

Key words: Second generation ethanol (E2G); sugar sorghum; kinetics; bioreactor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fase industrial do E1G.....	20
Figura 2	Fase industrial do E2G.....	21
Figura 3	Produção dos principais biocombustíveis a partir das microalgas..	22
Figura 4	Plantação de sorgo sacarino.....	24
Figura 5	Fenologia da cultura do Sorgo sacarino- Estágios de crescimento da fase de emergência até a fase de maturação.....	25
Figura 6	Modelo da estrutura molecular dos principais constituintes do material lignocelulósico (parede secundária)	28
Figura 7	Estrutura molecular do polímero natural celulose e da sua unidade monomérica celobiose.....	30
Figura 8	Estrutura de uma hemicelulose.....	30
Figura 9	Representações de unidade de polissacarídeos presentes na hemicelulose.....	31
Figura 10	Principais percursores da lignina.....	32
Figura 11	Estrutura geral da pectina.....	33
Figura 12	Pré-tratamento em materiais lignocelulósicos.....	35
Figura 13	Enzimas envolvidas na hidrólise da celulose.....	37
Figura 14	Rotas de hidrólise e fermentação.....	38
Figura 15	Processo bioquímico da fermentação.....	39
Figura 16	Tipos de Biorreatores.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Participação de renováveis na matriz energética..... 18

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Produção mundial de etanol.....	17
Quadro 2	Produção de Cana-de-açúcar e Etanol.....	18
Quadro 3	Características agronômicas dos 5 tipos de sorgo.....	23
Quadro 4	Períodos de plantio e colheita para o sorgo sacarino e a cana-de-açúcar no Brasil.....	26
Quadro 5	Comparação das características industriais e tecnológicas do caldo, colmo e bagaço entre a cultura de sorgo sacarino e cana-de-açúcar...	27
Quadro 6	Composição química de alguns materiais lignocelulósicos.....	29

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

BRIX - Porcentagem em massa de sólidos solúveis contida em uma solução

AR - Açúcares Redutores

ART - Açúcares Redutores Totais

ARRT - Açúcares Redutores Residuais Totais

pH - Potencial hidrogeniônico

E1G – Etanol Primeira Geração

E2G – Etanol Segunda Geração

E3G – Etanol Terceira Geração

C_2H_6O - fórmula molecular do Etanol

r_X - taxa de produção celular

r_p - taxa de produção do produto

r_s - taxa de consumo do substrato

S - Concentração do substrato

V - Volume da dorna

X - Concentração de biomassa

$Y_{P/S}$ - rendimento em etanol

$Y_{X/S}$ - rendimento em células

ºC - temperatura em graus Celsius

μ - velocidade específica de crescimento celular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 12
2 OBJETIVOS..... 14
2.1 OBJETIVOS GERAIS..... 14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 15
3.1 ETANOL..... 15
3.1.1 O Etanol no Cenário Mundial..... 16
3.1.2 O Etanol No Cenário Nacional..... 17
3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL..... 19
3.2.1 Etanol De Primeira Geração..... 19
3.2.2 Etanol De Segunda Geração..... 20
3.2.3 Etanol De Terceira Geração..... 21
3.2.4 Sorgo..... 22
3.2.4.1 Aspectos Gerais Da Cultura Do Sorgo..... 22
3.2.4.2 Sorgo Sacarino..... 24
3.2.4.3 Sorgo Sacarino X Cana-De-Açúcar..... 25
3.3 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICAS..... 27
3.3.1 Celulose..... 29
3.3.2 Hemicelulose..... 30
3.3.3 Lignina..... 32
3.3.4 Pectina..... 32
3.4 PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS..... 33
3.4.1 Produção De Enzimas..... 33
3.4.2 Pré-Tratamento..... 34
3.4.2.1 Tipos De Pré-Tratamento..... 35
3.4.2 Hidrólise Enzimática..... 36
3.4.4 Fermentação..... 37
3.4.4.1 Leveduras Fermentadoras De Pentoses E Hexoses..... 38
3.4.5 Cinética..... 39
3.4.5.1 Velocidade Específica De Crescimento (μ)..... 39
3.4.5.2 Rendimento Em Massa Celular..... 39
3.4.5.3 Rendimento Do Produto..... 40
3.4.6 Biorreatores..... 40
4 METODOLOGIA..... 44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 45
6 CONCLUSÕES..... 46

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis derivados do petróleo representam 55% do consumo mundial de energia. Esses combustíveis são responsáveis pelo desenvolvimento dos transportes rápidos e eficientes e uma grande parcela da atividade industrial. Porém esses combustíveis são de origem fósseis e são de reservas finitas, além de suas reservas não estarem em toda parte do planeta, dificultando a sua distribuição entre os países. Outro ponto de destaque é que esses combustíveis são responsáveis pelo aquecimento global, pois com a sua queima são jogados na atmosfera gases responsáveis por esse efeito (BNDES, 2008).

O etanol é um combustível muito viável para substituir os combustíveis derivados do petróleo. O etanol é um combustível com grande crescimento, pois pode ser obtido a partir de diferentes biomassas, como por exemplo: amido (milho e grãos de cereais), sacarose (cana-de-açúcar, de beterraba açucareira e sorgo sacarino) e culturas celulósicas (resíduos vegetais e madeira) (BNDES, 2008).

Com o aumento da produção de veículos automotivos leves "*flex fuel*", o consumo de etanol está se intensificando e ganhando espaço no mercado, também pelo fato do etanol ser incrementado na gasolina e na produção de biodiesel, que utiliza no processo de transesterificação. Portanto esses fatores asseguram que o crescimento do etanol no cenário nacional e internacional é muito promissor (FERREIRA, 2015).

Para se produzir etanol é utilizado matérias-primas de origem renováveis e esse processo ocorre por via bioquímica, em um processo de fermentação, onde os carboidratos são transformados em álcool, carboidratos esses que são: glicose, sacarose, frutose, amido e vários outros, esse processo de obtenção de etanol é chamado de etanol de primeira geração (E1G), (FREITAS, 2017). A produção mundial é basicamente feita a partir de milho, sorgo e cana-de-açúcar, onde os dois maiores produtores de etanol são os Estados Unidos da América e o Brasil, primeiro e segundo lugar respectivamente. A produção majoritária desse combustível é feita de origem do milho e sorgo nos Estados Unidos da América e da cana-de-açúcar no Brasil.

O Brasil terá que investir em novas tecnologias para suprir a necessidade de etanol necessária, buscando novas fontes e investindo em etanol de segunda geração (E2G), segundo o BNDS (2015), a indústria de cana-de-açúcar existente pode expandir sua moagem anual até uma capacidade de 100 milhões de toneladas e seria possível adicionar até 1,5 bilhões de litros de etanol de segunda geração (E2G) no brasil até o ano de 2025 (UNCTAD, 2016). Então é

necessário e muito importante o estudo e pesquisa de novas tecnologias e culturas alternativas para ajudar e complementar a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, alternativas que possam fornecer matérias-primas adequadas, com custo e eficiência parecidos com o da cana-de-açúcar e aumentado a oferta de matéria-prima por um período maior ao ano, ou seja aumentar o período de safra.

O sorgo sacarino mostra-se uma promissora fonte para produção de etanol, pois pode ser implementado junto com a plantação de cana-de-açúcar. O sorgo sacarino apresenta boas qualidades para o processo de fermentação, pois é constituído de três grupos susceptível a fermentação do etanol, são eles: os açúcares fermentescíveis (no caule), o amido (armazenados nos grãos), e os materiais lignocelulósico (bagaço pós extração dos açúcares) (QUILHÓ, 2011).

O etanol produzido a partir de materiais lignocelulósicos, chamado de etanol segunda geração (E2G) apresenta vários desafios, pois para esse processo ocorrer é necessários a quebra de ligações químicas, que envolve pré-tratamentos físico químicos e posterior hidrólise enzimática tornando esses materiais lignocelulósicos em açúcares fermentáveis (MACHADO, 2011). Uma etapa determinante da produção de E2G é esse pré-tratamento, pois ele remove/modifica a lignina e hemicelulose, fazendo com que a hidrólise ocorra mais facilmente (LOSORDO *et al*., 2016). A etapa de pré-tratamento se torna uma das mais cara desse processo, pois temos que transformar essa matéria-prima em açúcares fermentáveis, então têm se buscado tecnologias para que esse pré-tratamento se torne mais econômico e eficiente, e que ele seja cada vez mais capaz de disponibilizar esses açúcares (pentoses e hexoses) (LOSORDO *et al*., 2016), sem falar também nos estudos que buscam microrganismos capazes de fermentar pentoses e/ou hexoses.

O grande 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).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Avaliar por meio de uma revisão bibliográfica, a viabilidade do uso da biomassa do sorgo sacarino, como uma fonte de carbono para produção de etanol segunda geração, e o seu processo de produção em biorreatores.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar as diversas fontes de produção de etanol;
- Avaliar a possibilidade do uso da biomassa do sorgo sacarino para a produção de E2G;
- Comparar a produtividade e rendimento da produção do etanol a partir da biomassa do sorgo sacarino e cana-de-açúcar.
- Abordar a cinética de um biorreator operando em semi-batelada;
- Discutir acerca dos diferentes biorreatores.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ETANOL

O etanol (C_2H_5OH) mais conhecido como álcool etílico é uma substância incolor, volátil, inflamável, com cheiro e sabor característico. Seu ponto de fusão e de ebulição é respectivamente -114,4 °C e 78,4 °C. É obtido a milhares de anos a partir da fermentação de açúcares encontrados em vegetais (cereais, beterraba, cana-de-açúcar, etc.) (BASTOS, 2009). A fermentação ocorre por microrganismos, chamados de levedura, formando etanol em baixas concentrações, onde é necessário retirar o excesso de água formado na reação, pelo processo de destilação. Ao destilar o etanol, obtemos o etanol a 96%, denominado de etanol hidratado e o etanol a 99,5% onde recebe o nome de etanol anidro. Utilizados como combustíveis ambos têm um papel importante na matriz enérgica, o hidratado é utilizado nos automóveis movido a álcool e o anidro é utilizado nos automóveis *flex* ou *flex fuel* (automóveis que utilizado ambos combustíveis, etanol, gasolina ou uma mistura dos dois) e também é utilizado na gasolina com uma proporção de aproximadamente 25% (de etanol anidro). O etanol anidro tem um custo de 8% maior que o hidratado, devido ao processo de destilação ser mais eficiente (RODRIGUES, 2010).

A produção industrial de etanol começou a desenvolver-se na Europa, em meados do século 19, no final desse século começou a produção industrial no Brasil, com os resíduos da indústria do açúcar, o melaço era utilizado, para produção do etanol, tendo em vista que o país aumentava a sua capacidade produtiva (LIMA et al., 2001). Os países europeus como a Alemanha e a França, tiveram uma grande participação significativa, para o desenvolvimento das técnicas de fermentação alcoólica, do processo de destilação e do desenvolvimento e construção de equipamentos de destilação. O mesmo sendo utilizado para várias áreas, sendo elas, as indústrias farmacêuticas, para produção de derivados químicos do etanol, bebidas e como combustível.

A produção desse combustível pode ocorrer por três vias destintas: destilatória, sintética e fermentativa. A via destilatória não tem uma grande importância no Brasil, pois é utilizada em algumas regiões de vinícolas, usada para controlar os preços de determinados tipos de vinhos; a via sintética, onde o etanol é obtido a partir de hidrocarbonetos não saturados (eteno e etino), gases de petróleo e da hulha, essa via é utilizada em países que tem grandes fontes de reservas de petróleo e indústrias de petroquímicas avançadas, tornando o processo viável, para

obtenção de etanol; e a via fermentativa, sendo a via mais utilizada para obtenção do álcool etílico no Brasil, esse processo ocorre em três fases: preparo do substrato, onde a matéria-prima passa pelo processo de tratamento, para fornecer os açúcares fermentescíveis; a fermentação, onde o princípio é a transformação dos açúcares disponíveis em etanol e dióxido de carbono; e a última é a destilação, processo no qual as impurezas são retiradas do etanol (LIMA et al., 2001).

A determinação do termo biocombustíveis se refere a combustíveis líquidos, sólidos ou gasoso, oriundo de vários tipos de biomassas. E pode ser classificado de primeira, segunda e terceira geração, de acordo com a sua origem: essa classificação de primeira geração se dá por ser um biocombustível produzido a partir de tecnologias estabelecidas e comprovadas, e nesse processo se usa matérias-primas de origem agrícola. Já o termo de segunda geração se refere ao biocombustível que são produzidos a partir de materiais lignocelulósicos que estão contidos em materiais de origem vegetal. Entretanto para a produção do etanol de segunda geração as tecnologias existentes ainda estão em processo de aperfeiçoamento e desenvolvimento (FREITAS, 2017). O biocombustível de terceira geração é desenvolvido a partir de microalgas, sendo capaz de obter diferentes tipos de combustíveis, de acordo com o processo e espécies da alga, os principais combustíveis produzidos são: etanol, biodiesel, biogás e outros subprodutos (COSTA, 2011).

3.1.1 O Etanol no Cenário Mundial

Tendo em vista, que os combustíveis de origem fósseis estão em um processo de esgotamento progressivo e sua problemática ambiental que seu uso e sua exploração acarretam, houve a necessidade de a indústria química buscar combustíveis alternativos, onde se utilize fontes renováveis de matéria-prima básica e a biotecnologia para a transformação dessa matéria (SANTOS, 2012).

Devido à alta dos preços dos combustíveis de origem fósseis e a questão ambiental, o bioetanol está se mostrando um bom substituto a esses combustíveis. Por ser de origem renovável, demostra grande características combustíveis, contribuir efetivamente para redução dos gases causadores do efeito estufa e outros gases que causam a poluição do ar, resultando em um melhoramento da saúde pública. O bioetanol é o principal biocombustível utilizado no mundo atualmente, corresponde a 10% da matriz enérgica mundial. Projeções indicam que o etanol terá uma participação de 27% na matriz enérgica em 2050 (IAE, 2009).

Os maiores produtores de etanol atualmente são os Estados Unidos da América onde produz 54,4% e o Brasil produzindo 29,6%, a obtenção desse combustível é a partir do milho nos EUA e da cana-de-açúcar no Brasil, os dois países juntos representam 84% da produção mundial desse combustível (VIDAL, 2021).

O Quadro 1 aponta a produção mundial de etanol; os países com a maior produção desse combustível e sua participação no mercado mundial, comparando os anos bases de 2016, 2017, 2018 e 2019 (RFA, 2021).

Quadro 1: Produção mundial de etanol (milhões de litros).

Países	2016	2017	2018	2019	%
EUA	58.344,5	60.324,3	60.911,0	59.726,2	54,4
Brasil	25.551,5	25.173,0	30.245,4	32.516,7	29,6
União Europeia	5.148,2	5.375,3	5.488,8	5.186,0	4,7
China	2.536,2	3.028,3	2.914,8	3.785,4	3,4
Índia	1.059,9	757,1	1.627,7	1.930,6	1,8
Canadá	1.741,3	1.741,3	1.741,3	1.968,4	1,8
Tailândia	1.287,0	1.476,3	1.476,3	1.627,7	1,5
Argentina	908,5	1.097,8	1.097,8	1.059,9	1,0
Selecionados	96.577,1	98.973,4	105.503,1	107.800,9	98,2
Outros	1.843,5	1.718,6	2.002,5	2.976,0	2,7
Mundo	98.420,7	100.691,9	107.505,6	109.776,9	100,0

Fonte: RFA - Renewable Fuels Association (2021).

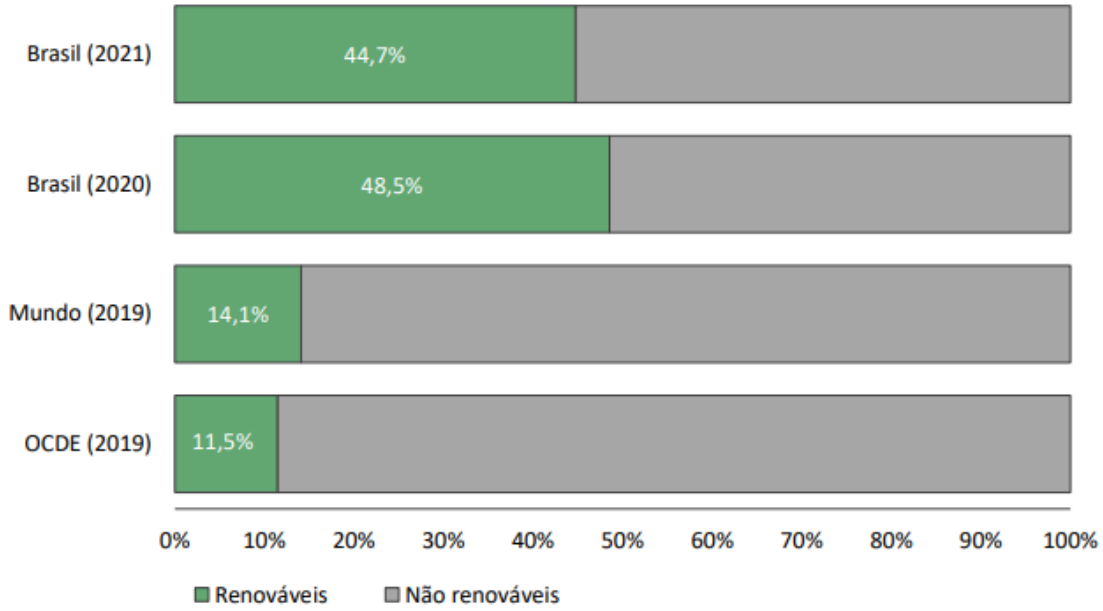
3.1.2 O Etanol No Cenário Nacional

Na década de 70, ocorreu a crise internacional do petróleo, levando o Brasil a uma nova era da produção de etanol. Com o lançamento do Programa do Álcool pelo governo do Brasil em 1975, denominado de PROALCOOL, começou o processo de substituição da gasolina pelo etanol no país. Ao utilizar o etanol como um combustível alternativo, houve a necessidade da modernização e ampliação da indústria no país, onde foi promovido a ampliação da plantação canavieira, ampliação e modernização das destilarias. (LIMA et al., 2001).

Atualmente o Brasil utiliza 44,7% de energia de matriz renovável (Gráfico 1), sendo uma das maiores proporções mundiais, contrastando com a média mundial que é 14,1%, e essa diferença fica maior comparado com os países que compõem a Organização de Cooperação e

de Desenvolvimento Econômicos (OCDE) que sua média é de 11,5%, sendo que a maioria dos países que o compõem são classificados como desenvolvidos (EPE, 2022).

Gráfico 1: Participação de renováveis na matriz energética.



Fonte: EPE (2022).

A produção nacional na safra de 2021/2022 de etanol foi de 27,53 bilhões de litros, somando a produção a partir da cana-de-açúcar e do milho. A produção do etanol a partir do milho vem crescendo no país, devido a grande produção desse grão na região centro oeste do país, a estimativa é que na safra de 2022/2023 tenha uma produção de 4,5 bilhões de litros de etanol (UDOP, 2022). Porém a produção nacional é feita majoritariamente da cana-de-açúcar, tornando o país o maior produtor de etanol dessa matéria-prima. O Quadro 2 apresenta a produção de cana-de-açúcar e etanol no Brasil, em períodos de safra entre 2015 e 2020.

Quadro 2: Produção de Cana-de-açúcar e Etanol (em unidade de mil toneladas).

Período	**2015/2016**	**2017/2018**	**2019/2020**
Produção e moagem de cana-de-açúcar	666.824	641.201	642.677
Produção de Etanol	30.232	27.865	35.595

Fonte: Moura (2021).

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL

Para se produzir etanol de forma renovável, é possível utilizar qualquer produto que contenha açúcar ou outro carboidrato, porém para se produzir etanol viavelmente, essa matéria-prima precisa ter alguns requisitos sendo eles: ser produzido em grandes volumes, ter um ótimo rendimento industrial e custo de produção aceitável (LIMA et al., 2001).

As duas matérias-primas mais utilizadas para produção de etanol no Brasil é a cana-de-açúcar e o milho. A cana-de-açúcar tem uma área de plantação maior que a do milho, produzindo em torno de sete mil litros de etanol por hectare, e o milho produzindo quatro mil litros por hectare. Tornando o etanol a partir da cana-de-açúcar mais vantajoso e competitivo. Porém a cana-de-açúcar só é processada em períodos de safras, pois não pode ser estocada, e processada ao longo dos meses; e o milho tem essa facilidade, pois pode ser estocado e processado ao longo dos meses, no período de entre safra (BASTOS,2007).

As matérias-primas utilizadas para produção de etanol podem ser divididas em três grupos, de acordo com a sua composição molecular (ECKERT, 2016):

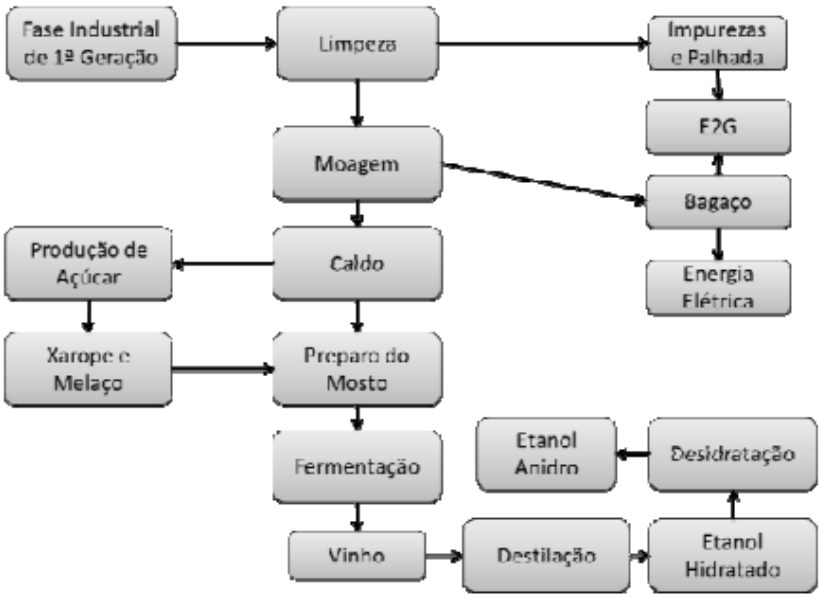
- Matérias-primas sacaríneas: compostas por açúcares (carboidratos com sabor adocicado). São a fonte de carbono do etanol de primeira geração.
- Matérias-primas amiláceas: são compostas por amido e celulose. Sua origem são os grãos de cerais, raízes e tubérculos.
- Matérias-primas lignocelulósicas: são constituídas por celulose, hemicelulose e lignina (FREITAS, 2017). Dão origem ao etanol de segunda geração.

3.2.1 Etanol De Primeira Geração (E1G)

O etanol proveniente da sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar é denominado de Etanol de Primeira Geração (E1G) (ABARCA, 2005). O processo de fabricação de etanol (Figura 1), se inicia com a lavagem da cana-de-açúcar, logo em seguida é triturada e levada para moagem. Depois da moagem é obtido o caldo, sendo o mesmo tratado para se produzir etanol e açúcar. Esse tratamento é por diferentes processos, tendo em vista o produto final. O caldo passa pelo processo de clarificação, processo esse que consiste em adicionar dióxido de carbono (CO_2), ao caldo-de-cana junto com hidróxido de sódio ($Ca(OH)_2$), formando o complexo carbonato de cálcio, o qual adsorve impurezas e as precipitam, tornando o caldo mais claro e mais puro. Para se produzir o açúcar é necessário concentrar esse caldo por vaporização, formando um xarope concentrado em glicose. Logo em seguida, para se atingir o nível de brix

desejável para fermentação é necessário adicionar parte desse xarope ao mosto. A próxima etapa é a fermentação, onde microrganismos irão transformar os açucares presentes em etanol, formando o etanol hidratado. Caso o produto desejado seja o etanol anidro, é necessário mais uma etapa, que é o processo de desidratação (SENNA E ANSANELLI, 2016).

Figura 1: Fase industrial do E1G.



Fonte: ALBARELLI (2013).

O etanol obtido a partir da cana-de-açúcar (E1G), tem várias vantagens, dentre elas (BNDES, 2008):

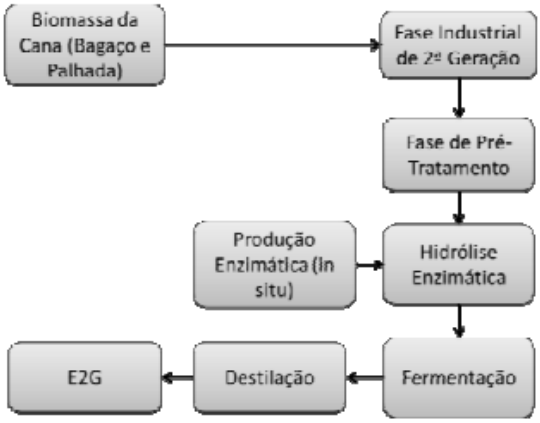
- O seu processo produtivo possibilita a redução de gases em quase 90%, sendo esses gases os principais causadores do efeito estufa;
- Tem redução de impactos ambientais, proveniente do seu processo de plantação, ter menos impacto nos recursos hídricos e no solo, em comparação a outras culturas utilizadas na produção de etanol;
- Competindo diretamente com os combustíveis derivados do petróleo.

3.2.2 Etanol De Segunda Geração (E2G)

A produção de etanol segunda geração é proveniente de fontes lignocelulósicas, fontes essas que são resíduos agrícolas e naturais, como o bagaço e palha da cana-de-açúcar, sabugo e palha do milho, etc. São necessários alguns passos para se obter o etanol de segunda geração,

sendo elas o pré-tratamento desses resíduos, onde é feito a partir de ácido diluído, explosão a vapor ou hidrogênio alcalino. Logo em seguida se obtém o produto sólido da fase de pré-tratamento, a próxima etapa é passar pelo processo enzimático ou ácida, onde os componentes (hemicelulose, celulose e pectina) do resíduo lignocelulósicos vão ser quebrados em açúcares fermentescíveis, logo em seguida pelo processo de fermentação e destilação, formando o produto final (SENNA E ANSANELLI, 2016).

Figura 2: fase industrial do E2G.



Fonte: Costa (2014).

O etanol proveniente de materiais lignocelulósicos (E2G), tem vários benefícios, dentre eles (BRASSOLATTI, 2016):

- É mais sustentável, pois tem um aproveitamento melhor da matéria-prima, tendo em vista que esses resíduos não seriam mais utilizados;
- Necessita de quantidades menores de combustíveis fósseis para seu processo de produção; etc.

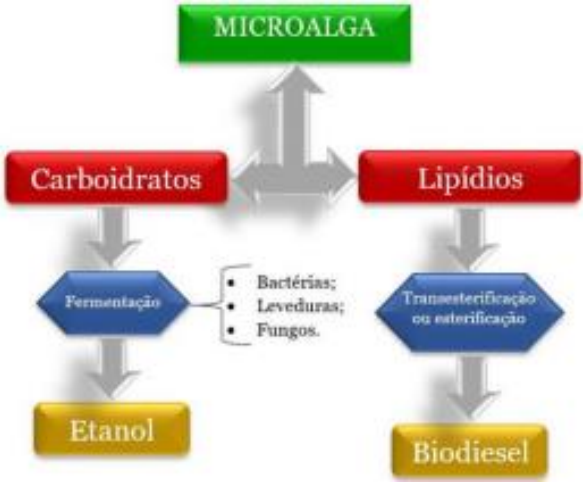
3.2.3 Etanol De Terceira Geração (E3G)

Atualmente a produção de etanol a partir de microalgas tem ganhado bastante importância, no cenário mundial (LEARY, 2009). As algas tem capacidade de produzir vários combustíveis, tudo depende do processo e da espécie utilizada, possibilitando a produção de etanol, biodiesel, biogás e outros subprodutos. O fator mais importante para a determinação do

produto final é a espécie e suas características da alga e seus principais produtos gerados no processo (COSTA, 2011).

Os combustíveis de terceira geração, tem um fator muito importante, pois tem um elevado teor de hidrogênio, devido as proteínas e clorofilas das algas. Essa característica lhe acrescenta um maior poder calorífico, baixa densidade e viscosidade, o tornando mais promissor do que os biocombustíveis de primeira geração (MIAO, 2011). A figura 3 mostra um esquema da produção dos principais biocombustíveis produzidos a partir de microalgas.

Figura 3: Produção dos principais biocombustíveis a partir das microalgas



Fonte: Kose (2016).

3.2.4 Sorgo

3.2.4.1 Aspectos Gerais da Cultura do Sorgo

O sorgo é uma planta da família *Poacea*, do gênero *Sorghum*, e é da espécie *Sorghum bicolor L*. É uma planta de origem africana, mais especificamente da região onde estão os países Etiópia e Sudão. Onde foi difundida inicialmente no continente Africano, posteriormente na Ásia e atualmente nas Américas (FREITAS, 2017).

O sorgo é um dos cereais mais cultivado no mundo, ficando na quinta posição mundial, sendo a base alimentar de mais de 500 milhões de pessoas que vivem em mais de 30 países. O grão sorgo é muito utilizado na alimentação humana, principalmente nos países africanos e asiáticos, já no ocidente ele é mais empregado na alimentação de animais e na elaboração de xarope, álcool e açúcar (SOUZA, 2011).

Possui o metabolismo C4, ou seja, de dias curtos que tem altas taxas de fotossíntese e tem uma demanda de temperatura superior a 21°C, para que a planta tenha um ótimo crescimento e desenvolvimento (MURRAY et. Al., 2008; MAGALHÃES et. Al., 2010).

Caracterizada por ter um tempo de ciclo fenológico curto (de 90 a 120 dias) ou seja alcança a fase de maturidade fisiologia em um período de 4 meses aproximadamente, e tem um poder de produzir açucares próximos com o da cana-de-açúcar e em um período de tempo menor (FONTES et al., 2011).

Esta cultura é muito adaptada a climas tropicais e em regiões onde a precipitação é de 375 a 625 mm de acordo com Borém e Parella (2014). Na sua estrutura radicular as raízes apresentam sílica na endoderme, e tem grandes quantidades de pelos absorventes, dando a cultura uma maior tolerância a seca do que as outras plantas cultivadas (DINIZ, 2010).

Atualmente a classificação do sorgo é em cinco genótipos: o granífero, forrageiro, sacarino, biomassa e o vassoura. Dentre esses, o granífero é o mais explorado economicamente (FREITAS, 2017). O quadro 1 apresenta as características, produto e utilização dos 5 tipos se sorgo explorado atualmente economicamente.

Quadro 3. Características agronômicas dos 5 tipos de sorgo.

Tipos de Sorgo	Características	Produto	Utilização
Granífero	Porte baixo (híbridos e variedades), adaptado à colheita mecânica.	Grão	Substituto do milho na ração animal (bovinos, suínos e aves), utilização do restolho. Alimentação humana (farinha).Industrialização de produtos: amido, cera, cerveja, óleo,etc.
Sacarino	Porte alto (híbridos e variedades). acumulam sacarose no colmo	Colmo e grão	Utilizado na produção de xaropes que substitui o açúcar como adoçante na Indústria; Produção de etanol e alimentação animal.
Forrageiro	Variedades de capim sudão ou híbridos inter específicos de *Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanense*.	Biomassa	Apropriado para confecção de silagem, pastejo, corte verde, fenação e cobertura morta
Vassoura	Possui panículas com fibras longas	Panícula	Uso restrito: Vassouras, escovas e ornamentação.
Energia	Porte alto (até seis metros) rápido crescimento e alto potencial produtivo.	Biomassa (alto teor de fibra)	Cogeração de energia

Fonte: FREITAS (2017).

3.2.4.2 Sorgo Sacarino

O sorgo sacarino (Figura 4) é utilizado como uma cultura energética, por apresentar bom potencial e atrativas como matéria-prima, essa cultura é constituída de três grupos de matérias susceptíveis para o processo fermentativo do etanol, sendo eles os açúcares (no caule), o amido (nos grãos) e o material lignocelulósicos (no bagaço) (QUILHÓ, 2011).

Figura 4: Plantação de sorgo sacarino.

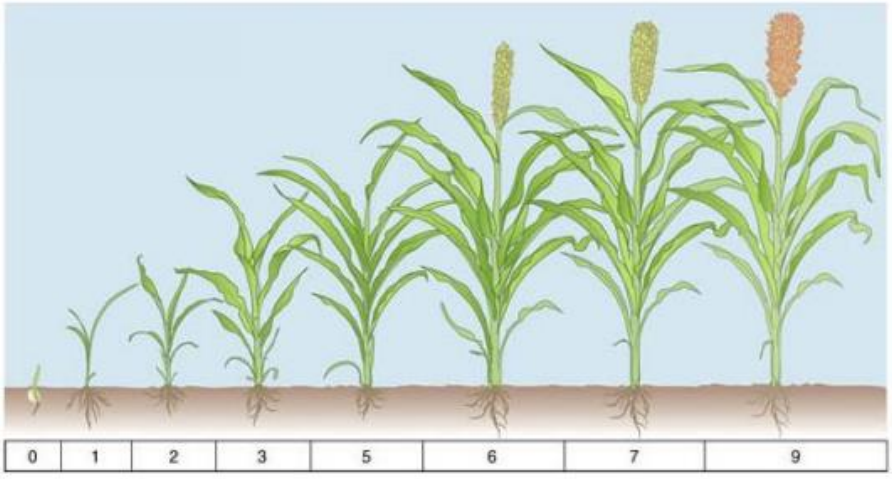
Fonte: https://ruralpecuaria.com.br/painel/img/noticias/5218/noticias_1469650217.jpg

O sorgo sacarino tem uma grande vantagem, comparando com as outras culturas para produção do etanol, pois tem características bem rústicas, sendo capaz de suportar ambientes de estresse abióticos (todas as influências que os seres vivos possam receber em um ecossistema, derivadas de aspectos físicos, químicos ou físico-químicos do meio ambiente), tais como temperatura do ar e humidade do solo (URIBE et al., 2014). O sorgo sacarino, apresenta uma característica muito relevante, pois suporta passar por períodos de estiagem no ciclo de crescimento, e seu plantio não necessita de um solo específico, podendo ser plantado em diversos tipos de solo. Sendo produtivo em regiões onde outras culturas não se desenvolvem muito bem, como por exemplo: em regiões mais secas, como semiáridas e áridas. Sendo capaz de ser plantadas em todas regiões do Brasil, inclusive em áreas não férteis, sem concorrer com a cana-de-açúcar, tendo em vista que seu ciclo é menor, possibilitando ser colhida nas entre safras da cana-de-açúcar (MAY et al., 2013).

No Brasil a produção de sorgo sacarino vem se tornando destaque atualmente, pois é muito semelhante com a cultura da cana-de-açúcar, tanto na fisiologia e nas características tecnológicas (FREITA, 2017). Mesma a produção do sorgo sacarino sendo menor que a da cana-de-açúcar por hectare, o seu custo de produção é 1/3 menor que o da cana-de-açúcar (NASCIMENTO, 2012).

A fenologia do sorgo sacarino está dividida em três fases, sendo elas: fase 1, vegetativa, que se inicia na germinação e vai até a iniciação da panícula; fase 2, reprodutiva, desde o surgimento da panícula até o florescimento e a fase 3, maturação, fase na qual ocorre a floração e maturação fisiológica dos grãos (FERREIRA, 2015).

Figura 5: Fenologia da cultura do Sorgo sacarino- Estágios de crescimento da fase de emergência até a fase de maturação.



Fonte: SOUZA (2014).

3.2.4.3 Sorgo Sacarino X Cana-de-Açúcar

O sorgo sacarino apresenta pontos importantes, para sua implementação industrial e agronômicas. Destaca-se a flexibilidade do plantio, pois é por meio de sementes, sendo plantadas em qualquer época do ano e em conjunto com outras plantações, e ainda se desenvolvendo em áreas onde a cana-de-açúcar não tem boa adaptação (FERREIRA, 2015).

A cultura do sorgo tem uma demanda menor de água, comparada com a da cana-de-açúcar, essa diferença chega a 1/3 da água utilizada, tem um ciclo vegetativo quatro vezes menor, possibilitando mais colheitas durante um ano, podendo chegar a duas ou três safra por ano, de acordo com a região e a irrigação (REDDY et al., 2005; FERREIRA, 2015).

O sorgo sacarino tem uma fenologia bem característica, possibilitando a produção de etanol durante a entressafra da cana-de-açúcar. Consequentemente temos o aumento do tempo de moagem das usinas, assim reduz o tempo em que as destilarias passam paradas, que atualmente é entre três a cinco, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 4: Períodos de plantio e colheita para o sorgo sacarino e a cana-de-açúcar no Brasil.

PLANEJAMNETO INDUTRIAL												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Sorgo												
Plantio												
Colheita												
Cana-de-açúcar												
Plantio												
colheita												

Colheta
Plantio
Plantio por rebrota

Fonte: SCHAFFERT (2010).

Ao utilizar-se enzimas (α-amilase e β- amiloglucosidase), para tratar o caldo do sorgo sacarino, tem-se a possibilidade de combinar os grãos para a produção do etanol, tornando a produção mais vantajosa, e dando mais flexibilidade ao período de safra (FERREIRA, 2015).

O sorgo sacarino apresenta vários aspectos positivos, dentre eles, apresenta valores de Açúcares Redutores Totais (ART), bem próximo ao da cana-de-açúcar, tendo uma eficiência fermentativa na ordem dos 90% (FERREIRA, 2015). O Quadro 3, faz um comparativo das duas matérias-primas para produção de etanol.

Quadro 5. Comparação das características industriais e tecnológicas do caldo, colmo e bagaço entre a cultura de sorgo sacarino e cana-de-açúcar.

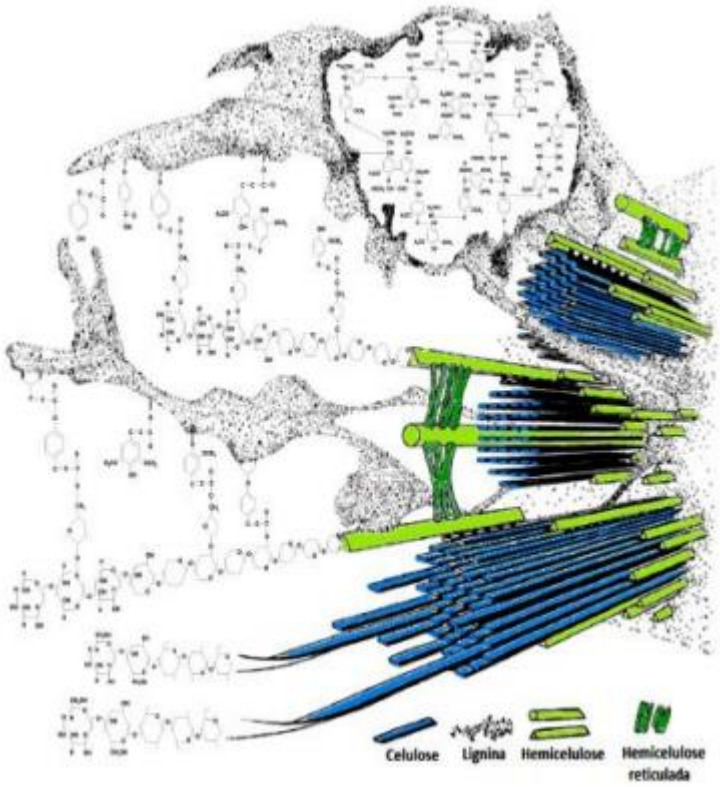
Sorgo sacarino X Cana-de-açúcar		
	Sorgo sacarino	**Cana-de-açúcar**
Planejamento industrial		
Ciclo Fenológico	Ciclo rápido (4 meses)	Ciclo rápido (12 a 18 meses)
Plantio	Mecanizável, por sementes.	Plantio mecanizável, por mudas.
Tratos culturais e colheita	Mecanizável	Mecanizável
Produção de grãos	Produção de grãos (2 a 5 $t.ha^{-1}$)	Não produz grãos
Análise do caldo		
Quantidade ($Kg.t^{-1}$ de colmo)	370 – 660	600 - 800
Brix (%)	15,0 – 21,0	18,0 – 21,0
Sacarose (%)	8,0 – 17,5	15,0 – 18,0
ART (%)	13,0 – 20,0	16,0 – 19,0
Pureza (%)	55 – 80	80 – 90
Relação Sacarose/Açúcares redutores	1,0 – 8,5	15,0 – 18,0
Análise de colmo		
Sacarose (%)	4,0 – 13,0	12,0 – 16,0
ART (%)	11,5 – 16,5	13,0 – 17,0
Fibra (%)	10,0 – 19,0	9,0 – 13,0
Composição do Bagaço		
Lignina (%)	11,90	20,50
Pentosanas (%)	26,90	26,35
Celulose (%)	46,57	47,70

Fonte: FERREIRA (2015).

3.3 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICAS

A biomassa lignocelulósicas apresenta uma das maiores e subutilizadas fonte de carbono no mundo. Esse material é decorrente da agricultura, florestas, resíduos do reflorestamento e processamento de frutas e vegetais. Os materiais são caracterizados por ser fibrosos, ter uma estrutura vegetal bem complexa, são compostos de três componentes básicos: celulose, hemicelulose e lignina (CANETTIERI, 2004). A Figura 6 apresenta um modelo estrutural macromolecular dos principais constituintes dos materiais lignocelulósicos.

Figura 6. Modelo da estrutura molecular dos principais constituintes do material lignocelulósico (parede secundária).



Fonte: Bidlack et al. (1992) e apud Rabelo (2010).

Portanto esses materiais apresentam uma complexa estrutura morfológica, tornando a conversão desse tipo de biomassa em biocombustíveis e outros produtos de interesse difíceis (BARCELOS, 2012). Segundo dados obtidos por Rodrigues (2007), esses materiais são ricos em energias renováveis, sua composição é muito relativa dependendo da espécie, mas em média têm se 40% de celulose, 15-26% de hemicelulose e 22-30% de lignina por base seca (FENGEL; WEGENER, 1989). A Tabela 3 apresenta a composição química dos materiais lignocelulósicos, sendo estes os principais resíduos utilizados na produção de etanol segunda geração**.**

Quadro 6. Composição química de alguns materiais lignocelulósicos.

Material Lignocelulósico	Componentes (%)			
	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Cinzas
Bagaço de Cana	33-36	28-30	18-20	2-5
Palha de Cana	32-36	19-21	16-18	-
Palha de Arroz	32-37	19-24	9-13	12-18
Palha de Trigo	30-33	22-28	14-18	3-7
Palha de Sorgo	34-36	45-48	25-26	-
Sabugo de Milho	34-36	16-24	15-19	-
Papel	43	13	6	-
Madeira	50	20	10	5

Fonte: Correia (2011).

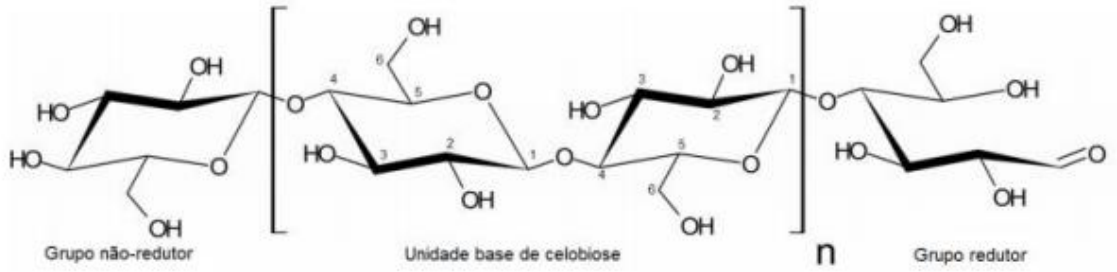
3.3.1 Celulose

A celulose $(C_6H_{10}O_5)_n$ é um carboidrato presente em vários materiais naturais, sendo o carboidrato natural mais abundante na terra, sendo obtido de fontes renováveis, com uma produção anual de mais de 50 milhões de toneladas (SILVA et al., 2009).

A celulose apresenta uma constituição química de várias unidades de glicose ligadas entre si, ligadas por ligação β1-4, ideal para processos fermentativos. Os vegetais apresentam algumas características, como a rigidez e sustentabilidade estrutural das paredes celulares, sendo oriundas das interações entre os polissacarídeos da celulose, reforçados dentro de uma cadeia de hemicelulose e pectinas. A celulose tem uma essa função importante que é de sustentação estrutural, onde só se faz possível, devido a sua extrema insolubilidade em água, em condições normais (FREITA, 2017).

A rotação em 180° do plano das unidades de glicose é resultado das ligações β, essas ligações glicosídicas são do 1-4 (pois ocorre nos carbonos 1 e 4). As unidades de anéis glicosídicos invertidos entre si, resultando em um ângulo de 180° em relação a um mesmo plano, formam uma unidade de glicose denominada de celobiose (Figura 7) (KLEMM et al., 2005).

Figura 7: Estrutura molecular do polímero natural celulose e da sua unidade monomérica celobiose.



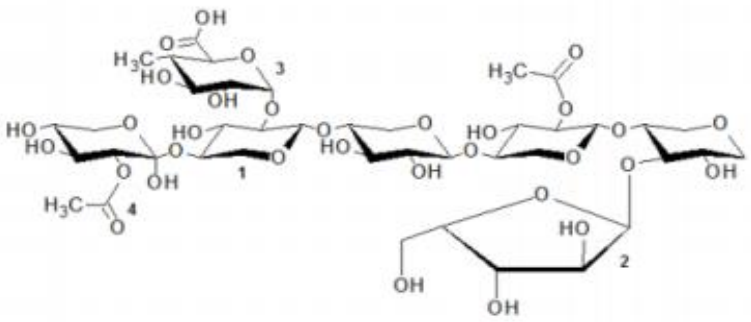
Fonte: KLEMM et al., (2005).

3.3.2 Hemicelulose

A hemicelulose constitui todas as paredes celular vegetal, mas concentra-se, principalmente, nas camadas primárias e secundárias, onde está associada fortemente com a celulose e lignina (RABELO, 2010). Aproximadamente a hemicelulose está presente em 30% da parede celular das plantas, portanto, sendo este, um dos carboidratos mais abundante da natureza (FREITA, 2017).

As hemiceluloses são polissacarídeos que apresentam cadeia linear ou ramificada. Apresentam algumas características como: molécula amorfa, baixo peso molecular, e junto com a celulose, lignina, pectina e proteínas que formam a parede celular das plantas (MARTINS, 2005). Está presente na estrutura vegetal de forma intercalada, nas microfibras de celulose, e em um estagio anterior a lignificação, dando ao material a característica de elasticidade e flexibilidade ao agregado de microfibra, e impossibilitando que as mesmas se toquem (FREITA, 2017). A estrutura da hemicelulose (Figura 8), pode consistir de uma só unidade (homopolímero), como a xilana, ou duas ou mais (heteropolímero) como a glucomanana unidas entre si por ligações de hidrogênio (FREITA, 2017).

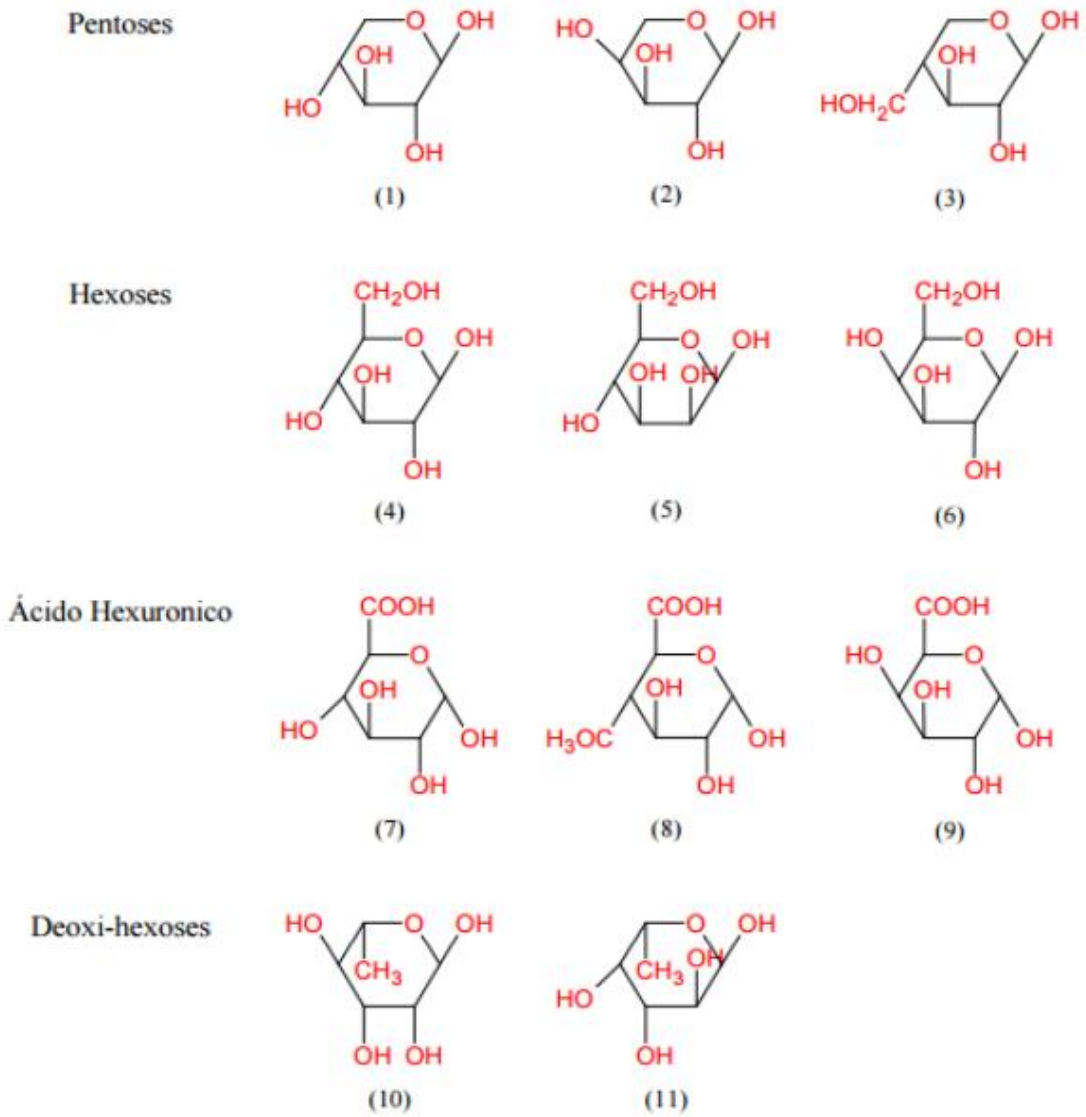
Figura 8: Estrutura de uma hemicelulose.



Fonte: Adaptado Brienzo (2010).

Hemicelulose pode possuir muitas ramificações, sendo constituída por vários e diferentes carboidratos, são eles: as hexoses (D-glicose, D-galactose e D-manose), e as pentoses (D-xilose e L-arabinose) e ácidos urônicos (D-glucurônico, D-galacturônico e metilgalacturônico). Alguns desse açúcares são mostrados na Figura 9.

Figura 9: Representações de unidade de polissacarídeos presentes na hemicelulose: (1) β-D-Xilose, (2) α-L-Arabinopyranose, (3) α-L-Arabinofuranose, (4) β-D-Glicose, (5) β-D-Manose, (6) α-D-Galactose, (7) β-D-Ácido Glucurônico, (8) α-D4-0-Ácido metilglucurônico, (9) α-D-Ácido galactose, (10) α-L-Ramnose e (11) α-LFucose.



Fonte: FREITA (2017).

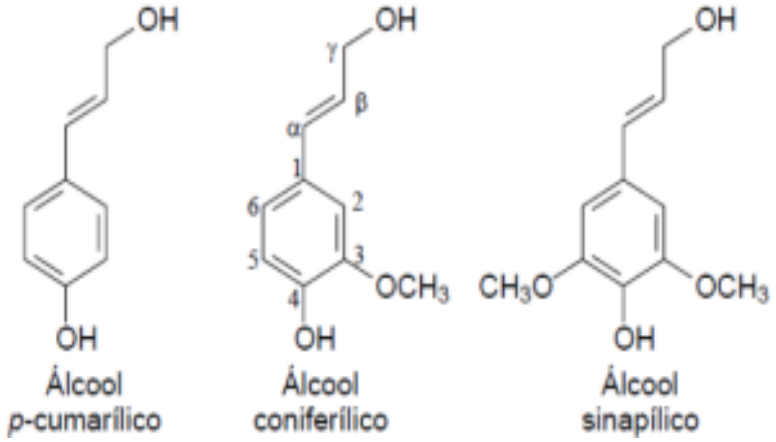
A hidrólise da hemicelulose é menos difícil quando vamos comparar com a da celulose. Portanto quando comparamos a fermentação da pentose, oriunda da hemicelulose e a

fermentação da hexose oriunda da celulose, vemos que a fermentação da pentose é menos desenvolvida (BNDES, 2008).

3.3.3 Lignina

A lignina é uma molécula grande ou macromolécula tridimensional, ela é formada basicamente por unidade de fenilpropano e na sua estrutura apresenta configurações polifenólica complexa, onde não são conhecidas e que não é possível de ser convertida em açúcares fermentáveis (FENGEL; WEGENER, 1989). Ela é responsável pela estrutura e rigidez à parede celular, conferindo assim uma resistência maior a ataques biológicos do que os polímeros citados anteriormente, que fazem parte da biomassa lignocelulósica (GHAFFAR; FAN.,2013 apud SIQUEIRA, 2015). A sua hidrólise é dita como o caminho com maior potencial de adicionar ou aumentar a produção de etanol atualmente, pois ela garantiria esse incremento sem aumentar ou expandir as terras agrícolas, e também seria capaz de aprimorar a eficiência da conversão primária da cana-de-açúcar (BNDES, 2008).

Figura 10: Principais percursores da lignina.



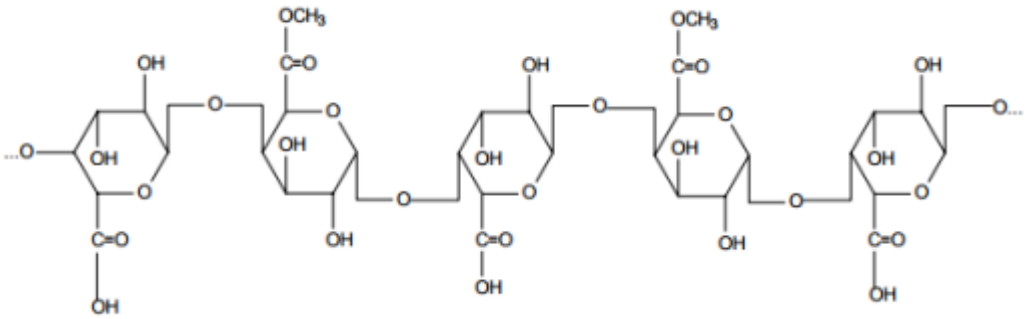
Fonte: Lino (2015).

3.3.4 Pectina

As pectinas são uma família de polissacarídeos, a sua constituição é de basicamente ácido poligalacturônico, e também é constituído em menor quantidade de ramnose, arabinose e galactose (BRETT e WALDRON, 1996). A sua constituição química é formada por um esqueleto de ácido poligalacturônico unidos por ligação α (1-4), (Figura 11).

A pectina constitui o componente principal da lamela média da parede vegetal. Dos constituintes da parede celular, as frações mais extraíveis são a pectina, apresenta uma característica de gel. O ácido poligalacturônico é uma molécula carregada negativamente, dando a parede vegetal a propriedade de trocadora de íons, como o cálcio (RABELO, 2010).

Figura 11: Estrutura geral da pectina.



Fonte: FREITA (2017).

3.4 PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS

Para se produzir etanol a partir de materiais lignocelulósicos são necessárias quatro etapas, com possibilidades distintas e várias combinações, sendo elas: produção de enzimas, pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação (SUN e CHENG, 2002).

3.4.1 Produção De Enzimas

As enzimas são substâncias orgânicas, compostas por polímeros de aminoácidos, que efetua processos metabólicos nas células vivas. Seu papel é acelerar as reações químicas que ocorrem dentro das células vivas, sem sofrer alteração geral dos agentes que estão envolvidos (ROSAS, 2003).

A função das enzimas é de biocatalisar a estrutura protéica globular terciária ou quaternária, termolábeis e não dialisáveis, fazendo com que a velocidade da reação aumente, assim, reduzindo a barreira energética necessária da reação s (HARGER, 1982 apud FREITA, 2017).

A sua classificação é de acordo com os substratos com que reagem e pela sua especificidade de reação (LAIDLER, 1954, apud FREITA, 2017), a sua origem pode ser: de origem fúngica ou bacteriana, animais superiores (enzimas pancreáticas, pepsina, catalase,

renina) por microrganismos (por exemplo, as amilases, proteases, pectinases, invertases, glicose-oxidases, celulases, fitases e glicose-isomerases) ou vegetais superiores (papaína do mamão, bromelina do abacaxi e ficina do figo) (HARGER, 1982 apud FREITA, 2017). As microbrianas podem ser intracelulares (enzimas retidas no interior das células microbianas) ou extracelulares (enzimas eliminadas ao meio). Em geral, as mais utilizadas nas indústrias são as enzimas extracelulares de origem microbiana.

Para se produzir enzimas a partir de microrganismos celulíticos, há um custo no processo global de 50% para a obtenção de açúcares mediante a hidrólise enzimática (WYMAN, 2001). Mesmo com o processo de fabricação de enzimas ter tido uma redução de preço no processo nesses últimos 20 anos, elas ainda representam um importante papel no preço final do etanol (RABELO, 2010).

3.4.2 Pré-Tratamento

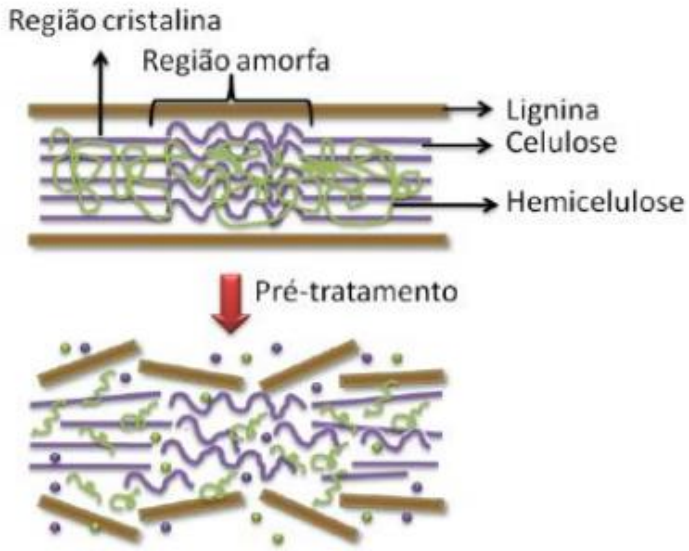
Para se produzir etanol a partir de materiais lignocelulósicos, tem-se a necessidade de transformar a celulose e hemicelulose em monômeros de glicose e xilose, respectivamente, além do processo de conversão por microrganismos desses açúcares em etanol. Portanto, a celulose encontrada na natureza, encontra-se muito protegida pela matriz lignina-carboidrato, isso faz com que a celulose não dê bom resultados no processo de hidrólise, resultando em um processo de conversão lento (RABELO, 2010). Sendo assim, tem-se a necessidade de processos de pré-tratamentos no bagaço, para aumentar a exposição das fibras da celulose, tornando-a mais acessíveis aos processos hidrolíticos enzimáticos ou ácidos (FREITA, 2017).

O pré-tratamento é uma etapa muito importante do processo de produção de etanol segunda geração, pois, tem um custo significante para o processo, além de influenciar o custo de processo anteriores e posteriores (RABELO, 2010).

O processo de pré-tratamento vai remover basicamente a lignina e hemicelulose da biomassa (Figura 12), para que possa reduzir a cristalinidade da biomassa, fazendo com que a celulose fique mais exposta a ação das enzimas, para aumentar a conversão dos polissacarídeos em açúcares fermentescíveis (MOSIER et al., 2005). Além disso, este processo tem outras finalidades como: garantir a formação de açúcares diretamente ou na segunda etapa, evitar que os açúcares formados se percam e/ou se degradem, evitar que coprodutos indesejáveis se formem, e reduzir a demanda de energia e minimizar os custos da produção (SUN e CHENG, 2002; AGBOR et al., 2011).

Os principais objetivos do pré-tratamento são: reduzir o grau de cristalinidade da celulose, dissociar o complexo lignina-celulose, aumentar a área superficial da biomassa, preservar as pentoses maximizando os rendimentos em açúcares e evitar ou minimizar a formação de compostos inibidores do processo tanto na etapa de hidrólise quando na etapa de fermentação (HSU, 1996 apud RABELO, 2010).

Figura 12: Pré-tratamento em materiais lignocelulósicos.



Fonte: Adaptado de MOSIER et al., (2005) apud FREITA (2010).

3.4.2.1 Tipos De Pré-Tratamento

Existem vários tipos de pré-tratamento, cada um utilizado para situações específicas, com diferentes tipos de efeito e rendimentos, e a escolha do pré-tratamento depende do tipo de biomassa empregado. São classificados em: físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, ainda há a possibilidade de usar eles juntos (MOOD *et al*., 2013 *apud* FREITA 2010).

Os tipos de pré-tratamentos agem de forma diferente na estrutura de cada biomassa. Os pré-tratamento físicos como a moagem e a extrusão não alteram a composição química da biomassa, mas alteram a estrutura física da biomassa, aumentando a área superficial e reduzindo a cristalinidade. Os pré-tratamentos alcalinos, oxidativos e biológicos, podem remover principalmente a fração da lignina, tornando essa biomassa majoritariamente rica em hemicelulose e celulose no final do processo. E por fim, os pré-tratamentos ácidos, explosão a vapor e hidrotérmico removem as hemiceluloses para a corrente líquida, e por fim sobra uma corrente sólida, rica em celulose e lignina, também chamada de celulignina (MORO, 2015).

Nota-se, que o pré-tratamento escolhido no processo define a composição da biomassa que será levado para a hidrólise enzimática, sendo o processo posterior (SILVA et al., 2013).

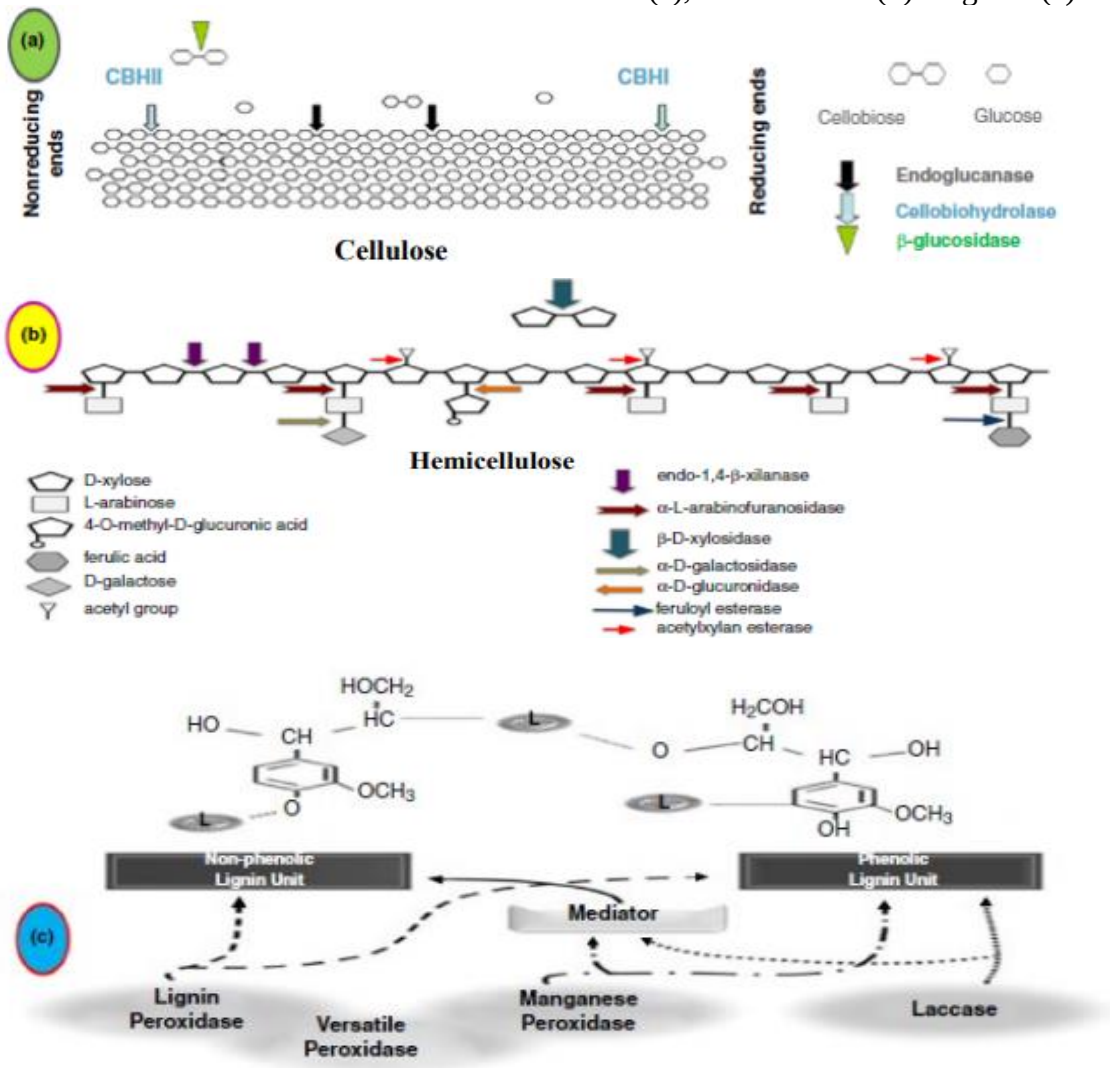
A eficiência desse processo é avaliada tanto na questão físico-química da biomassa, quanto na próxima etapa que é a hidrólise enzimática. Pra um pré-tratamento ser considerado bom, tem que ter alguns requisitos, como: proporcionar altos rendimentos e conversões de hidrólise, não gerar inibidores no processo de fermentação, ter baixo custo, não apresentar perda de carboidratos ou degradação da biomassa, onde possibilita a recuperação da lignina e ter um baixo consumo de energia (SILVA *et al*., 2013).

3.4.3 Hidrólise Enzimática

O processo de hidrólise é onde a biomassa tem suas cadeias de carboidratos convertida em açucares fermentescíveis. Onde as macromoléculas são convertidas em açúcares menores, a hemicelulose é convertida em pentoses, onde tem a predominância da xilose, e a celulose é convertida em glicose (CHEN et al., 2011). A reação utiliza o auxilio de um catalisador ácido ou enzimático.

Na hidrólise enzimática é utilizado microrganismo, sendo eles responsáveis por secretar as enzimas durante o seu crescimento no meio da cultura, ou enzimas que são comercialmente disponíveis, enzimas essas que são muito utilizadas. As enzimas que são mais utilizadas comercialmente para hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicas são as celulases, hemicelulases (xilanase) e ligninases (ZABED et al., 2016).

Figura 13: Enzimas envolvidas na hidrólise da celulose (a), hemicelulose (b) e lignina (c).

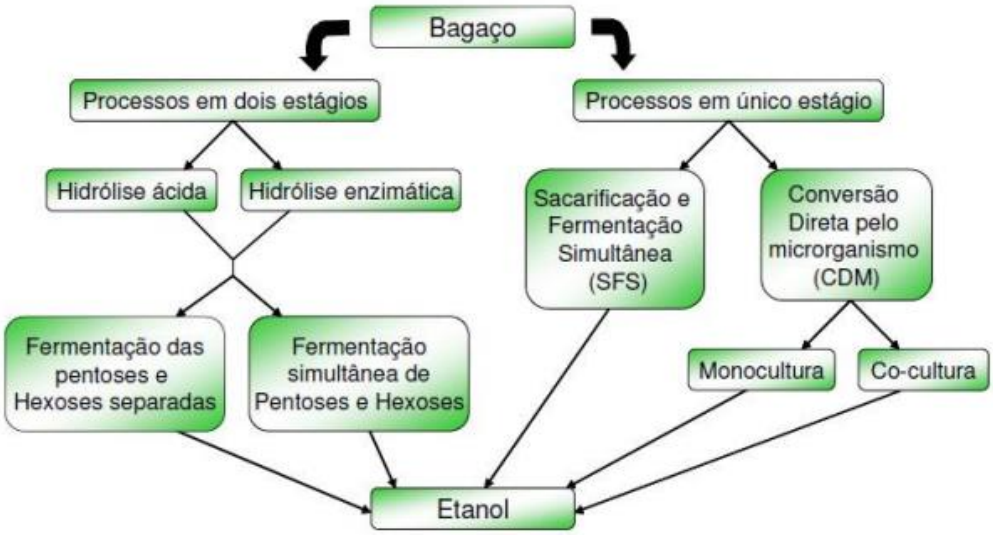


Fonte: adaptado de Taha et al., (2016).

3.4.4 Fermentação

A fermentação alcoólica (catabolismo anaeróbico), é um processo bioquímico, no qual os açúcares presentes no substrato são convertidos em álcool etílico, CO_2 e outros subprodutos da reação, ocorrendo através de ação de microrganismo ou enzimas (Ascendino, Bosch Neto e Torres, 2018; GOMEZ, 2011). Para que se ocorra a fermentação da biomassa, é necessário que ocorra a despolimerização da celulose e hemicelulose em seus monômeros constituintes, e em seguida a fermentação desses açucares, onde essa fermentação pode ocorrer em um único passo ou em dois passos subsequentes, como mostra a Figura 14 (NAKASU, 2016).

Figura 14: Rotas de hidrólise e fermentação

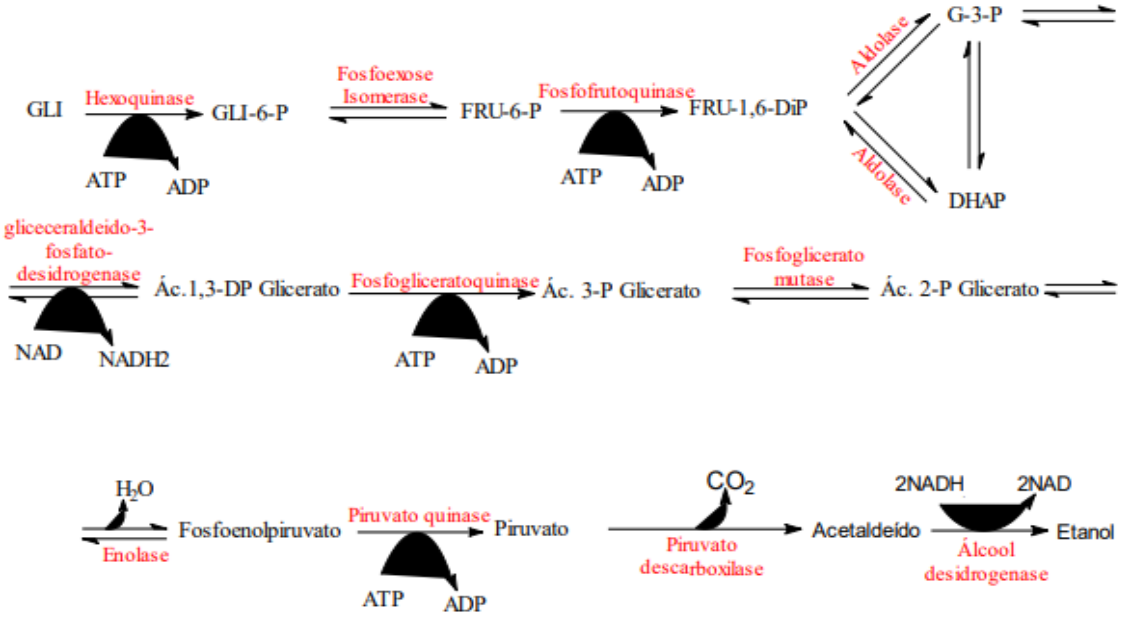


Fonte: (OGIER, 1999, DOMINGUEZ, 2003 apud NAKASU, 2016).

O processo que tem maior poder de controle sobre as condições operacionais e maior flexibilização é o em duas etapas, em que a sacarificação (ácida ou enzimática) e fermentação são realizadas separadamente (HFS). O ponto forte desse processo é que, ao ser realizado em duas etapas a hidrólise enzimática e fermentação opera em condições ideais para cada processo. E no processo de etapa única, a hidrólise e a fermentação ocorrem em um mesmo reator. Por esse motivo tem-se a redução de inibição do produto final que ocorre na operação de duas etapas, pois a presença de microrganismos fermentativos junto com as enzimas celulolíticas reduz o acúmulo de açúcar no fermentador (RABELO, 2010).

A produção de etanol por fermentação, necessita de 12 reações sequenciais para acontecer (Figura 15), cada uma catalisada por uma enzima. As enzimas glicolíticas são influenciadas por fatores como: vitaminas, minerais, nutrientes, inibidores, pH, temperatura, entre outros. Estes podem inibir a ação enzimática, ou estimulá-la, o que interfere no desempenho dos processos fermentativos (GOMEZ, 2011).

Figura 15: Processo bioquímico da fermentação



Fonte: ANDRADE (2000) apud MOURA (2021).

3.4.4.1 Leveduras Fermentadoras de Pentoses e Hexoses

Atualmente, a produção de etanol de primeira geração utiliza matérias-primas ricas em carboidratos, onde o microrganismo mais utilizado na fermentação desses carboidratos é o *Saccharomyces cerevisiae*, pois, consegue metabolizar hexoses, com condições bem definidas, sendo elas: elevados concentrações osmóticas, baixos valores de pH, e tolera altas concentrações de etanol no final da fermentação. No entanto esse microrganismo é incapaz de fermentar pentoses como a xilose, principal produto obtido a partir do pré-tratamento dos materiais lignocelulósicos, sendo que a produção de etanol segunda geração utiliza materiais lignocelulósicos para se produzir etanol (MATSUSHIKA, *et. al*., 2009).

A xilose é a pentose mais abundante nos materiais lignocelulósicos e o segundo carboidrato mais abundante na natureza (MATSUSHIKA, et. al., 2009). Sendo assim, é necessário a utilização de microrganismos que sejam capazes de fermentar esse carboidrato, para se conseguir um melhor aproveitamento na produção de etanol segunda geração.

Outros microrganismos têm sido relatados por apresentar habilidade de metabolizar xilose produzindo etanol, sendo eles: *Candida succiphila, C. jeffriesii, C. intermedia, Pichia stipitis, Pichia tannophilus* dentre outras (Jeffries et al., 2007).

A levedura *Pichia kudriavzevii*, anteriormente conhecida *como Issatchenkia orientalis* e *Candida krusei*, tem se mostrado promissora para a fermentação de pentoses e hexoses (PAGNOCCA, 2015 apud FREITA, 2017).

3.4.5 Cinética

A cinética química da reação de fermentação alcoólica estuda a relação entre a velocidade especifica de crescimento dos microrganismos com a velocidade de consumo do substrato e a formação do produto (ANDRIETTA, 2007 apud MOURA, 2021). É de suma importância para um projeto industrial a obtenção dos parâmetros cinéticos, pois possibilita a simulação do sistema operando em diversas condições operacionais (VIEGAS, 2003).

A cinética fermentativa apresentas vários pontos de muita importância, e seu estudo nos possibilita a sua compreensão no processo, sendo elas (TOSETTO, 2002):

- Mensurar a velocidade de transformação da fermentação;
- Verificar a influência de fatores como pH, temperatura nas velocidades;
- Averiguar o processo através dos modelos matemáticos;
- Empregar as equações matemáticas na otimização e controle do processo.

3.4.5.1 Velocidade Específica de Crescimento (μ)

A velocidade específica de crescimento relaciona a taxa de crescimento do microrganismo com a concentração mássica contida no meio. Representado pela equação 1:

$$\mu = \frac{1}{X}\frac{dX}{dt} = \frac{1}{x}r_X \quad (1)$$

A equação 2 relaciona a taxa de crescimento do microrganismo com a velocidade específica de crescimento:

$$r_X = \mu X \quad (2)$$

3.4.5.2 Rendimento Em Massa Celular

A quantidade de massa celular relaciona-se com a quantidade de substrato consumido [g massa seca/ g ART]. Representado pela equação 3:

$$Y_{X/S} = \frac{\frac{dX}{dt}}{-\frac{dS}{dT}} = \frac{r_x}{r_s} \quad (3)$$

Colocando a equação em função da taxa de consumo de substrato, tem-se:

$$r_s = \frac{r_x}{Y_{X/S}} \quad (4)$$

Ao substituir (2) em (4), tem-se:

$$r_s = \frac{\mu_x}{Y_{X/S}} \quad (5)$$

Verifica-se acima a velocidade específica de crescimento do microrganismo (μ) com a taxa de consumo de substrato.

3.4.5.3 Rendimento do Produto

A massa de produto obtido relaciona-se com a massa do substrato que é consumida em g de etanol/ g de ART, representado pela equação 6:

$$Y_{P/S} = \frac{\frac{dP}{dt}}{-\frac{dS}{dt}} = \frac{r_P}{r_S} \quad (6)$$

Colocando a taxa de produção do produto em evidência obtêm-se as equações 7 e 8:

$$r_P = Y_{P/S} r_s \quad (7)$$

$$r_P = \frac{Y_{P/S}}{Y_{x/S}} \mu X \quad (8)$$

Aplica-se a equação 8 para casos em que a formação do produto está relacionada com o crescimento de células.

3.4.6 Biorreatores

Biorreatores são recipientes onde ocorrem as reações químicas catalisadas por "biocatalisadores", sendo esses enzimas ou microrganismos, e nesses recipientes há o controle de alguns parâmetros, como por exemplo a temperatura, pH, aeração, etc. (LIMA et al.,2001; TORTORA et al., 2012). Existem vários tipos de biorreatores e eles podem ser classificado da seguinte forma (Schimidell, 1975):

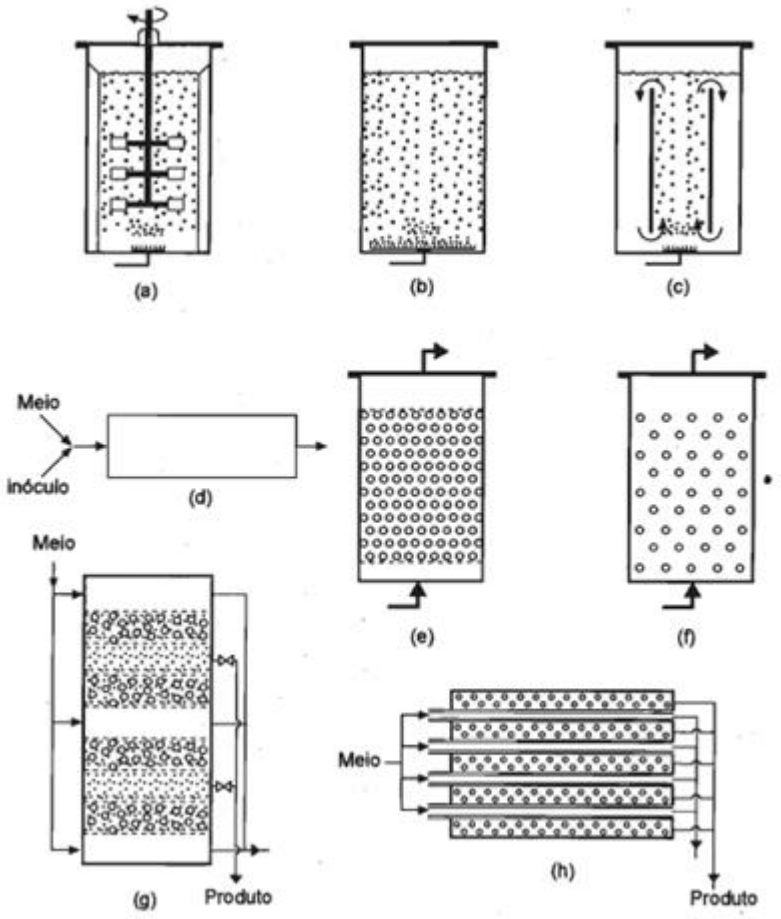
(a) Reatores em fase aquosa (fermentação submersa)

- Células/enzimas livres:
  - Reatores agitados mecanicamente;
  - Reatores agitados pneumaticamente
  - Reatores de fluxo pistonado
- Células/enzimas imobilizadas em suportes:
  - Reatores com leito fixo;
  - Reatores com leito fluidizado;
  - Outras concepções;
- Células/enzimas confinadas entre membranas:
  - Reatores com membranas planas;
  - Reatores de fibra oca.

(b) Reatores em fase não-aquosa (fermentação semi-sólida)

- Reatores estáticos;
- Reatores com agitação;
- Reatores com leito fixo;
- Reatores com leito fluidizado gás-sólido.

Figura 16- Tipos de Biorreatores. (a) STR; (b) coluna de bolhas; (c) “air-lift”; (d)” plug-flow”; (e) com células imobilizadas (leito fixo); (f) com células imobilizadas (leito fluidizado); (g) reator com membranas planas; (h) “hollow-fiber”



Fonte: Adaptado de SCHIMDELL et al (1975).

Em um reator agitado pneumaticamente, o líquido é agitado por bolhas no reator. Neste tipo de biorreator, a tensão de cisalhamento é baixa devido à falta de um mecanismo de agitação mecânico. Exemplos disso são os reatores de coluna bolha e os reatores pneumáticos.

As células imobilizadas são utilizadas em biorreatores para manter altas concentrações de células e aumentar a produtividade do processo. Os reatores podem ser divididos em reatores de leito fixo, onde não há movimento de partículas, e reatores de leito fluidizado, onde há movimento significativo de partículas. Esta fluidização pode ser obtida pela injeção de ar ou gás inerte ou por um fluxo de líquido circulante no reator.

Em reatores de placa e membrana oca, as células estão localizadas entre as membranas semipermeáveis através das quais o fluido flui. Nesses reatores geralmente há uma separação entre o fluxo de nutrientes e metabólitos, o que facilita o processo de purificação do produto.

O reator CSTR é um vaso cilíndrico com uma relação comprimento/largura de 2:1 ou 3:1. Geralmente é equipado com lâminas para evitar o turbilhão quando o líquido é mexido. O agitador está localizado em um eixo central em relação ao digestor e o rotor está presente em altura, geralmente com lâminas planas.

No Brasil, os biorreatores de agitação contínua (CSTR) são utilizados para a produção de etanol. Este processo de produção requer um biocatalisador suspenso no meio, assim como outras etapas de limpeza e tratamento de resíduos (SOUSA, 2016).

- Reatores de tanques agitados ou reatores de mistura perfeita

Um reator de tanque agitado que consiste de um agitador mistura os reagentes para melhor homogeneizar o sistema. Em estado estacionário, o fluxo de massa dos reagentes é igual ao fluxo de massa das águas residuais. Neste tipo de reator não há variação espacial na concentração, temperatura ou taxa de reação (PEREIRA, 2021).

Este tipo de planta pode ser usado individualmente ou em série (permitindo uma melhor conversão) e é relativamente fácil de controlar a temperatura. Tem custos operacionais mais baixos em comparação com uma fábrica de lotes.

- Reatores por Batelada

Os reatores em batelada consistem em um agitador com pás acopladas a um eixo central, na maioria dos casos a hélice está presente para aumentar o efeito de mistura do sistema.

Neste tipo de configuração, não há entrada ou saída de reagentes ou produtos no processo. Os reagentes são alimentados em uma única etapa. Os parâmetros como temperatura e concentração não variam com a posição, mas com o tempo. É frequentemente usado em pequena escala, para testar novos processos que não foram totalmente desenvolvidos e para processos que são difíceis de converter em operação contínua. Ela oferece vantagens de utilização, como altas taxas de rotatividade e um modo de operação flexível que permite que diferentes produtos sejam produzidos no mesmo reator (GONÇALVES, 2015).

4. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica tem como objetivo explorar pesquisas que já foram realizadas por outros pesquisadores. Através desta, é possível delimitar um problema, construir teorias e fazer comparações com base em diversos artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses.

Este trabalho foi realizado através de busca eletrônica em materiais disponíveis em portais como Portal de Periódicos CAPES, Scielo e Google Acadêmico, e em alguns livros. Foram utilizados termos de pesquisa em palavras-chave de publicações em geral, como “etanol”, “etanol de segunda geração”, “produção de etanol”, “biorreatores”, “produção de etanol a partir do sorgo sacarino”.

A busca foi realizada entre os meses de julho e novembro de 2022. Inicialmente, os últimos 5 anos (2017 a 2022) foram utilizados como critério de inclusão. Posteriormente a busca foi expandida para um período maior (2012 a 2022). Após leitura dos resumos foram excluídos os trabalhos em que o foco era a produção de etanol de primeira geração. Posteriormente, os trabalhos selecionados foram lidos cuidadosamente com o objetivo de selecionar os aspectos mais relevantes para o presente trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram encontrados 372 artigos científicos para produção de etanol a partir da biomassa do sorgo sacarino. Entretanto, somente um artigo utilizava a fermentação para produção de etanol de segunda geração no banco de dados da web *of science*. FREITA (2017), utilizou *Pichia kudriavzevii* para produção de etanol utilizando a biomassa do sorgo sacarino como fonte de carbono. O autor obteve uma conversão de até 26,96% do substrato em etanol, após 72 horas de fermentação.

Em estudo, analisou-se que adequação do pré-tratamento ácido possibilitou a remoção da fração hemicelulósica de modo eficiente, produzindo hidrolisado com alta concentração de xilose de 97g/L para sorgo sacarino. Nutrientes como C, H, N, O, P, K, S, Mg, Fe, Zn devem ser fornecidos pelo material que será utilizado para hidrólise enzimática após o pré-tratamento, e ou adicionados ao mosto. A hidrólise enzimática foi eficiente possibilitando a fermentação, produzindo 11,83 litros de etanol/kg bagaço m.s., para o sorgo sacarino. A análise do processo de produção de etanol 2G empregado caracterizou que a conversão em etanol dos bagaços de sorgo sacarino, resulta em um rendimento total de 59,38 litros de etanol.t^{-1} de m.s. e produção de 1.301,48 litros de etanol por hectare (FREITA, 2017).

6. CONCLUSÕES

A produção de etanol é de suma importância para o desenvolvimento da economia mundial e para a questão ambiental, sendo uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis. O Brasil tende a continuar em posição de liderança no mercado, não só por ser o maior produtor de cana-de-açúcar, como também por apresentar uma vasta área para outros cultivos agrícolas.

A escolha do microrganismo, a verificação das condições operacionais, a utilização da cinética e a adequação dos balanços ao processo, são essenciais para o bom funcionamento de todo o sistema.

A produção de etanol segunda geração tem se mostrado muito eficiente, para aumentar a quantidade de etanol disponível no mercado. Os materiais lignocelulósicos por estar em abundância na natureza, torna seu processo economicamente viável, além de promover o aproveitamento de resíduos que seria descartado.

O sorgo sacarino, tem se mostrado ser uma cultura interessante para se produzir etanol, pois, apresenta várias características favorável. Tendo em vista que a mesma, pode ser plantada junto a outras culturas vegetais, como por exemplo a cana-de-açúcar, favorecendo as usinas a ter um tempo de safra maior, que o atual, e a assim reduzindo o período de ociosidade das destilarias, que atualmente varia de três a cinco meses.

Segundo AZEVEDO et al. (2012), mesmo apresentando inúmeras vantagens a cultura de sorgo sacarino não propõe a substituição da cana-de-açúcar, mais uma complementação. Com o plantio e colheita de sorgo e posterior plantio de cana, uma vez que no Brasil, a cana-de-açúcar destaca-se como uma das principais fontes de matéria-prima na produção sustentável de etanol.

REFERÊNCIA

ABARCA, C. D. G. **Inovações tecnológicas na agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil.** Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro; Ouro Preto: DEPRO, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/. Acesso em: 25 outubro 2022.

AGBOR, V. B., CICEK, N., SPARLING, R., BERLIN, A., LEVIN, D. B., "Biomass pretreatment: fundamentals toward application". **Biotechnology Advances**, v.29, pp. 675-685, 2011.

ALBARELLI, J. Q. **Produção de Açúcar e Etanol de Primeira e Segunda Geração: Simulação, Integração Energética e Análise Econômica**. 2013. F. Dissertação (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2013.

ASCENDINO, Guilherme Guimarães; BOSCH NETO, Juan Canellas; TORRES, Laura. Modelagem De Biorreatores Em Série E Com Reciclo Para A Produção De Etanol E Estudo De Caso De Uma Usina De Álcool. In: Anais Do Congresso De Engenharia Da Universidade Federal De São João Del-Rei,2018, São João Del Rei. **Anais eletrônicos**... Campinas, Galoá, 2018 v. 8. Disponível em: https://proceedings.science/coen-2018/papers/modelagem-de-biorreatores-em-serie-e-com-reciclo-para-a-producao-de-etanol-e-estudo-de-caso-de-uma-usina-de-alcool. Acessado em: 20 outubro de 2022.

AZEVEDO, M. S.; SANTOS, R. V. O; MAGALHÃES, T. V. Produção de etanol no Brasil. **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, p. 151-154, 2012.

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.

BASTOS, VALÉRIA DELGADO. **Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2007. 33 p. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2527. Acesso em: 25 julho 2022.

BNDES. **Bioetanol de cana-de-açúcar Energia para o desenvolvimento Sustentável**. 2008. Disponível em: < file:///C:/Users/eudes/Downloads/Bioetanol%20da%20cana-de-acucar_P.pdf >. Acessado em: 15 de agosto de 2022.

BNDES; CGEE – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BNDES; CGEE; FAO; CEPAL. **Bioetanol de cana-de-açúcar Energia para o desenvolvimento Sustentável**. 2008. Disponível em: < file:///C:/Users/eudes/Downloads/Bioetanol%20da%20cana-de-acucar_P.pdf >. Acesso em: 15 de junho de 2022.

BRASSOLATTI, Tatiane Fernandes Zambrano *et al*. Etanol de Primeira e Segunda Geração. **Revista Interdisciplinar de Tecnologias e Educação**, Boituva, v. 12, n. 12, 01 jun. 2016. Disponível em: http://rinte.ifsp.edu.br/. Acesso em: 15 de outubro de 2022.

BRETT, C., WALDON, K. Cell wall architecture and the skeletal role of the cell wall. In: **Physiology and biochemistry of plant cell walls, Blackk, M. and Charlwood, B.** (Eds), Chapman and Hall, ed. 2, p. 44-74. 1996.

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

CANETTIERI, E. V. **Obtenção dos parâmetros e estudo cinético da hidrólise ácida dos resíduos florestais de eucalipto.** 2004. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004.

CARVALHO, G. B. M.; BENTO, C. V.; SILVA, J. B. A. Elementos biotecnológicos fundamentais no processo cervejeiro: 1a parte- As Leveduras, **Revista Analytica**, v. 25, n.25, p. 46-54, 2006. Acesso em 11 de outubro de 2022.
CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento (2011) Disponível em: Acesso em: 09 de outubro de 2022.

CORREIA, D.S. et al.. Enzimas oxidadtivas microbianas envolvidas na biodegradação da lignocelulose: produção, caraterísticas bioquímicas e importância biotecnológica. **Documentos 284**, Seropédica, RJ, 1v, 1n, 34p., dezembro, 2011.

COSTA, AC, **Caso de Sucesso:** Produção de Etanol (2ª Geração). Laboratório de Engenharia de Processos Fermentativos e Enzimáticos (LEPFE) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2014. Disponível em: https://www.crq4.org.br/sms/files/file/caso_sucesso_aline_costa_etanol2.pdf. Acesso em 12 de outubro de 2022.

COSTA, J. A. V., MORAIS, M. G. 2011. The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae. **Bioresource Technology**. 102; 2-9.
ECKERT, Caroline Thaís. **Avaliação da produção de etanol a partir de distintos híbridos de milho na região oeste do paraná**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia em Energia na Agricultura, Programação de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016. Disponível em: http://tede.unioeste.br/. Acesso em: 05 outubro de 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço enérgico nacional**. p. 264. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf. Acesso em: 11 de outubro de 2022.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood**. Chemistry: Ultrastructure: Reactions. Berlin. Walter de Gruyter. 1989.

FERREIRA, O.E. **Produção de etanol a partir de sorgo sacarino com tratamento enzimático.** Tese (doutorado em microbiologia Agropecuária). 2015. 79f. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015.

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

GOMEZ, Pablo Andres Alvarez. **SIMULAÇÃO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE ARRANJO DE UMA UNIDADE DE FERMENTAÇÃO PILOTO MÓVEL PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, f. 83 2011.

Gonçalves, A. G. M. **Estudo Dirigido de Cinética e Reatores: tipos de reatores e suas respectivas equações de balanço.** Disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAforMAB/tipos-reatores-suas-respectivas equacoes-balanco. Acessado em: 10 outubro 2022.

IEA, **Internactional Energy Agency,** 6ª ed. Global Public Policy Institute (2009). Disponível em: <https://www.files.ethz.ch/isn/109115/GPPiPP6_IEA_final.pdf> Acesso em: 18 de setembro de 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.

KLEMM, D. HEUBLEIN, B., FINK, H., BONH, A. 2005. CELLULOSE: Fascinating biopolymer and sustentainable raw material. **Angewandt Chemie-International**. Ed. 44.

KOSE, A., ONCEL, S. S. 2016. **Algae as a promising resource for biofuel industry:** facts and challenges. International Journal of Energy Research. 41; 924-951.

LEARY, D., VIERROS, M., HAMON, G., ARICO, S., MONAGLE, C. 2009. **Marine genetic resources:** a review of scientific and commercial interest. Marine Policy. 33 (2); 183–194.

LIMA, Urgel de Ameida; AQUARRONE, Eugênio; BORZANI, Walter; SCHMIDELL, Willisaldo; coordenadores. **BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL**, volume III, 1ª ed. Editora Edgard Blucher LTDA, 2001.

LINO, A. G. **Composição química e estrutural da lignina e lipídios do bagaço e palha da canade-açúcar.** Viçosa, UFV, 2015. 97p.

LOSORDO Z.; MCBRIDE J.; VAN ROOYEN, J.; WENGER, K.; WILLIES, D.; FROEHLICH, A.; MACEDO, I. C.; LYND, L. R.. Cost competitive second generation ethanol production from hemicellulose in a Brazilian sugarcane biorefinery. Online Library (wileyonlinelibrary.com); **Biofuels, Bioprod. Bioref**. 10:589–602. 2016.

MACHADO, C. M. M. Produção de etanol de sorgo sacarino. **Agroenergia em Revista,** Brasília, v 2, n 3, p (27-28), agosto, 2011. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/919537/1/BolfeAgroeRevis.pdf >. Acessado em: 13 de agosto de 2022.

MARTINS, L.F. **Caracterização do complexo celulasico de Penicillium echinulattum.** 121p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/8807/Disserta%c3%a7%c3%a3o_Leonardo_vers%c3%a3o_final_segura.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acessado em: 10 de outubro de 2022.

MATSUSHIKA, A., INOUE, H., KODAKI, T.; SAWAYAMA, S. Ethanol production from xylose in engineered Saccharomyces cerevisiae strains: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology,** v. 84, p. 37-53; 2009.

MAY, André et al. Cultivo de Sorgo Sacarino em Áreas de Reforma de Canaviais. **Circular Técnica,** Sete Lagoas, MG. p. 1-36. setembro, 2013. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/966886/1/circ186.pdf. Acesso em 20 de outubro de 2022.

MIAO, X., WU, Q., YANG, C. 2011. **Production of liquid biofuels from renewable resources. Progress in Energy and Combustion Science**. 37; 52-68.

MORO, Mariana Kuster. **Pré-tratamento da biomassa de cana-de-açúcar por extrusão com dupla-rosca.** f.119. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

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.

MOURA, J. F. DE. **Biorreatores para produção de Etanol usando glicerol como fonte de carbono: uma revisão bibliográfica.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

NAKASU, P. Y. S. et al. Acid post-hydrolysis of xylooligosaccharides from hydrothermal Monografia de TCC – Química – Bacharelado – UFSJ - 2016 21 pretreatment for pentose ethanol production. **Fuel**, v. 185, p. 73–84, 2016.

NASCIMENTO, D. Dublê da cana. Idea News: **Cana e indústria**. Ano.11, n. 136, 2012.

PEREIRA, Antonildo Santos. **TRANSPORTE DE CALOR EM REATOR CILÍNDRICO-ELÍPTICO DE LEITO FIXO VIA MODELO DE DUAS FASESEM REGIME PERMANENTE**. 2021. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

QUILHÓ, F. T. L. **Produção de Etanol a partir de Materiais Lenho-celulósicos de Sorgo Sacarino:** Revisão Bibliográfica. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011.

RABELO, S. C. **Avaliação e otimização de pré-tratamentos e hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração.** 447f, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química). 154 Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2010.

REDDY, B. V. S., RAMESH, S., REDDY, P. S., RAMAIAH, B., SALIMATH, P. M. & KACHAPUR, R. Sweet sorghum – a potential alternate raw material for bioethanol and bio-energy. **International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT)**, 2005.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. RFA. Markets & Statistics Annual Ethanol Production. **U. S. & World etanol production**. Disponível em: https://ethanol rfa.org/statistics/ annual-ethanol-production/. Acesso em: 23 de out. de 2022.

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis:** impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação. TCC (Curso de Especialização) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010. Disponível em: https://www.ufjf.br/analiseambiental/files/2009/11/monografia.-1.pdf. Acesso em: 28 set. 2022.

ROSAS, J. **Curso de Biología Molecular Y Celular. Enzimas:** Aceleradores de las Reacciones Químicas de los Seres Vivos. 2003

SCHAFFERT, R. E. Sorgo na produção de etanol. **Embrapa Milho e Sorgo**. Brasília, DF, 06 de abril de 2010.

SCHMIDELL, Willibaldo; LIMA, Urgel de Almeida; AQUARONE, Eugênio; BORZANI, Walter. **Biotecnologia Industrial**. Valparaiso: Edgard Blucher Ltda., 1975. 2 v.

SENNA, Pedro Pinho; ANSANELLI, Stela Luiza de Mattos. **ETANOL DE PRIMEIRA OU DE SEGUNDA GERAÇÃO? UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS PRODUTIVOS.** In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL E INOVAÇÃO, 1., 2016, Araraquara: Blucher Proceedings. v. 3. Disponível em: http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/1enei/083.pdf. Acesso em 12 de outubro de 2022.

SILVA, A. S., TEIXEIRA, R. S., MOUTTA, R. O., FERREIRA-LEITÃO, V. S., BARROS, R. R. O., FERRARA, M. A., BON, E. P. S. "Sugarcane and Woody Biomass Pretreatments for Ethanol Production". In: Chandel, A. K., Silva, S. S. (eds), Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass – **Techniques, Applications and Commercialization,** 1 ed., chapter 3, Rijeka, Croatia, Intech, 2013.

SILVA, R., HARAGUCHI, S. K., MUNIZ, E. C. e RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, vol.32, n.3, p. 661-671, 2009.

SIQUEIRA, M. R. **Efeitos dos produtos de hidrólise de materiais lignocelulósicos sobre a produção de H2 por fermentação**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo,2015. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59138/tde-13042015-114341/en.php>. Acessado em: 11 de outubro de 2022.

SOUSA, Gizele Saraiva de. **Estudo da fermentação alcoólica em um biorreator de leito fixo em sistema contínuo com células de Saccharomyces cerevisiae imobilizadas em alginato cálcio revestido com quitosana.** 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SOUZA, F. M. L. **Parte Complementar do Trabalho: Fenologia da Planta de Sorgo**. 2014. Disponível em: < file:///C:/Users/eudes/Downloads/fenologia%20sorgo%202.pdf>. Acesso em 13 de outubro de 2022.

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

TAHA M. et al. **Commercial feasibility of lignocellulose biodegradation:** possibilities and challenges. Current opinion in biotechnology, v. 38, p. 190-197, abr., 2016.

TORTORA, Gerard J.; FUNKE, Berdell R.; CASE, Christine L..**Microbiologia,** 10. ed. Tradução de Aristóbolo Mendes da Silva. Porto Alegre. Editora Artmed, 2012.

UDOP. Produção de etanol do milho avança 34% com quebra histórica da cana; entenda prós e contras. **União Nacional de Bioenergia**. 24 de abril de 2022. Disponível em: < https://www.udop.com.br/noticia/2022/04/26/producao-de-etanol-do-milho-avanca-34-com-quebra-historica-da-cana-entenda-pros-e-contras.html>. Acessado em: 15 de outubro.

UNCTAD (2016). **Second generation biofuel markets:** state of play, trade and developing country perspectives. UNCTAD/DICT/TED/2015/8.
URIBE, R. A. M.; TICIANELI, LUCIAN C.S. Influência do estande na produtividade de sorgo sacarino. **Diálogos & Ciência**, v.34, p.10-12, 2014.

VIDAL, Maria de Fátima. Produção e Mercado de Etanol. **Caderno Setorial ETENE,** n. 159, p. 1-9, abr. 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/906/1/2021_CDS_159.pdf. Acesso em 11 de novembro de 2022.

VIEGAS, M. C.. **Otimização de sistema de fermentação alcoólica continua utilizando reatores tipo torre e leveduras com características floculantes.** Tese (Doutorado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas (SP), 150 p., 2003.

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.

ZABED, H. et al. **Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass:** An overview on feedstocks and technological approaches. Renewable and sustainable energy reviews, v. 66, p. 751-774, dez., 2016.